

MISKOLCI EGYETEM



GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR

**ROBBANÁS ELLENI VÉDELEMMEL ELLÁTOTT RENDSZEREK
ELMÉLETI, SZIMULÁCIÓS ÉS KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA**

PhD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

KÉSZÍTETTE:

Mikáczó Viktória
okleveles gépészmérnök

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPÉSZETI ALAPTUDOMÁNYOK TÉMATERÜLET
TRANSPORTFOLYAMATOK ÉS GÉPEIK TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ:

Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella
az MTA doktora

TÉMACSOPORT VEZETŐ:

Prof. Dr. Czibere Tibor
az MTA rendes tagja

TÉMAVEZETŐ:

Prof. Dr. Siménfalvi Zoltán
egyetemi tanár

TÁRS-TÉMAVEZETŐ:

Dr. habil. Szepesi L. Gábor
egyetemi docens

Miskolc, 2023

Mikáczó Viktória

ROBBANÁS ELLENI VÉDELEMMEL ELLÁTOTT RENDSZEREK
ELMÉLETI, SZIMULÁCIÓS ÉS KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA

PhD értekezés tézisei

Miskolc, 2023

BÍRÁLÓ BIZOTTSÁG

- Elnök: **Prof. Dr. Bertóti Edgár**
DSc, egyetemi tanár (ME)
- Titkár,
tag: **Dr. Kiss László Péter**
PhD, egyetemi docens (ME)
- Tagok: **Dr. Barna Imre**
PhD, tudományos főmunkatárs (Wigner Fizikai Kutatóközpont)
Dr. Joó Gyula
CSc, nyugalmazott egyetemi docens (ME)

HIVATALOS BÍRÁLÓK

- Dr. Póliska Csaba**
PhD, egyetemi docens (ME)
- Dr. Kun Gábor**
PhD, tanúsítás vezető (ExNB Tanúsító Intézet Kft.)

1. Kutatási feladat

1.1. Bevezetés

Az ipari termelés minden szegmenséből származnak robbanóképes porok [1], valamint különösen nagy veszélyforrást jelentenek azok a létesítmények, amelyekben robbanóképes gázok, ködök vagy hibrid keverékek fordulnak elő. A XX. századtól kezdve számos feljegyzés és esettanulmány készült az ilyen jellegű balesetekkel kapcsolatban. A bekövetkezett eseményekből a megfelelő következtetéseket levonva, napjaink ipari gyakorlatában egyre nagyobb szerepet játszanak a robbanás-biztonságtechnikai intézkedések is. Robbanással járó balesetek bekövetkezésekor egyidejűleg okozhat kárt a kikerülő anyag, a készülékről leszakadó repeszek, a robbanás nyomáshulláma és hőhatása. A rendszerek, készülékek integritásának megóvása tehát nem csak anyagi érdek.

1.2. Célkitűzések

A por- és gázrobbanások fizikai-kémiai háttere rendkívül összetett, a közben lejátszódó jelenségek pedig számos paramétertől függenek. Ezen okból a zárt téri és lefúvatott robbanások szabványi előírásai jellemzően nagyszámú kísérlet eredményeiként álltak elő, és minél szélesebb spektrumot igyekeznek lefedni mind a robbanóképes közegek, mind a geometriai jellemzők (csatorna-kialakítások és készülékgeometriák) terén. Azonban az összefüggések alkalmazási tartományának szélein, például a kisméretű készülékekben bekövetkező zárt téri vagy lefúvatott robbanásokra, esetleg az összetett geometriájú lefúvató csatornákra ezek az összefüggések már pontatlan eredményt szolgáltatnak. Az általam vizsgált kisméretű készülékek mérettartománya előfordul a gyógyszeripari, a vegyipari vagy akár a fűlüzemi kísérleti laboratóriumi alkalmazások körében, amelyek robbanásveszély szempontjából különösen veszélyeztetett területek.

Disszertációm átfogó célja a por- és gázrobbanások jelenségének, feltételrendszerének, körülményeinek és a közben végbemenő fizikai-kémiai folyamatok vizsgálata volt.

Kutatásaim során az egyik célom egy olyan laboratóriumi mérési eljárás kidolgozása volt, amely részöleves gázkeverék esetén alkalmas mind a zárt téri, mind a lefúvatott gázrobbanások közben lejátszódó folyamatok vizsgálatára, a robbanási jellemzők meghatározására és a lefúvató csatornában fellépő nyomásértékek rögzítésére. Ezen mérési eljárás, valamint a témában megszerzett elméleti ismereteim felhasználásával az alábbi elvégzendő feladatokat definiáltam.

