

маг. инж. Добри Иванов Добрев

УПРАВЛЕНИЕ НА РИСКА ПРИ ТРАНСПОРТ НА ПРИРОДЕН ГАЗ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен „Доктор“ по професионално направление 5.8. „Проучване, добив и преработка на полезни изкопаеми“, докторска програма „Техника на безопасност на труда и противопожарна техника“

Научни ръководители: проф. д-р. Михаил Михайлов
доц. д-р. Елена Власева

Рецензенти: проф. д-р. инж. Георги Николов
доц. д-р. Борислав Николов

Дисертацията е обсъдена и допусната до защита на разширено заседание на катедра „Руднична вентилация и техническа безопасност“ на МГУ „Св. Иван Рилски“ на 23.11.2020г.

София 2020



Дисертацията съдържа 144 стр. в които 61 фиг., 26 табл. и 5 стр. литературни източници, включително 64 литературни източника и 8 електронни източници. Авторските публикации по дисертационния труд включват две заглавия.

Фигурите и таблиците в текста на автореферата повтарят оригиналната номерация от дисертационния труд.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои пред Научно жури определено от Ректора на „МГУ Св. Иван Рилски“ със Заповед № 3 от 04.01.2021г., на 25.02.2021 г.от 11:00 ч. в Зала 621, Лабораторен блок на открито заседание на научното жури в състав:

1. проф. д-р. Инж. Георги Кирилов Николов – МГУ, вътрешен член
2. проф. д-р. Иван Славейков Антонов – ТУ, външен член
3. проф. д-р. Радослав Христов Къртов – Академия на МВР, външен член
4. доц. д-р. Инж. Захари Иванов Динчев – МГУ, вътрешен член
5. доц. д-р. Борислав Иванов Николов – ТУ, външен член

Резервни членове:

1. проф. д-р. Никола Борисов Мърхов – Експерт, външен член
2. доц. д-р. Мартин Минков Бояджиев – МГУ, вътрешен член

Материалите за защитата са на разположение на интересувашите се в каб. 603 на Лабораторен блок 1 на МГУ „Св. Иван Рилски“ София

Автор: Добри Иванов Добрев

Заглавие: Управление на риска при транспорт на природен газ

Печат: Мания Принт София

СЪДЪРЖАНИЕ

I. ВЪВЕДЕНИЕ И ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.....	3
II. ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.....	4
III. МЕТОДИ ЗА ОЦЕНКА НА РИСКА ВЪВ ФАЗИТЕ НА ПРОЕКТ.....	4
IV. ДЕФИНИРАНЕ И ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПОСЛЕДИЦИТЕ ОТ АВАРИИ В ГАЗОПРЕНОСНА МРЕЖА	7
IV.1. Определяне на дебита при струйно(неконтролирано) изтичане на природен газ.....	7
IV.2. Разсейване (Dispersion) на природен газ в спътно течение.....	9
IV.3. Ускорено горене (FF).....	10
IV.4. Факелен пожар (JF).....	11
IV.5. Експлозия на газов облак (VCE).....	13
IV.6. Зони на въздействие при аварии.....	14
V. ВЕРИФИКАЦИЯ НА ПРЕДЛОЖЕНИТЕ МЕТОДИ ЗА АНАЛИЗ И ОЦЕНКА НА РИСКОВЕТЕ В РАЗЛИЧНИТЕ ФАЗИ ОТ РЕАЛИЗИРАНЕТО НА ИНТЕРКОНЕКТОРНА ВРЪЗКА БЪЛГАРИЯ – ГЪРЦИЯ.....	19
V 1 ХАРАКТЕРИСТИКА НА ПРОЕКТА - ОБЕКТА НА ИЗСЛЕДВАНЕТО.....	19
V.1.1. Параметри на съоръжението.....	19
V.1.2. Определяне на размера на отвора и дебита на изтичане	22
V.2. СИСТЕМАТИЗИРАНЕ НА АКТУАЛНА СТАТИСТИЧЕСКА ИНФОРМАЦИЯ ЗА ИЗСЛЕДВАНИЯ ОБЕКТ.....	23
V.2.1. Дефиниране на причините и адаптиране на данните към обекта на изследване.....	23
V.2.2. Разпределение на причините по ЧЕСТОТА.....	26
V.2.3. Вероятност за изтичане през различните нарушения.....	27
V.2.4. Условни вероятности за реализиране на крайни сценарии.....	27
V.3. ОЦЕНКА НА РИСКА В ЦЕЛЕВИЯ УЧАСТЪК ОТ ИНТЕРКОНЕКТОРНА ВРЪЗКА БЪЛГАРИЯ –ГЪРЦИЯ.....	29
V.3.1. Определяне вероятността за летален изход.....	29
V.3.2. Индивидуален риск	33
V.3.3. Социален (обществен) риск	35
V.4.ИНЖЕНЕРНО–ТЕХНИЧЕСКИ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ЗА МИНИМИЗИРАНЕ НА РИСКА.....	36
ПРИНОСИ	42
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	43

I. ВЪВЕДЕНИЕ И ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

След преминаването от твърди на течни горива, следващата стъпка в развитието на човечеството в сферата на енергетиката е производството на енергия от възобновяеми източници или изграждането на огромни фотоволтаични паркове. Все пак този процес на преминаване от един източник на енергия към друг е дълъг и труден. В глобален мащаб все още се произвежда електроенергия от твърди горива като за целта се определят квоти за отделените вредни емисии. Използването на природния газ като суровина за получаване на чиста енергия го прави желан на редица пазари, но едно от най-големите предизвикателства е доставянето му до крайния потребител. Инженерния и технологичен напредък през последните десетилетия развиват и осъвършенстват процесите по транспортирането до такава степен, че доставянето на продукта от дадено находище до крайния потребител е ежедневие. Въпреки изобретателността на човека която прави този толкова желан продукт достъпен, тук се намесват интересите на големите производители. Вземайки предвид географското положение на нашата страна и геополитическите отношения със съседите ни природният газ доставян за нуждите на нашата страна минава през транспортни коридори които не са достатъчно сигурни. В момента входните точки на природния газ са две, през Украйна - Румъния и през Турция. Тоест единственият газ който ползваме е с Руски произход което води до монополизиране на пазара. Още повече при спор между Русия и Украйна, нашата страна бе една от най потърпевшите при газовата криза през 2009 година. Политиката на Европейския Съюз за девирсификация на доставките налага изграждането на интерконекторната връзка между България и Гърция, с което бихме могли да ползваме природен газ доставян от различни пазари, благодарение на терминала за регазификация в Солун(Гърция). Тези факти налагат подобряването и разширяването на газопреносната мрежа на Република България чрез реализирането на проекти които да гарантират сигурността на доставките. Колкото повече се увеличава газопреносната мрежа толкова повече се доближава до населени места, пътища, индустриални зони и други чувствителни обекти. Това налага изграждането на ясни правила и изисквания на които да отговарят тези съоразения с повишена опасност за населението и икономиката. Оценката на риска дава отговор на въпроса „Колко точно са опасни тези съоразения?“ и „Каква е разумната дистанция която трябва да се спазва между тях и чувствителните обекти?“. Зачестилите инциденти по газопреносната мрежа на Булгартрансгаз са още един ясен пример за важността на проблема.

II. ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Системите за пренос на природен газ са съставени от множество различни механични устройства, като тръбопроводи, клапани, регулатори, компресори, манометри и съединителни възли. Тези системи се характеризират с дълги тръбопроводи с голям диаметър, компресорни станции инсталирани в стратегически точки спрямо добивните и съоръженията за съхранение до пазара.

На основата на направеното проучване се дефинира целта на дисертационния труд.

Този труд има за **ЦЕЛ**, чрез анализ на най-съвременните подходи за идентификация, анализ на опасностите и рисковете да разработи системен подход за оценка и минимизиране на рисковете на газопреносни мрежи във фазите на тяхното проектиране.

За постигане на тази цел трябва да бъдат решени следните научно-изследователски **ЗАДАЧИ**:

1. Да се предложат адекватни на наличната информация методи за анализ на рисковете и за тяхната оценка във фазите на проектирането;
2. Да се дефинират крайните вредоносни събития при авария на преносен газопровод и да се изберат математически модели за определяне на последиците от тях;
3. Предложените методи за анализ и оценка на рисковете да се верифицират на фаза идеен проект и на фаза технически проект на интерконекторната връзка България Гърция (ICBG);
4. Да се предложат адекватни проектни технически решения за управление на рисковете на интерконекторната връзка.

Обект на настоящото изследване са рисковете при проектиране на преносни газопроводи, а предмет на изследването е управлението на тези рискове при експлоатацията на газопроводите.

III. МЕТОДИ ЗА ОЦЕНКА НА РИСКА ВЪВ ФАЗИТЕ НА ПРОЕКТ

Транспортът на природен газ по тръбопроводи е най – бързия и сигурен начин за задоволяване нуждите на крайните потребители. Преносните газопроводи имат за цел да свържат големите производители с големите консуматори, като пред тях се изправят различни географски райони, морета и политически граници.

Напредването на технологиите прави възможно изграждането на все по-големи и по-сложни от инженерна гледна точка газопроводи. Със увеличаването на дължината и дебита на тези съоръжения се увеличава и рискът от настъпване на авария. Това налага детайлно проучване на събитията и последствията от тези събития в чувствителните участъци на преносните и разпределителни мрежи. Оценката на риска почива на анализите предложени в тази част.

Няколко въпроса към оператора на тръбопровода могат да насочат избора на техника за оценка на риска:

- С какви данни разполагаме?
- Каква е прогнозната стойност на данните?
- Какви ресурси са налични (пари, персонал)?
- Какви ползи се очакват от гледна точка на намаляване на разходи, на регулаторната тежест, подобряване на общественото мнение и оперативната ефективност?

Независимо от конкретния подход , свойствата на идеалния метод за оценка на риска ще включват :ното:

Подходящи разходи - стойността на ползите, произтичащи от процеса на оценка на риска, трябва значително да надвишат разходите за създаване, изпълнение и поддържане на програмата;

Способност за приспособяване - понеже рискът не е постоянен по цялата дължина на даден тръбопровод или за определен период от време, моделът трябва да може да се приспособява към промени в информацията. Това означава, че новите данни трябва да бъдат лесни за включване в модела;

Обхват - понеже моделът е измервателен инструмент , той трябва да има необходимата чувствителност дори и към най-малките опасности произтичащи от множество причини. Това е подобно на точността на модела, но включва допълнителни съображения, които заобикалят високата степен на несигурност, свързана с управлението на риска.

Съществуват два подхода при анализ на рисковете, които се прилагат към системи:

- **Дедуктивен подход** – за дадено крайно събитие се търсят събитията(дефектите), които могат да доведат до това нежелано събитие или състояние;
- **Индуктивен подход** – за дадена повреда на компонент на системата се анализират последиците (състояние или събитие) до което тази повреда може да доведе.