- A mérési eredményeim segítségével megvizsgálom az ideális gáz modell alkalmazhatóságát a robbanási nyomás-idő függvény számítására. A modell felhasználásával a robbanási nyomásgörbe kezdeti szakaszának leírását tűzöm ki célul, mivel ez a szakasz jelentős szerepet játszik a lefúvatott robbanások és a lefúvásos védelmi berendezések nyitónyomásának leírásában. Kutatásaim során nem áll szándékomban a robbanási folyamat teljes szimulációja, mindössze olyan eszközként kívánom alkalmazni, amely feltétlenül szükséges a lefúvásos védelemmel kapcsolatos vizsgálatok elvégzéséhez.
- Mérési eredményeim segítségével megvizsgálom, hogy az MSZ EN 14491:2013 és NFPA 68:2018 szabványok lefúvató csatorna alkalmazása mellett megnövekedett redukált nyomásra vonatkozó összefüggései a vizsgált geometriák és gázkeverék-összetételek esetén milyen pontossággal közelítik a mért nyomásmaximum értékeket. Amennyiben szükséges, az MSZ EN 14994:2007 és az NFPA 68:2018 szab-

ványban szereplő összefüggések mintájára kidolgozok egy új összefüggés meghatározására alkalmas eljárást a lefúvató csatorna használata mellett fellépő, megnövekedett redukált nyomásmaximum számítására.

- A lefúvatott robbanásokra vonatkozó eredményeim felhasználásával meghatározom a lefúvóvezeték által okozott ellenállás mértékét és abban a csősúrlódási veszteség részarányát. Ennek eszközeként megvizsgálom a csősúrlódásból származó nyomásveszteségek összefüggéseinek alkalmazhatóságát a lefúvatott robbanásokra, valamint számszerűsítem az egyéb hatásokból eredő veszteségeket is.
- Vizsgálom a másodlagos robbanás helyét és maximumértékét, valamint a lefúvítás során a csatornában kialakuló nyomáscsúcsok nagyságát is.

Globális célom, hogy az általam kidolgozott eljárások más, az ipari gyakorlatban jellemzően előforduló robbanóképes gázok esetére szintén alkalmazhatók legyenek.

2. Tudományos előzmények

2.1. Zárt térben végbemenő robbanások

2.1.1. Jellemző mérőszámok

A zárt térben bekövetkező robbanások és azok hevessége számos jellemző értékkel leírható. Az ipari gyakorlatban ilyen mérőszámok a maximális robbanási nyomás (P_{max}) és a maximális nyomásemelkedési sebességből számított robbanási konstans (gázok esetén K_G).

A közben lezajló folyamatokat jellemzi a terjedő láng lamináris lángterjedési sebessége (S_l , vagy $S_{l,ad}$) is. Az égés kezdeti szakaszában, amikor még a láng izobár körülmények között halad előre, az égési sebesség (S_f) és a lamináris lángterjedési sebesség (S_l) között az alábbi összefüggés áll fenn [2]:

$$S_l = \frac{\rho_b S_f}{\rho_u}. \quad (1)$$

A (1) összefüggésből is látható, hogy a közeg a reakció közben sűrűségváltozást szenved, ennek mértékét az E expanziós faktor fejezi ki [3]:

$$E = \frac{\rho_u}{\rho_b} = \left(\frac{T_{f,p}}{T_0} \right) \left(\frac{n_e}{n_0} \right). \quad (2)$$

A bekövetkezett expanzió a lángfrontot maga előtt tolja és gyorsulásra kényszeríti. A terjedő láng instabil, a helyben lejátszódó mikrofolyamatok révén a lángfrontban kitüremkedések alakulnak ki. Az enyhén ráncolódott lángfrontban a diffúziós folyamatok is kiegyensúlyozatlanul játszódnak le [4]. Az így kialakuló turbulencia a reagensek és égéstermékek közötti fázisérintkezésnek kedvez, így gyorsítva a lángterjedést [5]. A turbulens lángterjedési sebesség (S_t) az a sebesség, amellyel az átlagos elemi lángfelület halad át a reagenseken. Az összefüggés egy széles körben alkalmazott változata Gülder [6] nevéhez fűződik:

$$S_t/S_{l,ad} = 0,65 \cdot (u'/S_{l,ad})^{3/4} \cdot (L/\eta_0)^{1/4}. \quad (3)$$

2.1.2. Szimulációs módszerek

A robbanás jellemző értékeinek zárt téri és lefúvatott esetekre történő meghatározására különböző modellek és eljárások alkalmazhatók. Ide tartoznak az empirikus, a fenomenologikus, a reakciókinetikai valamint a CFD alapú modellek is, azonban az egyes típusok eltérő mértékű egyszerűsítéseket alkalmaznak [7]. Disszertációmban bővebben a fenomenologikus és reakciókinetikai modelleket vizsgáltam.