Таблица III.1. Приложимост на методи за оценка на риска

МЕТОД ЗА ОЦЕНКА НА РИСКА	Risk assesment method	Abreviation	ЕТАП НА РАЗВИТИЕ		
			ПРОЕКТИРАНЕ	СТРОЕЖ	ЕКСПЛОАТАЦИЯ
Качествен анализ на риска	Qualitative risk analys	QRA	НП	НП	НП
Количествен анализ на риска	Quantytative risk analys	QRA	НП	НП	НП
Полуколичествен анализ на риска	Semihquantytative risk analys	SQRA	НП	П	П
Предварителен анализ на опасностите	Preliminary hazard analys	PHA	НП	П	П
Какво ...ако?	Whatif?	/	П	СП	П
Изследване на опасностите и функционалността	Hazard and operability study	HAZOP	НП	П	П
Анализ на ефекта от повреди и откази	Failure modes effects analys	FMEA	НП	СП	НП
Дърво на отказите	Fault tree analys	FTA	НП	СП	НП
Дърво на събитията	Event tree analys	ETA	НП	СП	НП
Причинно следствен анализ	Cause and consequence analys	CCA	НП	СП	П
Анализ на човешките грешки	Human error analys	HEA	НП	П	НП

Опис на съкращенията в таблица III.1:

НП – напълно приложим;

П – приложим

СП – слабо приложим

На база на направения преглед на различните методи за оценка на риска, от гледна точка на безопасността на населението и сигурността на доставките за съоразение като магистрален газопровод е необходимо да се направи най-изчерпателен анализ на сценариите и последствията от тях. Всеки от методите може да бъде насочен към даден период от жизнения цикъл на съоръжението, но единствено пълната количествена оценка на риска може в най-голяма степен да изясни реалната опасност за населението и инфраструктурата при авария в газопреносната мрежа.

IV. ДЕФИНИРАНЕ И ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПОСЛЕДИЦИТЕ ОТ АВАРИИ В ГАЗОПРЕНОСНА МРЕЖА

При нарушаване целостта на газопровода съществуват няколко крайни събития, които биха могли да настъпят в следствие на изтичащият газ:

- Разсейване на изтеклия газ в атмосферата - Дисперсия (**DISP** - Dispersion);
- Запалване на изтичащия газ.

При наличие на достатъчно мощен източник на топлина, който да запали газовъздушната смес, могат да се развият следните пожарни сценарии:

- Мигновен пожар (**FF** - Flash Fire или Vapor Cloud Fire),
- Факелен пожар (**JF** – Jet Fire);
- Експлозия на газовъздушния облак (**VCE** – Vapor Cloud Explosion).

IV.1. Определяне на дебита при неконтролирано струйно изтичане на природен газ

Математическите модели на случайно изтичане на газ от дълги магистрални газопроводи се базира на основни закони от механиката на флуидите и най-вече на Уравнението на непрекъснатостта, Уравнението за запазване на импулса и Уравнението за запазване на енергията. Изследванията показват, че за различните видове нарушения се използват различни модели. От съществено значение е дали изтичането е звуково или дозвуково.

Магистралните газопроводи са снабдени с кранови възли (отсекатели), които имат задачата при определен спад в налягането да сработят и да изолират участъка в който има изтичане. В зависимост от разстоянието между тях, се ограничава количеството газ което ще бъде неволно изпуснато в атмосферата. Обемът му зависи от времето за сработване на отсекателите, работното налягане и вътрешния диаметър на тръбата.

Вземайки предвид голямото налягане при което работят магистралните газопроводи, всички изтичания от тях са звукови. При звуково изтичане дебита на потока не зависи от външните условия и се изчислява по зависимост (IV.1):

$$Q_s = C_d \cdot A \cdot \sqrt{P \cdot \rho \cdot \gamma \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (IV.1)$$

където: Q_s – дебит на изтичане [kg/s]
 C_d – коефициент на разхода [-]
 A – площ на нарушението [m²]
 P – налягане на газа [Pa]
 ρ – плътност на газа [kg/m³]
 γ – отношение C_p/C_v [-]

Максимален (пиков) дебит **Q_{peak}** се достига в самото начало на изтичането и се поддържа кратковременно от няколко секунди до няколко минути. Изчислява се по следната зависимост:

$$Q_{peak} = \frac{\pi d^2 \alpha}{4} \sqrt{P \rho \gamma \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (IV.3)$$

където: d – диаметър на отвора [m]
 α – отношение d/D от отвор – светло сечение на тръбопровода [-]

Следващата фаза е на квази стационарно изтичане при която дебитът $Q_{STEADY STATE}$ се изчислява по следната зависимост:

$$Q_{steady state} = \frac{C_d \cdot Q_{peak}}{\sqrt{1 + 4 \cdot \alpha^2 \frac{f \cdot L}{d} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{2}{\gamma-1}}}} \quad (IV.4)$$

където: f е коефициент на триене при изтичане през нарушението [-]

Енергията отделена при факелно горене и експлозия зависи от момента на запалване на изтичащия газ. Много е трудно да бъде прогнозиран този момент с необходимата за анализа точност. По тази причина се въвежда една апроксимация, която има за цел да отчете различните дебита през целия период на изтичане и това е **ефективният масов дебит** [**Q_{eff}**]. Ефективния масов дебит на изтичането е част от пиковото и квазистационарно изтичане и се изчислява по следната зависимост:

$$Q_{eff} = C \cdot Q_{peak} \quad (IV.5)$$

Повечето автори (AIChE, 2000) залагат стойност на $C = 0.3$ или се изчислява по зависимостта:

$$C = \left[1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right]^{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}} \quad (\text{IV.6})$$

При разкъсване или гилотинно срязване на тръбата изтичането ще се осъществява и от двата отвора, което налага пресмятането на ефективния масов дебит да става по следната формула:

$$Q_{\text{eff}} = 2 \cdot C \cdot Q_{\text{peak}} \quad (\text{IV.7})$$

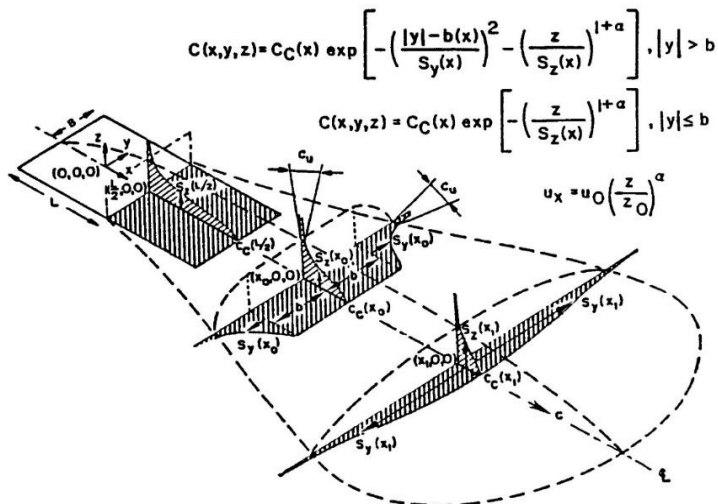
От гледна точка на безопасността при изчисленията се взема предвид, че при всеки от случаите нарушенията са ориентирани ввертикално в горната част на тръбата. Това е възможно най-тежкия случай на изтичане на газа, при всяко различно разположение на нарушението, струята на изтичащия газ ще бъде възпрепятствана от стените на кратера и нейната енергия ще бъде по-малка. Плътността на изтичащия газ остава значително по-голяма от тази на атмосферния въздух, което дава основание неговото разпространение да се изследва като дисперсия на тежък газ.

IV.2. Разсейване (**Dispersion**) на природен газ в спътно течение

Въпреки, че плътността на природния газ при нормални и стандартни условия е по-малка от тази на въздуха, когато се транспортира под високо налягане, при изтичане в атмосферата, се държи като "тежък газ". Изтича като тежък облак с ниска температура (Spicer and Havens, 1985) – смес от газ и фини капчици аерозол. (фиг.IV.1). Разпространението на тежките газове е сложно при изтичане от съдове под налягане. Формираният газов облак първоначално се разстила от мястото на изтичане по земята във всички посоки, след което започва да тече като вода носен от вятъра. Промяната на температурата на газа при изтичане води до олекването и по-доброто смесване с атмосферния въздух. Облакът се разпространява както във височина така и в широчина.

При по-продължително изтичане облака се размесва с въздуха плътността му постепенно намалява, докато гравитационната сила се изравни с подемната.

При тези условия разпространението в приземния слой е по-благоприятно при нарушение отвор.



Фигура IV.1. Дисперсия на тежък газ, например

IV.3. Ускорено горене (FF)

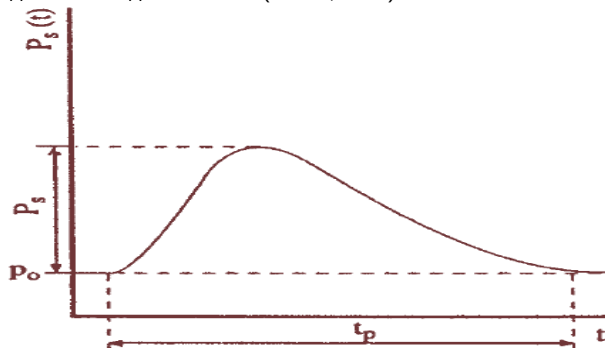
Дефлаграционно изгаряне в ограничена газовъздушна смес, при което скоростта на разпространение на пламъка е по-малка от тази на звука, не може да предизвика значително надналягане което да причини щети (CCPS, 2010). На фиг. IV.4 е даден общ профил на ускореното дефлаграционно горене. Реалната опасност е от отделената топлина, която може директно или чрез инфрачервеното излъчване да предизвика вторични пожари.

Горещият въздух от ускореното горене, може да увреди тъканите на белите дробове и да предизвика смърт от асфикция. Обикновено запалването става на разстояние от изтичането и след динамичния ефект горенето продължава като факелен пожар. Размерът на запалимият облак определя зоната на възможен директен контакт с пламъка.

Определяне нивото на топлинна радиация

При определените дебити на изтичане и при условията за наличие на мигновено запалване следва да се определи топлинната радиация, отделена при такъв пожар по методиката представена в (CCPS,1998; Villafañe, 2011; Zhang at all, 2014).

Лъчистата топлина погълната от единица площ от дадена повърхнина в околната среда може да бъде изчислена по следното уравнение, известно като модел на солидния пламък (CCPS, 1998):



Фигура IV.4. Профил на Ускорено горене

$$I = E \cdot F \cdot \tau_a \quad (\text{IV.21})$$

където: I – погълната инфрачервена топлина [kW/m^2];

E – лъчиста енергия [kW/m^2];

F – геометрична позиция на мишената [-];

τ_a – поглъщаща способност на атмосферата [-].

Оценка на степента на въздействие върху засегнатите зони, съоръжения и хора преминава през следните общи процедури:

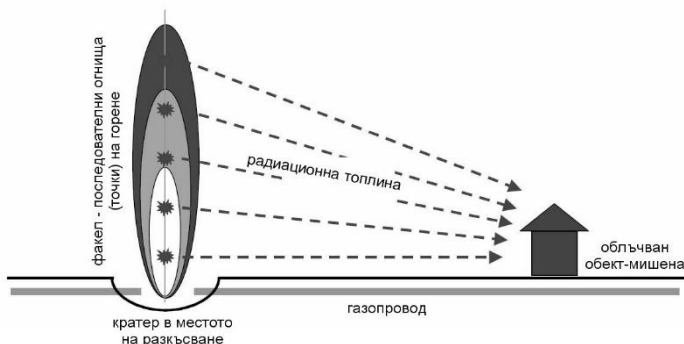
- Изчисляване на параметрите на опасността – количество отделени вредности Q_{eff} [kg/min] и топлинна радиация I [kW/m^2];
- Вероятностен подход за трансформиране на тези физически характеристики в степен на опасност и след това в риск за хора (индивидуален и/или колективен), за сгради и за съоръжения.

IV.4. Факелен пожар (JF)

Факелно горене се наблюдава до мястото на изтичане на газа от тръбопровода. При безветрие или когато конвекцията определя много по-голяма подемна сила от тази на слаб вятър може да се приеме че положението на факела е вертикално. При отдалечаване от отвора силата на изтичащият газ намалява докато посоката му на разпространение не е изчезало под въздействието на въздушните течения.

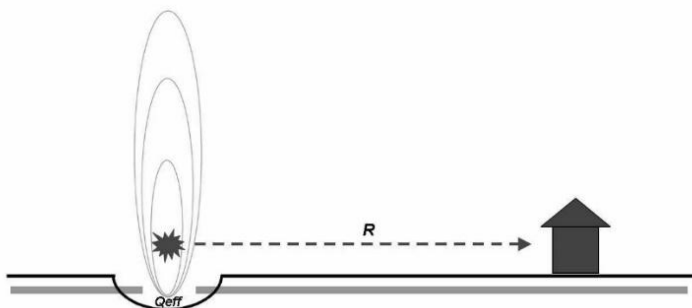
В литературата са познати два метода за определяне на излъчената от факела топлинна радиация:

- Модел на плътния пламък (Solid-flame model) – в този модел формата на факела е приета за тяло с правилна геометрична форма (фиг. IV.6) и цялата топлинна радиация се отделя от неговата повърхност (CCPS, 1998);



Фигура IV.6. Принципно схема на модела на Плътния пламък

- Модел на точков източник (Point source model) – приема се, че топлинната радиация е отделена във всички посоки от точка която се намира на аксиалната ос на факела (CCPS, 1998); Някои автори предпочитат опростяването, показано на фиг. IV.7 където точката на отделяне на енергията на горенето се снижава по оста на факела на нивото на мишената. Това означава, че се приема най-късото хоризонтално разстояние от пламъка до мишената R . В нашият анализ е приет именно този подход, без отчитане на видимостта.



Фигура IV.7. Опростен модел на точков източник на топлинна радиация

Топлинната радиация, която ще достигне до приемник, намиращ се на разстояние R от мястото на пожара се определя по зависимостта (CCPS, 1998):

$$I = \frac{\eta \cdot \tau_a \cdot Q_{eff} \cdot H_c}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad (IV.25)$$

където: I - мощност на топлинния поток [W/m^2];

η - безразмерна величина, показваща отношението между разпространената с инфрачервено излъчване топлина към цялата отделената от пожара топлина;

τ_a - атмосферна проводимост изразява способността на атмосферата да поглъща част от излъчената топлина;

$H_c = 5.002E-07$ топлина на изгаряне на метана [J/kg];

R - хоризонталното разстояние от факела до обекта [m]

Височината на факела пряко се отразява на големината на зоната на въздействие - колкото по-висок е факела толкова по-голямо е въздействието му. Концентрацията на природен газ във вътрешността на факела е прекалено висока за да протече горене, така че само периферният граничен слой на струята, който се обогатява с кислород от атмосферата гори. Височината на този пламък наричана още дължина в някои източници е функция на дебита на изтичането и топлината на изгаряне на природния газ.

$$L_f = \frac{(H_c Q_{eff})^{0.444}}{161.66} \quad (IV.26)$$

където: L_f - височина на факела [m]

IV.5. Експлозия на газов облак (VCE)

За да настъпи експлозия, изтичането трябва да бъде достатъчно продължително за да се смеси газа да с въздуха в необходимите за възпламеняването концентрации. При наличие на взривоопасна газовъздушна смес е необходим източник на топлина, който да я възпламени. Горенето може да протече ускорено или при определени условия да настъпи експлозия или взрив. Опасностите създадени при експлозията са въздействието на ВУВ (Въздушно Ударна Вълна), разлета на отломки(късове) и сеизмичния ефект. Когато скоростта на горене в газовъздушния облак е по-голяма от скоростта на звука се образува въздушно ударна вълна която може да предизвика смърт и да нанесе значителни материални щети. Определянето на въздействието от това нежелано събитие може да стане по два метода (CCPS, 1998):

- TNT equivalent model – приравняване на количеството гориво към количество тринитротолуен (тротил);
- Multienergy model – базира се на концепцията за създаване на турбулентен поток в газовъздушния облак в резултат от изтичане с голямо налягане.

Свързването на взривната енергия с разрушенията и действията на взрива е наложило като метод привеждането на енергийния потенциал на различни експлозиви към този на тротила. Така се въвежда понятието „тротилов еквивалент“. дефинирано чрез баланса на енергиите на взрива:

$$W_{TNT}.H_{TNT} = \alpha_e .Wg. Hg \quad (IV.27a)$$

където: W_{TNT} – еквивалентно газа тегло тротил (TNT) [kg]

H_{TNT} – енергия на експлозия на тротила [J/kg]

α_e - коефициент на ефективност на експлозията [-]

Hg - топлина на изгаряне (калоричен потенциал) на газа [J/kg]

Wg – тегло на газа [kg]

IV.6. Зони на въздействие при аварии

Струйно (неконтролирано) изтичане без възпламеняване на газа(Dispersion) - Дисперсия на природен газ

В химичният състав на транспортираният природен газ няма токсични (отровни), ако има такива те са в пренебрежимо малки количества ($H_2S < 3ppm$). При тези обстоятелства единствената опасност при изтичане е създадена от импулса на струята и при възпламеняване на изтичащият газ. При дисперсията е важно да бъдат определени границите на следните зони:

- ОПАСНА ЗОНА – със съдържание на природен газ повече от 5%(LFL);
- Умерено опасна зона – със съдържание на природен газ от 3-5%(60%-100% от LFL);
- БЕЗОПАСНА ЗОНА – със съдържание на природен газ под 2,5%(<50% от LFL),

където LFL (Low Flamabel Level) е долна граница на възпламеняване (ДГВ) на природния газ.

Уязвимостта на всеки попаднал в опасна зона се счита за 100% а в безопасна - за нулева.

В таблица IV.3 са дадени зоните на разпространение на газ при дисперсия в спътно течение за различните видове нарушения при първоначално

зададените метеорологични условия и за разглеждания клон. Данните са получени при симулиране с програма **ALOHA**.

Таблица IV.3. Зони на влияние при дисперсия

Вид нарушение	Атмосферни условия	Разстояние до зоните на въздействие [m]		
		Опасна	Умерено опасна	Безопасна
Пробив	F1.5	297	389	429
	D5	58	75	83
Отвор	F1.5	3700	5100	5700
	D5	652	881	953
Разкъсване	F1.5	287	485	575
	D5	494	719	820

От данните в таблицата се вижда, че при нарушение **разкъсване** се образуват много по-малки зони на разпространение на газа отколкото при отвор.

Зони на въздействие при Ускорено горене (FF или VCF)

Дефлаграционно горене (Flash Fire) в неограничен газов облак, който създава ограничено надналягане. Възниква в среда, където горимия газ и въздуха образуват горима газо-въздушна смес. Фронта на пламъка се движи бързо в горимата смес и се ускорява, но не достига скоростта на звука. Това е дефлаграционно горене със скорост от няколко десетки метра. Сравнено с експлозията горенето е толкова бавно, че изгарящия газ се разширява преди запалването и не може да формира на открито въздушно удърна вълна, с енергия достатъчна да причини щети. Реалната опасност от такова горене е демонстрирана и изследвана при пълномасщабни опити на открито. Според дефиницията на основните щети, които ускореното горене (Flash Fire) причинява са от топлинна радиация, която е наблюдавана да достигне около 84 kW/m^2 , но за кратък период от около 3 секунди (CCPS,1998). Източник на запалване може да бъде електрическа искра, гореща повърхност, фрикционна искра или открит пламък. Най-често материални загуби са от вторични пожари, запалени директно от ускореното горене или от инфрачервеното излъчване.

Горещия въздух от ускореното горене, при вдишване може да увреди тъканите на белите дробове и да предизвика смърт от асфикция. Обикновено запалването става на място отдалечено от мястото на изтичане и след динамичния ефект горенето продължава като факелно. Това дефлаграционното горене се класифицира като експлозия, когато създаване на надналягане стане по-голямо от 6895 Pa (1 psi). В тази категория са включени и появата на огнено кълбо и VCE.

По тази логика можем да констатираме , че зоните в които е възможно влиянието на FF съвпадат с тези в които облакът е в горимите граници (табл. IV.3). От гледна точка на безопасността в оценката на риска са разгледани и зоните в които имаме 60% от ДГВ на метана. Стойностите на концентрацията на газа с които се очертават рисковите зони служат и за оценяване на възможността за работа на противопожарните екипи при ликвидиране на аварии.

Зони на въздействие при Факелен пожар (JF)

Опасността за населението и чувствителни обекти при факелен пожар се изявява в продължителното отделяне на топлинна радиация от повърхността на факела. За определяне на зоните на влияние от особена важност са големината и формата на струята природен газ. Въз основа на експерименти и разследвания на реални инциденти (NIOSH) са въведени стойности на топлинната радиация според въздействието и върху хора и предмети (табл.IV.4).

Таблица IV.4. Въздействие на топлинна радиация за конструкции и хора(NIOSH)

Топлинна радиация [kW/m ²]	Степен на увреждане на сгради и съоразения	Въздействие върху хора
37.5	Непоправими щети по оборудване и конструктивни елементи на сгради	1% смъртност при 10s 100% смъртност при 1min
25	Минимална топлина за възпламеняване на дървен материал и деформация на стоманени конструкции	Сериозни изгаряния при 10sec 100% смъртност при 1min
12.5	Минимална топлина за разтапяне на пластмаси	Минимални изгаряния за 10sec 1% смъртност за 1 минута
4	Счупване на стъкла при продължително излагане	Усещане на болка при 20sec но без увреждания
1.6	Без последици	Без последици

Данните от таблица IV.4 са използвани за очертаване на рисковите коридори успоредно на тръбопровода и по-конкретно в целевия участък клон В4.

Зони на въздействие при Експлозия (VCE или EX)

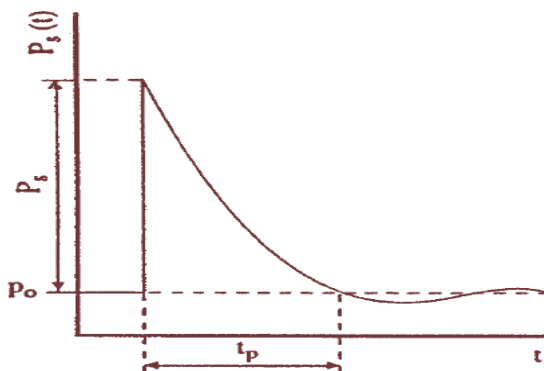
Военната и минната науки от много години изследват разрушаващия потенциал на различни експлозиви. Свързването на взривната енергия с разрушенията и действията на взрива е наложило като метод приваждането на енергийния потенциал на различни експлозиви към този на тротила. Изучаването на проблема, множеството експерименти и разследвания на реални инциденти е довело до създаване на различни

гранични стойности на въздействието на ударната вълна върху хора и предмети(NIOSH) пример за такива е даден в следващата таблица.