A fenomenologikus modellek olyan, félempirikusnak tekinthető egyszerűsített fizikai modellek, amelyek bizonyos paramétereit empirikus összefüggésekkel határoznak meg, másokat pedig a fizikai törvényszerűségek alapján írnak fel. Ebbe a csoportba tartozik például a széles körben alkalmazott SCOPE modell [7].

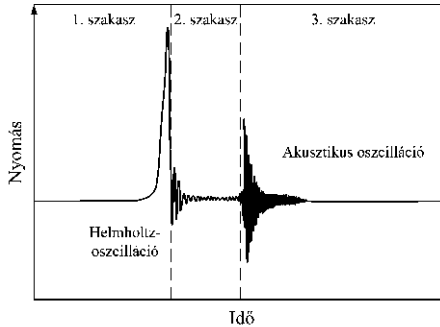
A reakciókinetikai módszerek a kémiai reakciók lezajlásának sebességét közelítik a részreakciók teljes vagy egyszerűsített leírásával. Számos típusának egyike az egyenlet modellek csoportja, amelyek az égés egyensúlyi reakcióegyenletét veszik alapul, majd erre vonatkozóan határozzák meg a tüzelőanyag-fogyás differenciálegyenletét egy empirikus összefüggés segítségével. A propán égésére vonatkozó egyenletek közé tartozik például Frolov és mtsai. [8], valamint Wen és Wang modellje [9].

2.2. Lefúvatott robbanások

2.2.1. A lefúvás során fellépő fizikai-kémiai jelenségek

A készülékben mért nyomásnövekedés a lefúvatott gázrobbanások esetén három különböző szakaszra bontható, amelyeket a 1. ábra szemléltet.

Az első szakaszban a robbanóképes keverék meggyullad, a láng terjed és expandál. Ha a belső nyomás eléri a lefúvásos védelmi eszköz nyitónyomását, az kinyílik és a közeg elkezd kiáramlani a téből.



1. ábra. A lefúvatás során kialakuló nyomásgörbe jellegzetes szakaszai [10]

A második szakaszban Helmholtz-oscilláció léphet fel lefúvatás közbeni anyagjellemző- és állapotjelző-változások következtében. Az oszcillációt okozó részfolyamatok ismétlődnek, közben fokozatosan elhalnak.

A harmadik szakasz az akusztikus oszcillációk néven ismert nagyfrekvenciájú rezgések szakasza, ám ez nem minden esetben figyelhető meg a lefúvatás során, és távozó nyomáshullám a készüléket sajátfrekvencia-közeli akusztikus rezgésbe hozhatja [10].

A készülék belsejében kialakuló maximális redukált robbanási nyomás ($P_{red,max}$) meghatározására számos modell született, amelyek közül a jelentősebbek Molkov [11] Sustek [12] és Lautkaski [13] modellje.

2.3. Robbanás elvezetése lefúvató csatornák alkalmazásával

2.3.1. A lefúvató csatornában lejátszódó folyamatok

Ahhoz, hogy a lefúváskor távozó anyagok elkerüljék a munkaterületet vagy a szomszédos készülékeket és csővezetéseket, a lefúvásos védelmi eszköz lefúvató csatornával is kiegészíthető. Azonban ez a megoldás számos tényezőtől összetevődő ellenállást jelent a lefúvatott közeg áramlásával szemben, amely ellennyomásként jelentkezik, és kedvezőtlen befolyással van a védendő szerkezetben mérhető redukált nyomásra [14].

A lefúvató csatornában lejátszódó folyamatok igen összetettek, amelyek jelentősen befolyásolják a lefúvatást és a készülékben mérhető robbanási jelzőszámokat. A megfigyelhető szakaszokat és lezajló jelenségeket Ponizy és Leyer [15], valamint Pang és mtsai. [16] foglalták össze részletesen.

A közeg lefűvővezetékben történő áramlása közben fellépő ellenállások ezek alapján a következők lehetnek [17]:

- a lefűvőrendszer áramlási veszteségei,
- a csatornában lévő légtömeg tehetetlensége,
- másodlagos robbanás a csatornában,
- oszcillációk.

A lefűvató csatornában nem csak egyetlen nyomáscsúcs azonosítható [16]. Az első csúcserték a hasadóelem nyitását követő turbulens zavar és az ebből induló lökéshullám hatása. Megnevezése a külföldi szakirodalomban „membrane break shock” [18]. A második csúcs maga a másodlagos robbanás [19]. A legkönnyebben megfigyelhető ismert nyomáscsúcs akkor keletkezik, mikor a másodlagos robbanás hatása gyengül, és a készülékből újra megindul a lefűvátás [20]. Ezekon felül a lefűvátást követően, már a vezetékben kívül is kialakulhat másodlagos robbanás, amelynek létrejöttét például Cao és mtsai. [21] vizsgálták.