Таблица IV.5. Последници за конструкции и хора при експлозия

Надналягане [kPa]	Въздействие на конструкции	Въздействие на хора
6	Счупване на стъкла	Леки наранявания от фрагменти
13	Леки повреди по фасади и покриви на сгради	Наранявания от летящи отломки (стъкла и др.)
20	Частично разрушаване на жилищни сгради	Сериозни наранявания
35	Пълно разрушаване на жилищни сгради	Много тежки наранявания, придружени с летален изход
70	Непоправимо увредени или разрушени стомано-бетонни конструкции	90% смъртност
135	Разрушаване на масивни стомано-бетонни сгради	100% смъртност

Данните от таблица IV.5 са използвани за очертаване на рисковите коридори успоредно на тръбопровода и по-конкретно в целевия участък клон **В4**. Повечето изследвания се правят по въздействието на натиска на удърната вълна върху обекти. Трябва да се обърне внимание, че след преминаването на пика настъпва пад в налягането под нормалното атмосферно, играещ ролята на обратна тяга фиг. IV.8.



Фигура IV.8. Профил на експлозия

На база на прегледа на различните модели е предложена следната методологическа последователност за пълна количествена оценка на риска:

- A. *Определяне на потенциалните причини за настъпване на аварии - на база на исторически и статистически данни;*
- B. *Определяне на честотата на настъпване на аварии по газопреносната инфраструктура;*
- C. *Определяне и дефиниране на вредоносните събития (сценарии) при настъпване на авария;*
- D. *Определяне и дефиниране на мащаба на нарушенията при авария;*
- E. *Определяне на условните вероятности за реализиране на вредоносно събитие - чрез Теоремата на Бейс;*
- F. *Избор на метод за математическото моделиране на последиците от вредоносните събития(сценарии);*
- G. *Определяне на зоните на въздействие на вредоносните събития (сценарии), чрез пробит функции;*
- H. *Пълна количествена оценка на хуманния и социален риск като произведение от вероятността за настъпване на авария умножена по последиците от тази авария;*
- I. *Оценка на надеждността на спомагателните съоразжения чрез определяне Коефициента на опасност.*

V. ВЕРИФИКАЦИЯ НА ПРЕДЛОЖЕНИТЕ МЕТОДИ ЗА АНАЛИЗ И ОЦЕНКА НА РИСКОВЕТЕ В РАЗЛИЧНИТЕ ФАЗИ ОТ РЕАЛИЗИРАНЕТО НА ИНТЕРКОНЕКТОРНА ВРЪЗКА БЪЛГАРИЯ - ГЪРЦИЯ

Методологията предложена в този труд може да бъде разделена на три основни етапа: избор на достоверна честота за настъпване на събитията, избор на подходящ метод за моделиране на събитията и избор на подходящ метод за оценка на риска. Във въвеждащата част на този труд се дават основните общи характеристики на опасностите, свързани с преноса на природен газ, и различните анализи които се правят при реализирането на проекти от такъв тип. На основата на логически разсъждения и данни в литературата са дефинирани основните сценарии, свързани с неконтролираното изтичане на природен газ. Оценена е очакваната честота на поява на аварийните събития, които могат да причинят неконтролирано изтичане на газа и вероятността за запалване и развитие на горенето на природния газ в секторът с най-голямо количество гориво. В тази част верифицираме резултатите от описната методика за актуален реален проект.

V.1. ХАРАКТЕРИСТИКА НА ПРОЕКТА - ОБЕКТА НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Газопроводът IGB ще бъде свързан с гръцката национална газопреносна система в района на Комотини и с Българската национална газопреносна система в района на Стара Загора. Планираната дължина на тръбопровода е 182 км, диаметърът на тръбопровода ще бъде 32" (813mm) а прогнозираният капацитет ще бъде до 3 милиарда кубични метра на година в посока от Гърция към България.

V.1.1. Параметри на съоръжението

В таблица V.1 са показани всички параметри на тръбопровода като - дължина на трасето, работно налягане, диаметър на тръбата (външен и вътрешен), дебелина на стената, материалът от който е произведена тръбата. Тръбопроводите транспортиращи природен газ под високо налягане се характеризират с разпределение на риска в линейни коридори, а локалните обекти като – кранови възли, компресорни станции и други наземни съоръжения със радиално разпределение на коридорите на риска.

Тръбопроводът може да бъде разделен на участъци (сектори) от локалните съоръжения или от зони с еднакви нива на риск. Зонирането прави оценката на риска по – лесна поради сходството в разглежданите сектори.

Табл. V.1. Технически характеристики на съоръжението

Характеристика	Проектна стойност	Дименсия
Степен на експлоатация	100	%
Диаметър на тръбата [NB ¹]	800	mm
Външен диаметър	819	mm
Дебелина на стената	9.5	mm
Минимална дължина на тръбата	12	m
Материал	L450 ME	стомана
Дължина на трасето	182.6	Km
Проектно налягане	8	MPa
Работно налягане	7.5	MPa
Максимално инцидентно налягане	8.25	MPa
Дълбочина на полагане	2 500	mm
Минимална дълбочина на земното покритие	1 000	mm
Брой отсекатели	7	брой
Брой компресорни станции	2	брой
Брой автоматични газоразпределителни станции	2	брой
Брой камери за поддръжка и инспекция	2	брой

¹NB – nominal bore (вътрешен диаметър)

Обект на изследването е част от трасето, в която при евентуална авария ще настъпи най-голямо изтичане. При задействане на отсекателните кранове в аварийния участък се заключва определено количество газ под налягане. От този момент аварийният клон може да бъде разглеждан като съд под налягане с ограничен (между двата отсекатели) обем. Този обем на газа ще бъде най-голям в най-дългият изолиран участък от преносния газопровод.

Разглежда се съоръжението и съответните зони на влияние върху чувствителните обекти в близост до тръбата. В табл.V.2 са представени данните за тези участъци:

- Трасето е разделено на 8 линейни клона с обща дължина 182,6 km. Най-дългият от тях е клон **B4** с дължина 29 200 m.
- Ортогоналното разстояние от клона до най-близкия защитаван обект (населено място) е 225 m.
- Броят на жителите в защитавания обект е 311 души, а площта на населеното място 19 306 km².
- Плътността на населението се изчислява като брой жители на квадратен километър. При изчисленията се отчита 24 часово присъствие и 365 дни в годината на населението в защитавания обект.

Таблица V.2. Линейни участъци и населени места

Данни за населението в най-близките до съоръжението чувствителни обекти					
Клон	Дължина [m]	Ортогонално отстояние до най-близкото населено място [m]	Население [брой жители]	Площ на населено място [km ²]	Плътност [жители/km ²]
B1	27 850	200	1295	32,358	40,02
B2	28 958	200	254	11,419	22,24
B3	24 828	264	440	34,597	12,72
B4	29 200	225	311	19,306	16,11
B5	17 500	201	305	11,874	25,69
B6	14 600	278	932	42,945	21,70
B7	18 275	218	3799	68,515	55,45
B8	21 305	231	169	22,609	7,47

При симулиране на авария са необходими данни за температура, влажност, атмосферно налягане, скорост и посока на въздушните течения, температура на почвата на нивото на тръбопровода. При симулациите се избират най-тежките метеорологични условия представени в таблица V.3. Данните за класовете на стабилност на атмосферата и скоростта на вятъра при която се моделират аварийни изтичания в аспект на оценка на последствията са приети в съответствие с препоръките на US EPA от 1996 г. както следва (Terns, 1991):

клас D-5 m/s (D5)

клас F-1.5 m/s (F1.5)

Таблица V.3. Метеорологични условия

П а р а м е т ъ р	Дименсия	Най-неблагоприятни условия при изтичане
Скорост на вятъра	m/s	1,5
Стабилност на атмосферата	клас	F
Относителна влажност	%	60
Температура на въздуха	deg.C	+42.5
Атмосферно налягане	Pa	100 322

V.1.2. Определяне на размера на отвора и дебита на изтичане

Източникът на данните за предходни събития използвани за определяне честотата на аварияте, класифицира изтичането на газа през три вида нарушения в зависимост от техния размер (EGIG, 2019):

- **ПРОБИВ** – диаметър на отвора по-малък от 2 cm. ;
- **ОТВОР** – диаметър на отвора по-голям от 2 cm и по-малък или равен на диаметъра на тръбата;
- **РАЗКЪСВАНЕ** – размера на отвора е по-голям от диаметъра на тръбата.

За получаване на по-точни данни относно изтичането през различните видове нарушения са направени следните апроксимации:

- **ПРОБИВ** – диаметър на отвора $1/40$ от номиналния диаметър DN на тръбата и по-малък или равен на $1/4$ от диаметъра на тръбата;
- **ОТВОР** – диаметър на отвора по-голям от $1/4$ от номиналния диаметър DN на тръбата по-малък или равен на номиналния диаметър на тръбата;
- **РАЗКЪСВАНЕ** – диаметъра на отвора по-голям от диаметъра DN на тръбата.

След направените пояснения всички изтичания на тръбопровода се моделират със следните размери на нарушенията:

- **ПРОБИВ** – $\varnothing d$ на отвора от 2 cm до 20 cm;
- **ОТВОР** – $\varnothing d$ на отвора от 20 cm до 80 cm;
- **РАЗКЪСВАНЕ** – $\varnothing d$ на отвора > 80 cm.

В част IV.1 е обяснена методологията за изчисляване на дебита на изтичане през различните видове нарушение.

При неочакван спад на налягането аварирания участък от газопровода се изолира с кранови отсекатели по неговите граници. Количеството на заключен газ в аварирания участък на проектния тръбопровод зависи от дължината и работното налягане в съоръжението. Данните от изчисленията за обема на природния газ във всеки от осемте клона на тръбопровода са представени в таблица V.4.

Таблица V.4. Количество газ в клоновете

Количество газ в тръбопровод с номинален диаметър DN 800mm				
Клон	Дължина [m]	Обем [m ³]	Количество газ в клона при 1barg [kg]	Количество на газа при работно налягане 75 barg [kg]
B1	27850	14000,2	9758,1	731860,2
B2	28958	14557,2	10146,4	760976,9
B3	24828	12481,0	8699,3	652446,1
B4	29200	14678,8	10231,2	767336,4
B5	17500	8797,3	6131,7	459876,2
B6	14600	7339,4	5115,6	383668,2
B7	18275	9186,8	6403,2	480242,2
B8	21305	10710,0	7464,9	559866,5

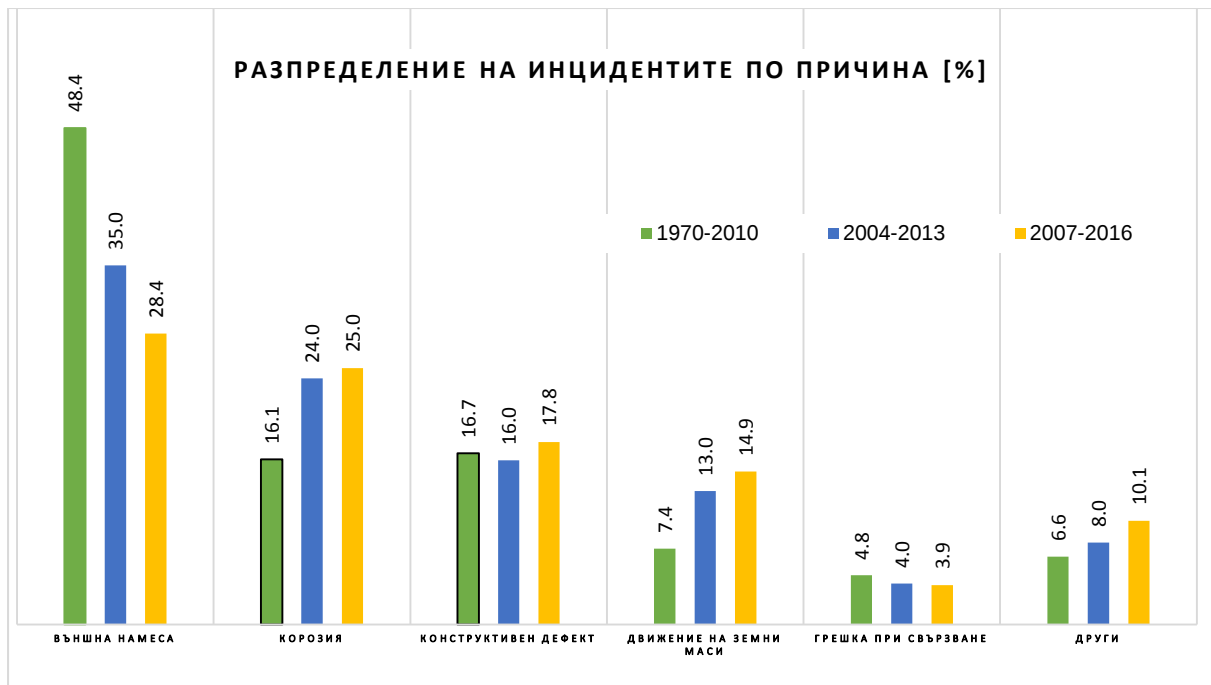
V.2. СИСТЕМАТИЗИРАНЕ НА АКТУАЛНА СТАТИСТИЧЕСКА ИНФОРМАЦИЯ ЗА ИЗСЛЕДВАНИЯ ОБЕКТ

Налагането на природния газ като евтин и чист източник на енергия, газоразпределителните компании непрекъснато да увеличават дължината и капацитета на газопроводите си. Естествено водещите икономически сили имат най-развитата газопреносна мрежа състояща се от хиляди километри тръбопроводи. Основен източник на информация за състоянието и надеждността на тези съоръжения са данните за предходни инциденти.

V.2.1. Дефиниране на причините и адаптиране на данните към обекта на изследване

Министерството на транспорта в САЩ събира информация, чрез своя контролен орган PHMSA(Pipeline and Hazardous Material Safety Administration). Според данните публикувани в техният доклад в страната дължината на магистралните (транзитни) газопроводи е над 480 000 км в САЩ и 78 000 км в Канада (Chio Lam, 2015). От своя страна EGIG (European Gas Pipeline Incident Data Group) поддържа и актуализира информация от 17 газопреносни компании и 142 794 км тръбопроводи в Европа (10th Report EGIG, 2019). Европейската база данни разграничава 6 групи причинители на аварии (Фиг. V.5):

- **Външна намеса** – прилагане на сила по външната част на тръбопровода в резултата на което настъпва мигновено неконтролирано изтичане на природен газ или нанасяне на щета по покритието и тръбата което да се развие до изтичане в последствие. Най-често такива щети са причинявани при изкопни дейности, земни работи и насипи.
- **Корозия** – това е електрохимичен процес който разгражда металният тръбопровод, като постепенно намалява дебелината на стената докато се стигне до изтичане. Този процес може да протича от вътрешната и от външната част на тръбата и е подробно обяснен в част I.5.
- **Дефект** – тази група включва не само фабрични дефекти, но и тези които са резултат от неправилно изпълнение при строителството.
- **Грешка при свързване под налягане** – резултат на грешни процедури или лошо изпълнение на свързването;
- **Движение на земни маси** - свлачища, наводнения, реки, ерозия, минна дейност и земетресения, способни да нарушат целостта на тръбопровода;
- **Други причини** – към тази група спадат всички неизяснени причини и такива които не попадат в предходните групи, включително от разтоварване на атмосферно пренапрежение (мълнии).



Фигура V.5. Разпределение на инцидентите по причина

V.2.2. Разпределение на причините по ЧЕСТОТА

EGIG дава средна честота за настъпване на аварии от $1,5E-10^{-4}$ за периода от 2007 до 2016 година при експозиция от $1,39E-10^6$ km*year тръбопроводи на сушата. PHMSA от своя страна за периода от 2010-2019г при експозиция от $2,26E-10^5$ км транспортни газопроводи на сушата докладва честота от $2,7E-10^{-5}$ събития за km*year. Данните използвани за верификацията са от последният доклад на Европейската база данни за инциденти с газопроводи, като изборът на информацията се базира не само на фактът, че сме страна членка на съюза, но и изключително подробната информация изложена в доклада.

Първичната честота на аварийите по преносните газопроводи се изчислява като, брой инциденти за определен период, разделен на общата дължина функциониращи газопроводи за същия период. Тази относителна честота за настъпили събития е дадена в таблица V.6.

Таблица V.6. Честота на инцидентите

Период	Брой години	Брой инциденти [N]	Експозиция [km.yr]	Честота [N/1000 km.yr]	95% LL	95% UL
1970-2007	38	1173	3150000	0,372	0,351	0,394
1970-2010	41	1249	3550000	0,351	0,333	0,372
1970-2013	44	1309	3980000	0,329	0,311	0,347
1970-2016	47	1366	4410000	0,310	0,294	0,327
1977-2016	40	1143	4120000	0,278	0,262	0,294
1987-2016	30	723	3440000	0,210	0,195	0,226
1997-2016	20	418	2530000	0,165	0,150	0,182
2007-2016	10	208	1390000	0,150	0,130	0,172
2012-2016	5	97	720000	0,136	0,110	0,165
СРЕДНО				0.255	0.237	0.275

LL – Lower level (Долен доверителен интервал)

UL – Upper level (Горен доверителен интервал)

От гледна точка на безопасността, за първична честота е избрана средната честота от всички честоти по периоди при горен 95% доверителен интервал по следната зависимост:

$$F = AVERAGE(95\% UL) = 2.754E - 04 \quad (V.2)$$

Вторичната честота на нарушенията се определя от техническите спецификации: дебелина на стената, диаметър, дълбочина на полагане

на тръбопровода и др. В оценката на риска е използвана първичната честота от гледна точка на представителността на статистическите данни.

V.2.3. Вероятност за изтичане през различните нарушения

Прилагайки теоремата на Бейс (Philips, 1974) в дадения случай, може да се изчисли условната вероятност за реализация на всеки един от сценариите, да се построят дървета на събитията и да се определи относителната честота на сценариите на развитие на аварии до крайни последици по следната зависимост:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) * P(A)}{P(B)} \quad (V.3)$$

където: P (A) - вероятност за настъпване на събитието A;

P (A|B) – условна вероятност за настъпване на събитието A при положение, че събитието B е настъпило;

P (B|A) – Условна вероятност за настъпване на B при положение, че A е настъпило;

P (B) – вероятност за настъпване на събитието B

V.2.4. Условни вероятности за реализиране на крайни сценарии

За периода от 1970-2016 само 5% от регистрираните инциденти са приключили с възпламеняване на изтичащия газ. Информацията за възпламеняването на настъпилите изтичания от Европейската база данни е представена в табл. V.7.

Таблица V.7. Честоота на запалване

Вид нарушение	Процент на възпламенените изтичания
Пробив	4,5
Отвор	2,2
Разкъсване(всички)	14,4
Разкъсване ≤ 16"	10,0
Разкъсване ≥ 16"	42,3

Всяко развитие (сценарий) на аварийното изтичане довежда до различно по вероятност и последици крайно аварийно събитие – различни форми

на горене или дисперсия. Всички възможни развития на изтичането са изброени като са показани и съкращенията им:

- **Ех** – експлозия (**Explosion**). Бързо горене (дефлаграция или детонация) което създава значително надналягане способно да нанесе материални щети и да застраши живота. Много често след експлозия газът продължава да гори факелно (JF);
- **JF** – факелно горене (**Jet Fire**). Това е горене в газовата струя, ограничено от границите на възпламеняване на газа, т.е. от смесването му с въздуха, който струята ежектира при изтичането си от нарушението на тръбопровода;
- **FF** или **VCF** – дефлаграционно горене (**Flash Fire or Vapor Cloud Fire**) в неограничен газов облак, който създава ограничено надналягане за кратко време. Възниква в среда, където горимия газ и въздуха образуват горима газо-въздушна смес. Фронта на пламъка се движи бързо в горимата смес и се ускорява, но не достига скоростта на звука. Сравнено с експлозията горенето е толкова бавно, че изгарящия газ се разширява преди запалването и не може да формира на открито въздушно удърна вълна, с енергия достатъчна да причини щети;
- **DISP** – дисперсия (**Dispersion**) или разпространение на газа, без запалване .
- **VCE** - експлозия на пари в облака (**Vapor Cloud Explosion**);

V.3. ОЦЕНКА НА РИСКА В ЦЕЛЕВИЯ УЧАСТЪК ОТ ИНТЕРКОНЕКТОРНА ВРЪЗКА БЪЛГАРИЯ – ГЪРЦИЯ

V.3.1. Определяне вероятността за летален изход

Обобщените данни за вероятността на различните сценарии (фиг.V.15), с дименсия $[km^{-1}yr^{-1}]$ са представени в табл.V.8. Всички стойности са от последният десети доклад на EGIG, отразяващ най-съвременната статистическа информация по темата.

Таблица. V.8. Вероятност за реализиране на събитие

Вероятност	Означение	Пробив	Отвор	Разкъсване	Сума
За Нарушение:	P_{LEAK}	1.83E-04	6.28E-05	2.97E-05	2.75E-04
Дисперсия	P_{DISP}	1.22E-04	3.22E-05	5.09E-06	1.60E-04
Запалване:	P_{IGN}	6.06E-05	3.06E-05	2.47E-05	1.16E-04
Веднага	P_{IM}	8.23E-06	1.38E-06	4.28E-06	1.39E-05
По-късно	P_{LATER}	5.24E-05	2.92E-05	2.04E-05	1.02E-04
Експлозия:	$P_{EXPLOSION}$	1.65E-07	1.66E-07	3.73E-06	4.06E-06
Близка	P_{EX}	1.65E-07		1.28E-06	1.45E-06
VCE	P_{VCE}		1.66E-07	2.44E-06	2.61E-06
Пожар:	P_{FIRE}	6.05E-05	3.04E-05	2.09E-05	1.12E-04
Факелно горене	P_{JF}	5.10E-05	2.75E-05	2.09E-05	9.94E-05
Ускорено горене	P_{FF}	9.50E-06	2.92E-06		1.24E-05

Моделиране на потенциалните опасности, които се създават при предполагаемо реализиране на дадено вредоносно събитие по един от описаните сценарии (част IV.4), и оценката на степента на въздействие върху засегнатите зони, съоръжения и хора преминава през следните общи процедури:

Изчисляване на параметрите на опасността – количество отделени вредности q $[kg/s]$ и TNT еквивалент], топлинна (инфрачервена) радиация I $[kW/m^2]$, свръхналягане, причинено от въздушно-ударна вълна при експлозия P_m $[Pa]$, разпространение на отделените газови продукти при пожар или при изтичане на природен газ (концентрация на земната повърхност или в места за наблюдение) C $[ppm]$, разпространение на пламъка при дефлаграционно (ускорено) горене, експлозия във формирания газов облак (VCE);

- Вероятностен подход за трансформиране на тези физически характеристики в степен на опасност и след това в риск за хора (индивидуален и/или колективен), за сгради и за съоръжения.

Изчисляването на параметрите на опасността се базира на специфични математически и компютърни модели, представени подробно в част IV, които съответстват на физическата същност на реализираното събитие. Подробно процедури са представени в RIFREN, 2008.

Вероятностният подход за оценка на последиците (Spicer and Havens, 1985) ползва изчисленията при математическото моделиране параметри на разпространение на опасността. Чрез него се определя вероятността за обратими или необратими увреждания на засегнатите обекти. Съществената разлика от консервативните модели е непрекъснатостта на функцията с която се определя тежестта на последиците. Такава възможност отсъства при повечето консервативни модели, работещи с понятието „безопасно разстояние“. Вероятностният подход има обща методология при изчисляване на вероятностите, като за всяка опасност са изведените конкретни корелационни зависимости. Последователно към всеки модел са представени и конкретните коефициенти на корелационните зависимости.

Критерият за фатален изход (L-lethal) се представя чрез понятието натоварване, еквивалентно по смисъл на получена доза вредност (Jagger and O'Sullivan, 2004) която в зависимост от вида се определя по зависимостите:

- при разсейване на токсични газове
$$L = \int [C(t)]^n dt \quad (V.4)$$

- при топлинна радиация
$$L = \frac{1}{10^4} \int I^4 dt \quad (V.5)$$

- при експлозия (реализиране на свръхналягане)
$$L = P_m \quad (V.6)$$

където : C – концентрация [ppm];

I – интензивност на топлинната радиация [W/m²];

P_m – свръхналягане на пика (m) на вълната [Pa].

Интегрирането се извършва за времето на експозицията, представляващо разликата между времето за отминаване и времето за пристигане на фронта на въздействие върху хората или върху материалната среда.

Получената доза вредност (L) се използва за определяне на „Пробит“ (Probit – probability unit) функцията, както следва:

$$Pr = A + B_x \ln L \quad (V.7)$$

където: A и B са специфични пробит коефициенти, зависещи от вида на въздействието.

Степенният показател n , участващ в изразите за разсейване на токсични газове, зависи от конкретния газ, предизвикващ токсичното натоварване.

За въздействието на надналягането върху хора и обекти се използват зависимостите:

$$\text{за фатален изход при хора } Pr = -77.1 + 6.91 \times \ln Pm \quad (V.8a)$$

$$\text{за увреждане на слуха } Pr = -12.6 + 1.5 \times \ln Pm \quad (V.8б)$$

$$\text{за сгради и съоръжения } Pr = -23.8 + 2.92 \times \ln Pm \quad (V.8в)$$

$$\text{за счупване на стъкла } Pr = 0.796 + 3.356 \times \ln Pm \quad (V.8г)$$

Топлинната радиация, по-точно нейната опасност се дефинира във вероятностни единици както следва:

$$\text{за топлинна радиация } Pr = -14.9 + 2.56 \times \ln \left(\frac{t^{\frac{4}{13}}}{10^4} \right) \quad (V.8д)$$

Probit функцията дава възможност да се изчисли очаквания процент на смъртност от дадено вредоносно събитие при различна експозицията по зависимостта:

$$P_f = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{Pr-5}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (V.9)$$

Специално за въздействието върху хора е дефинирана връзката между стойността на пробит функцията и процента на смъртност (P_f), **както следва**:

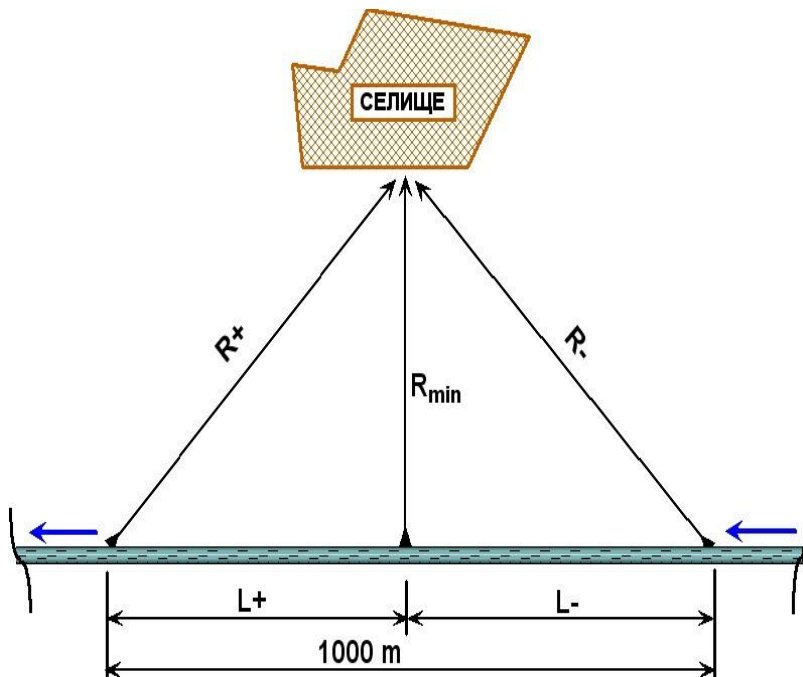
- при $P_r = 2.67 \rightarrow P_f = 1\%$;
- при $P_r = 5 \rightarrow P_f = 50\%$;
- при $P_r = 7.33 \rightarrow P_f = 99\%$.

Тези стойности участват в прогнозата на индивидуалния и социален (колективен) риск обобщени в таблици V.9 и V.10.

Линейният характер на риска, изисква различен подход от случаите, когато източника на риска е съсредоточен и диференциран. Анализът и калкулирането на риска се провежда след разделяне на целевия участък от газопровода на сектори с дължина един километър. В участъка около разглежданият обект ортогоналното разстояние между тръбопровода и населеното място е **$R_{\min} = 225m$** .

При това разделяне на сектори вероятността за нарушение (разкъсване, отвор или пробив) на тръбопровода съответства на дадената в първия ред на таблица

V.8 и на дървото на сценариите на фиг. V.14. За разстояние от сектора до най-близко разположения защитаван обект е прието минималното разстояние R_{min} , ортогонално на тръбопровода, както е показано на фиг. V.20. Всички други места, където може да стане нарушение в еднокилметровия сектор са на разстояние по-голямо ($R+$, $R-$) от минималното.



Фигура V.20. Схема на отстоянието от тръбопровода до защитавания обект

Обобщените данни за най-тежките сценарии са представени в таблица V.9 и V.10 като с R_i е обозначен индивидуалният риск.

Таблица V.9. Разстояние до индивидуалния риск при Факелен пожар (JF)

Разстояние до индивидуалния риск при факелен пожар [JF]								
Отвор $d = 20\text{cm}$	R_i	1.0	0.5	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-04	1.0E-05	1.0E-06
	R_{min}	85	130	181	201	220	237	254
Разкъсване $d = 80\text{cm}$	R_i	1.0	0.5	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-04	1.0E-05	1.0E-06
	R_{min}	190	309	427	476	520	562	601

Таблица V.10. Разстояние до индивидуалния риск при Експлозия (EX)

Разстояние до индивидуалния риск при Експлозия [VCE]								
Отвор d = 20cm	Ri	1.00	0.50	1.00E-2	1.00E-3	1.00E-4	1.00E-5	1.00E-6
	Rmin	10	23	27	29	30	31	32
Разкъсване d = 80cm	Ri	1.00	0.50	1.00E-2	1.00E-3	1.00E-4	1.00E-5	1.00E-6
	Rmin	35	41	49	52	55	57	58

V.3.2. Индивидуален риск

Въпреки методологичните различия във формулировката на критериите за стандартизиране на индивидуалния риск, съществува единна директива на ЕС (Seveso-2) за управление на безопасността на химическите съоръжения в случай на големи аварии, която се прилага от всяка държава-членка на ЕС. Освен това горната граница (максимално допустимо ниво) на индивидуалния риск за страните от ЕС се приема равна на 1,0E-05 жертви / година.

Чрез вероятността за нарушение на тръбопровода и вероятността за фатален изход на съответното отстояние от него и при условие, че за жителите на населеното място е прието да бъдат изложени на опасността 365 дни в годината по 24 часа в денонощие, по следната зависимост е изчислен индивидуалният риск:

$$R_i = P_i \times C_i \times E_i \left[\frac{\text{последници}}{\text{човек} \times \text{година}} \right] \quad (V.10)$$

където: P_i – вероятност за вредоносно събитие [събитие/година];

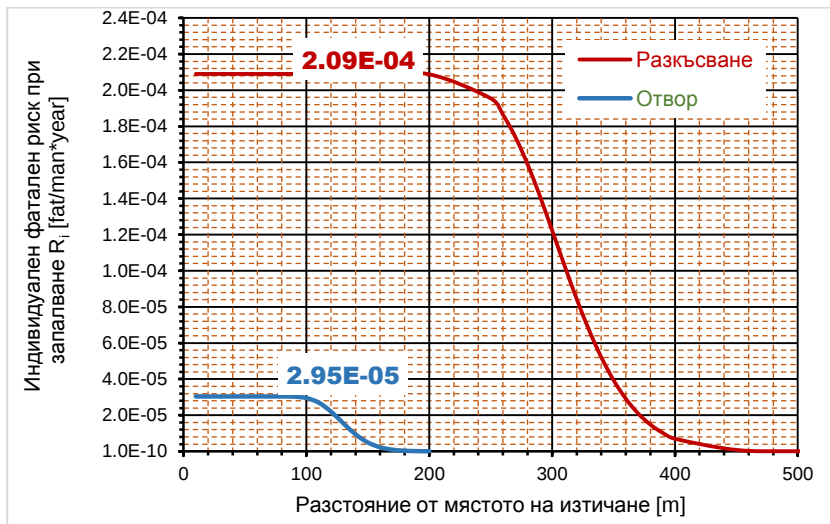
C_i – последици от събитието $\left[\frac{\text{последници}}{\text{събитие}} \right]$;

E_i – експозиция $\left[\frac{\text{часа} / \text{на човек за година}}{\text{часа в година}} \right] \equiv \text{човек}^{-1}$

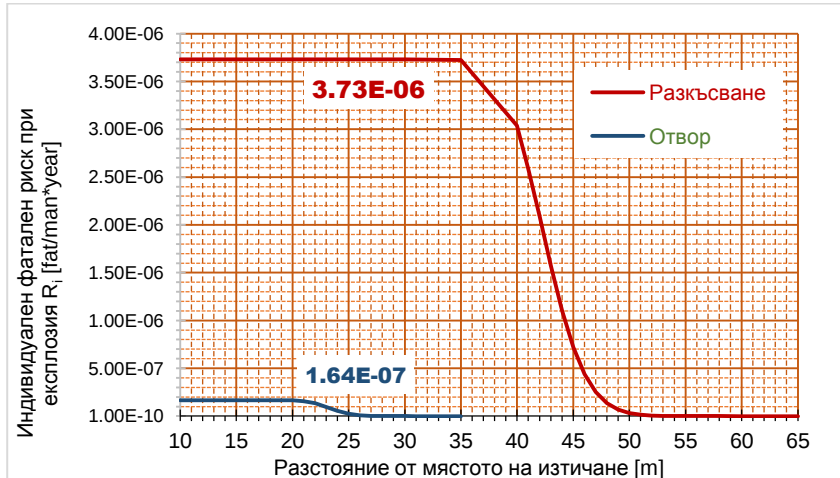
При изчислението на фаталните рискове от пожари и експлозии, описаните сценарии са групирани, както следва:

- ⇒ Във вероятността за **пожар** са включени всички запалвания на газа при които не произтича експлозия, като последиците са оценени от разпространението на фаталната вероятност за най-тежкия случай – факелно горене фиг. V.21
- ⇒ Във вероятността за **експлозия** са включени експлозии до мястото на изтичането и във факела, като за вероятността от фатален изход е приета, тази която се разпространява най-отдалечено от мястото на експлозията – на фиг. V.22.

Изменението на индивидуалния фатален риск R_i при увеличаване на дистанцията, е показано на фигури V.21 и V.22.



Фигура V.21. Индивидуален фатален риск от пожар на природен газ



Фигура V.22. Индивидуален фатален риск при експлозия на природен газ

От данните ясно се вижда, че рискът за населението е в пъти по-голям при пожар отколкото при експлозия. Разликите в разпределението между различните

нарушения е драстично. При нарушение отвор границите на опасните зони са в порядък по-малки от тези при разкъсване.

V.3.3. Социален (обществен) риск

За изчисляването на социалният(групов) риск е необходимо да се определи експозицията за всеки от живущите в населеното място(обиталище) и вероятността за присъствие на хора в засегнатите зони.

Таблица V.11. Плътност на населението в засегнатите зони

Засегната зона в	Площ [km ²]	Плътност на населението в населеното място [човека/km ²]	Плътност на населението в засегнатата зона
Населено място	0.10	16.1	1.73
Обработваема земя	0.32	0.3	0.09
Общо	0.43		

Социалният риск R_s ще бъде произведение от индивидуалния риск R_I и плътността на населението D_p в засегнатата зона:

$$R_s = R_I \times D_p \quad (V.11)$$

Приемайки че жителите на засегнатите зони пребивават 24 часа в денонощието и 365 дни в годината е изчислен социалният(групов риск) табл.V.12.

Таблица V.12. Социален риск R_s в засегнатите зони

Засегната зона	Отстояние от нарушението и процент смъртност		
	R_s 225m	R_s 310m	R_s 370m
Населено място	3.56E-04	1.78E-04	3.63E-05
Обработваема земя	1.99E-05	9.97E-06	6.30E-06

Разликите в разглежданите рискови показатели (индивидуален R_I и колективен R_s) могат да бъдат пояснени със следния пример. Близко до източника на постоянна опасност е къща от населено място, в която през работния ден има домакиня с две деца, а през останалата част от денонощието още трима възрастни. Потенциалният риск на територията (в този случай помещенията на къщата) ще се определя от степента на опасност във всяко от тях, да предположим, че той е един и същ. Индивидуалният риск не зависи от броя на присъстващите в сградата и ще бъде еднакъв за всеки от живущите. Колективният риск за определен период от време (например една година) за домакинята с децата и работещите възрастни ще се различава значително, поради разликите в максималната очаквана експозиция на опасността върху всеки човек по отделно.

V.4. ИНЖЕНЕРНО–ТЕХНИЧЕСКИ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ЗА МИНИМИЗИРАНЕ НА РИСКА

Управлението на риска при аварии в газопреносната мрежа се свежда до решаването на един основен проблем, а именно превръщането на неконтролиран процес, като изтичането на природен газ в контролиран. Механизъм или друго решение на този проблем би довело до значително смекчаване (редуциране) на риска. Събитието неконтролирано изтичане на природен газ се разделя на три последователни фази:

- Фаза на откриване в аварирания участък;
- Фаза на сработване (затваряне) на отсекателните кранове, наричани обичайно „отсекатели“ или „арматури“ на аварирания участък;
- Фаза на изтичане на газа от тръбопровода в мястото на нарушението, между отсекателите наричани обичайно „клон“ или „сектор“ на тръбопровода.

Фазата на откриване на аварията е ключов момент за навременното сработване на отсекателните кранове и за ограничаване на колбичеството на аварийно изтеклия газ.

Първите две фази се контролират от системата за контрол и мониторинг (SCADA) на съоръжението, докато третата е неконтролирана. Отсекателните кранове или така наречените арматури се монтират на интервали по тръбопроводите, за да бъде спрян потока на газ при евентуална авария. Местоположенията на класовете са дефинирани в 49 CFR 192.5 в зависимост от сградите (обитателите), както следва.

- Местоположение от **клас 1** е оншорна зона или единица за местоположение, която има 10 или по-малко сгради, предназначени за обитаване от хора.
- Местоположение от **клас 2** е всяко местоположение на клас, което има повече от 10, но по-малко от 46 сгради, предназначени за обитаване от хора.
- Местоположение от **клас 3** е всяко местоположение на клас, което има 46 или повече сгради, предназначени за обитаване от хора; или зона, където тръбопроводът се намира в рамките на 100 м от сграда или външна зона (като детска площадка, зона за отдих, открит театър или друго място за публично събиране), която е заета от 20 или повече лица поне 5 дни в седмицата в продължение на 10 седмици във всеки 12-месечен период(дните и седмиците не е необходимо да са последователни).
- Местоположение от **клас 4** е всяка единица за местоположение на класа, където преобладават сгради с четири или повече етажа над земята.

Предложено е **ново инженерно-техническо решение**, което би повлияло пряко на ефективния дебит Q_{eff} и продължителност на аварийното изтичане в мястото на нарушението. Съоръжението е проста изпускателна система, състояща се от изпускателни тръби, кранове и датчици за налягане, монтирана в непосредствена близост до отсекателите на газопровода. При нарушаване целостта на даден участък, налягането в него се понижава, при което системата

за мониторинг задейства крановете. Ако със задействането на отсекателите се активира и системата за **контролирано изтичане** (фиг.V.25) в засегнатия клон, това би намалило драстично мащаба на аварията. Под термина **контролирано изтичане** се има предвид разтоварването на газа в контролираната сервитутна зона на газопровода. За допълнителна сигурност на изпускателните тръби ще бъде монтиран съд с универсален **АВС** пожарогасителен прах, който да обгърне изтичащата струя в турбулентния граничен слой за да предотврати евентуално запалване от външен източник.

Последователност на процеса:

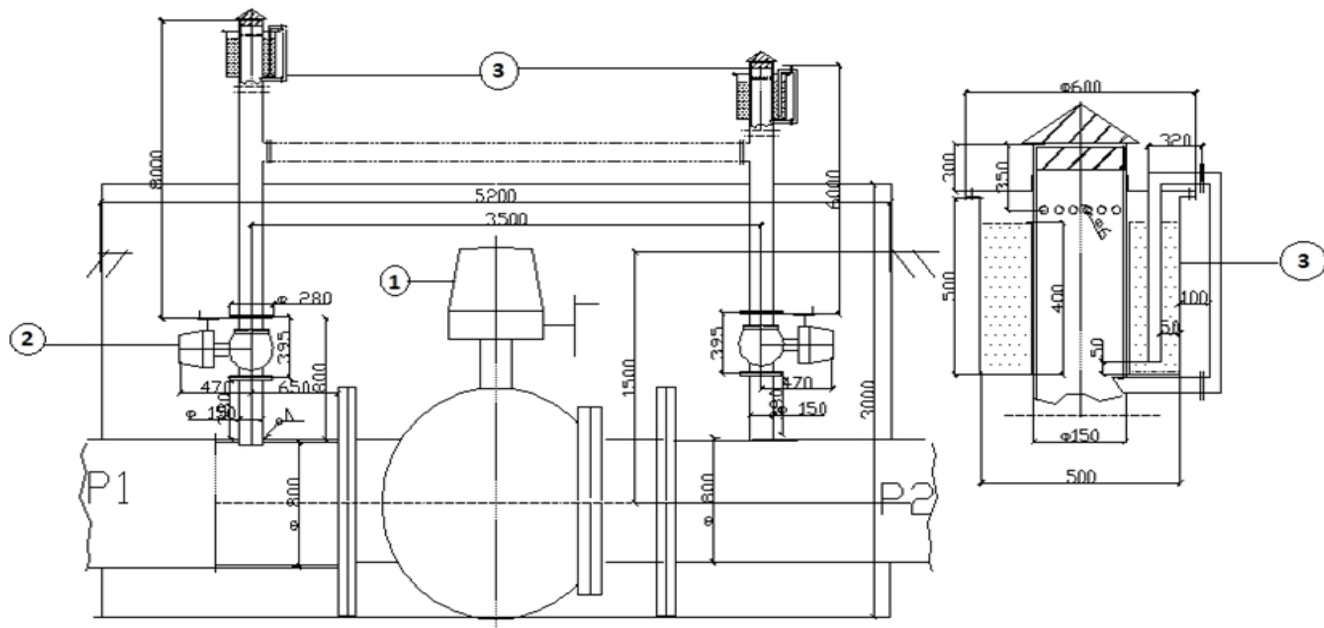
- Откриване на авария – **SCADA**;
- Задействане на отсекателните кранове – **SCADA**;
- Задействане на изпускателните кранове в аварирания участък – **SCADA**;
- Примесване на граничния слой на струята със противопожарен прах – **под действието на налягането в сектора.**

Целта на техническото решение е да се намалят (свят) рисковите зони около мястото на нарушението на газопровода, чрез:

- ⇒ Намаляване на дебита, респективно скоростта, на изтичане на газа в мястото на нарушението;
- ⇒ Намаляване на налягането на газа през периода на изтичане от нарушението;
- ⇒ Намаляване на времето за изтичане на газа в мястото на нарушението, което съкращава времето на опасното събитие;
- ⇒ Намаляване на обема на газа, който изтича от нарушението.

Тези ефекти се постигат, като се модифицира тръбопровода в областта на отсекателните кранове

Така, чрез контролирани изтичания се намалява опасността в мястото на неконтролираното аварийно изтичане на газа..



Фигура V.25. Система за контролирано разтоварване на газопровод в аварийен режим

Легенда: 1-отсекателен кран; 2-изпускателни кранове; 3-устройство за насищане на граничния слой на струята с пожарогасителен прах.

Хипотетично при гъстота на населението и отстояние на тръбопровода показани в таблица V.13 и фигура V.23, дължината на клона в целевият участък ще бъде 7 km според 49 CFR 192.5 стандарт за секциониране на газопроводи.

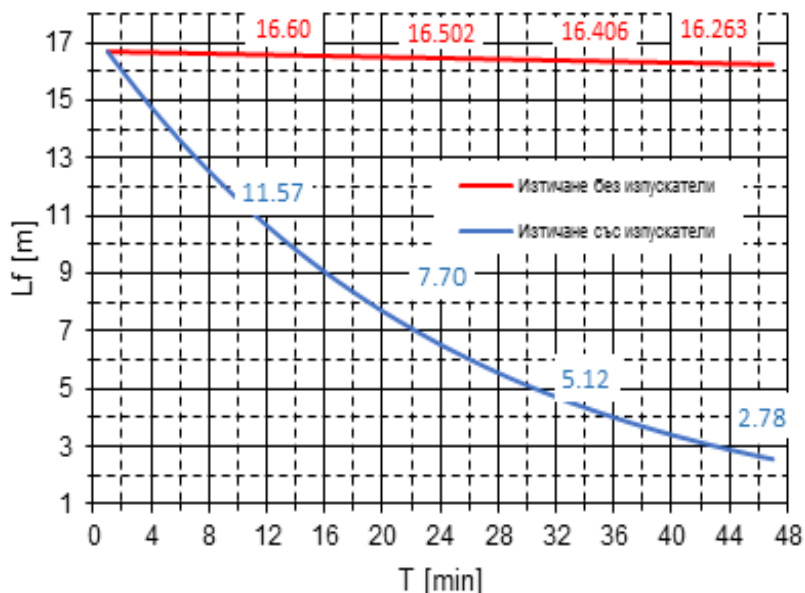
За да покажем ефекта от това устройство ще моделираме изтичането със и без изпускателната система като методиката използвана тук е същата както в част IV.1.

Последователност на моделирането:

- Определяне обема на газа в аварирания участък;
- Определяне на продължителността и размера на вредоносното събитие без система за контролирано изтичане;
- Определяне на продължителността и размера на вредоносното събитие със система за контролирано изтичане;

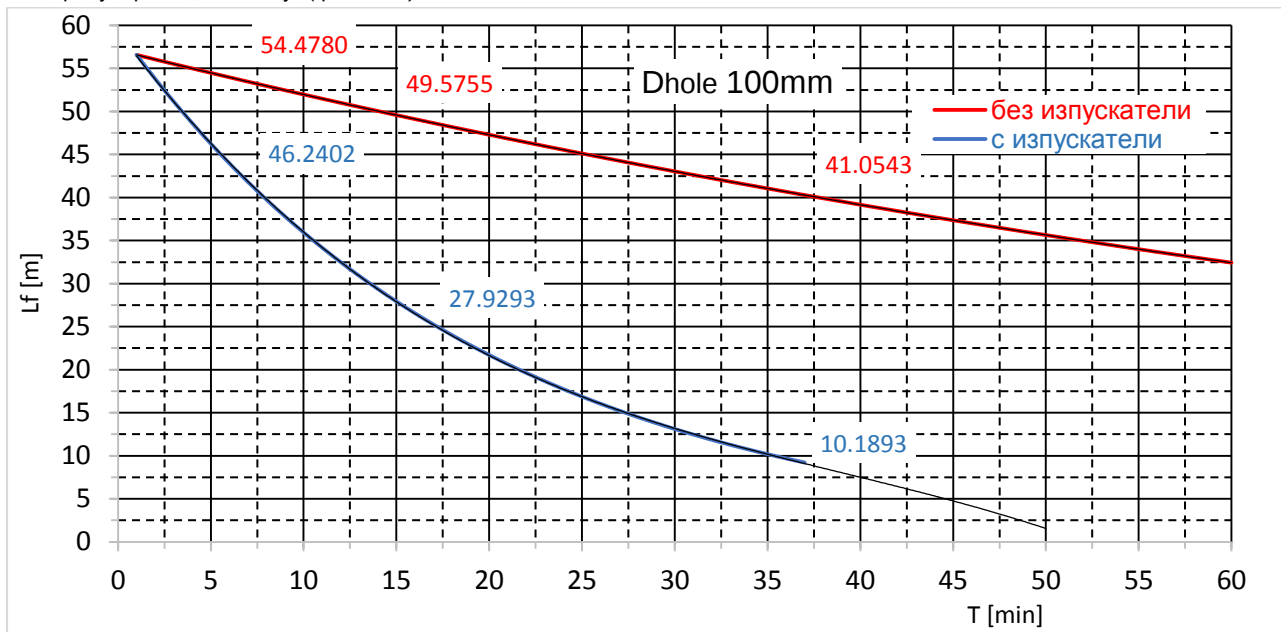
При графичното изобразяване на резултатите е използвана основна характеристика на вредоносното събитие с най – тежки последици. Според оценката на риска това е факелен пожар, а височината на пламъка L_f характеризира зоната му на вредно въздействие(зависимост IV.26).

При нарушение 25mm и изпускатели с размер 150mm в двата края на аварирания участък, и при приета дължина в следствие на класифицирането на терена през който преминава съоръжението, изтичането с включени изпускатели ще приключи за 47 min (фиг. V.26).



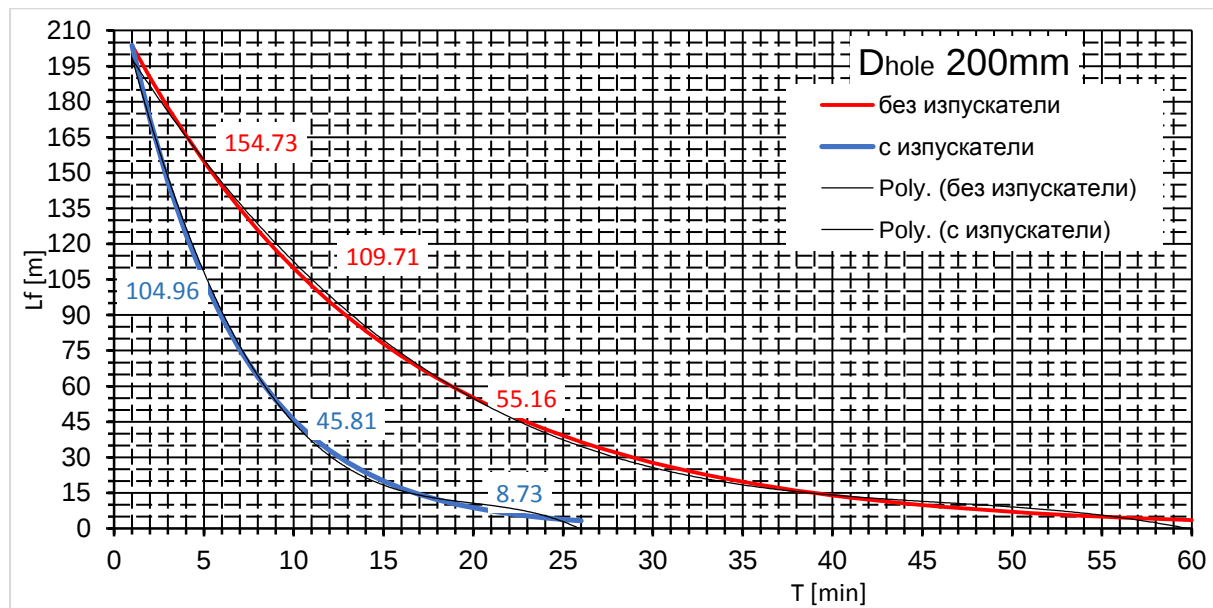
Фигура. V.26. Контролирано изтичане при нарушение $d = 25\text{mm}$

При нарушение 100 mm и включени изпускатели, изтичането ще продължи 37 min, а видимата височина на факела ще бъде редуцирана до минимум (фиг. V.27).



Фигура V.27. Контролирано изтичане при нарушение $d = 100\text{mm}$.

При нарушение отвор $D_h = 200\text{mm}$ резултатът от моделирането показва, че със задействани изпускатели изтичането ще приключи за 26 min (фиг. V.28).



Фигура V.28. Контролирано изтичане при нарушение $d = 200\text{mm}$.

От направеният анализ на изтичането ясно се вижда, че предложеното решение силно намалява големината на неконтролираното изтичане, като намалява мащаба му в пъти, а в резултат от това и зоната в която вредоносното явление би срещнало чувствителен обект. Това изцяло удовлетворява поставената цел, а именно управлението на риска при нарушение на тръбопровода.

ПРИНОСИ

Разработения дисертационен труд допринася за управление на риска на преносните газопроводни мрежи с:

- П.1.** Предложени са адекватни на естествената начална неопределеност и нарастващата детайлна информация методи за анализ на риска във фазите на проект за преносен газопровод от Предпроектно проучване, през Идеен и Технически проект до Експлоатация, включително.
- П-2.** Верифициран е метод за анализ на риска на преносни газопроводи, който отчита индивидуалния (**R_i**) и социален (колективен) **R_s** риск при аварийни събития. Вероятността се моделира със статистически зависимости за честотата на станали аварийните събития по мащаб (големина) на нарушенията, а последиците от всяко събитие се моделират за хората и материална среда в зависимост от отстоянието на преносния газопровод до обекта мишена. Верификацията е направена за участък от реален актуален обект във фаза на проектиране.
- П.3.** Предложен е метод за приоритизиране на рисковете на машините, съоръженията и апаратурата на преносен газопровод.
- П.4.** Предложено е ново оригинално инженерно – техническо решение за управление при аварийно изтичане от преносен газопровод, което намалява с порядък скоростта и продължителността на неконтролирано изтичане на природен газ при авария. Това води до съществено намаляване на хуманния и екологичния риск от изтичането.
- П-5.** Предложена е нова норма за определяне на разстоянието между отсекателите във връзка с решението по принос П-4, която има 4 класа на опасност, както американската норма, но е съобразена с мащабния ефект и резултатите от количествения анализ на рисковете в глава V.3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Независимо от търсенето и бъдещото използване на нови газови и течни горива, тръбният им пренос ще остане най-безопасния и сигурен начин за транспорт, ако се овладеят методите за оценка и управление на риска на тръбната система. Анализа на риска на тези системи изисква и ще изисква непрекъснато планиране, актуализиране и прилагане във фазите на проектирането и експлоатацията. Качеството на анализа на риска зависи от три аспекта:

- ⇒ задълбочено познаване и разбиране на системата с нейните експлоатационни характеристики;
- ⇒ точните входни данни, включително и пирспективни за чувствителните обекти;
- ⇒ адекватното прилагане на методите и софтуера за анализ на риска.

Развитието на диагностична апаратура за състоянието на газопроводите осигурява все по-точни данни. Развитието на софтуера позволява по-детайлно моделиране на спецификата на газопроводите и опита от експлоатацията, включително в аспект на превантивно предупреждение.

Управлението на риска в газовите дейности има ключова роля за осигуряване на приемливото ниво на безопасност за социалната, материалната и околната среда.

ЛИТЕРАТУРА

Сборник с доклади по проект РИФРЕН 'Безопасна работна и околна среда' Издателска къща 'Св. Иван Рилски'. 2008. ISBN: 978-954-353-083-0
10-th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970 – 2016) Doc. number VA 17.R.0395 March 2018.

ASME B318S: Managing Sistem Integrity of Gas Pipelines, 49 CFR 192.903©, ASME 2005.

AIChE Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, Guidelines for Chemical Process, 2000.

Chio Lam, Statistical Analyses of Historical Pipeline Incident Data with Application to the Risk Assessment of Onshore Natural Gas Transmission Pipelines, 2015.

Diana Villafañe*, Rosa Mari Darbra, Joaquim Casal Flash Fire: Historical Analysis and Modeling, Universitat Politècnica de Catalunya Diagonal 647,08028-Barcelona, Spain, 2011

Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosion. Flash Fires. and BLEVEs. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers.NY.1998.

Jagger S., S. O'Sullivan, HSE Science Group: Fire and Explosion Group Human Vulnerability to Thermal Radiation Offshore, HSL, 2004.

Lawrence D. Philips, Bayesian Statistics for Social Scientists, ISBN 0-690-00137-1, 1974, p 37.

Roger Z. Optimization Problems in Natural Gas Transportation Systems, Energy and Infrastructure Analysis Group Los Alamos National Laboratory Los Alamos, NM 87545, USA September 2014.

Spicer T., J. Havens, User's Guide for the Degadis 2.1. Dense Gas Dispersion Model. EPA-450/4-89-019, 1985, pp. 419.

Trenns S.R. and Myhr F.H. Oxides of Nitrogen Emission From Turbulent Jet Flames: Part I – Full Effects and Flame Radiation. Combustion and Flame 87/1991. p.p.319-335.

Публикации:

Д. Добрев, М. Михайлов, „Инциденти при преноса на природен газ“ - JOURNAL OF MINING AND GEOLOGICAL SCIENCES Volume 61 Part I: Geology and Geophysics ISSN 2535-1176, 2018

Д. Добрев, „Оценка на риска във фазите на проект“ - Минно дело и геология ISSN 0861-5713, 2019