2.3.2. Lehetséges csatornialakítások, szabványi előírások, redukált nyomások

A robbanások megelőzése, valamint a károk mérséklése az ipari gyakorlat egy rendkívül fontos területe. Ha az előzőekben kifejtettek szerint a robbanás megfelelően lefűvátásra kerül [22], annak kedvezőtlen hatása minimalizálható. Maga a folyamat ezzel nem ér véget, azonban annak káros következményei jelentősen mérséklődnek. Továbbá, a lefűvátást követően az elvezetett lángok és nyomáshullámok által okozott hatásokkal is számolni kell.

Hazánkban a hatékony lefűvátáshoz szükséges nyílófelületek nagyságát, valamint az azok kiegészítő elemeivel – lefűvővezetékkel, terelőlemezekkel – szemben támasztott alapvető követelményeket gáz-levegő keverékek esetén az MSZ EN 14994:2007 szabvány [23], míg por-levegő keverékek esetén az MSZ EN 14491:2013 szabvány [24] határozza meg. A nemzetközi gyakorlatban az NFPA 68:2018 [25] alkalmazása is jelentős területet képvisel.

A lefűvató csatornákra vonatkozó kritériumok – a csatorna redukált nyomást növelő hatásának minimalizálására – az MSZ EN 14491:2013, MSZ EN 14994:2007, NFPA 68:2018 szabványok esetén többnyire hasonlóak, amelyek a teljesség igénye nélkül:

- a csatorna legyen annyira rövid és egyenes, amennyire lehetséges;
- a csatorna keresztmetszete legyen akkora (MSZ EN 14491:2013) vagy legalább akkora, mint a lefűvó keresztmetszet (MSZ EN 14994:2007, NFPA 68:2018);
- az egyenes csatorna kezdeti keresztmetszetében a lefűvató felület normálisával maximum 20°-os szöget zárjon be.

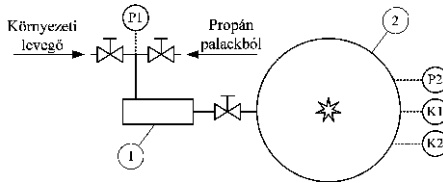
Az említett szabványok által javasolt, a lefűvató csatorna hatására megnövekedett redukált nyomások számítására vonatkozó összefüggések Lautkaski [13] átfogó tanulmánya alapján 44%-os relatív hibával is becsülhetik a valós mérési eredményeket.

A lefűvató csatorna alkalmazása mellett felállított, redukált nyomásnövekményre vonatkozó jelentősebb számítási modellek a következők: Bartknecht (1993.) (említve: [13]); Tamanini és Fischer (2003.) (említve: [13]); Ural (2005.) [26]; Di Benedetto és mtsai. [27]; Yao kiterjesztett elmélete (2007.); Lautkaski (2012.) [13].

3. Vizsgálati módszerek

3.1. A zárt terű robbanások vizsgálata

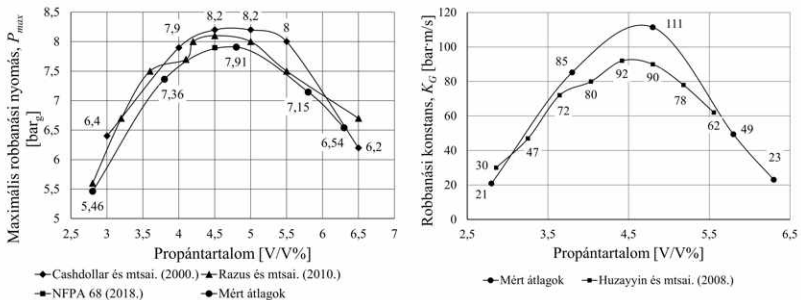
A vizsgálataimhoz kapcsolódó mérések vázlatát az 2. ábra szemlélteti. Az elrendezés központi eleme az EN 14034-1:2004+A1:2011 szabvány [28] előírásainak megfelelő 20 liter űrtartalmú, Kühner gyártmányú robbantókamra (2). A kamrában kialakuló nyomásértékeket két darab Kistler nyomástávadóval (K1 és K2) és egy Hottinger típusú nyomástávadó szenzorral (P2) rögzítettem, 9600 Hz frekvencia-értékekkel.



2. ábra. Propán-levegő töltőrendszer vázlatá; 1 – gáztöltő kamra, 2 – robbantókamra

A méréseket atmoszférikus kezdeti nyomáson és környezeti kezdeti hőmérsékleten (298 K) végeztem, 2,8, 3,8, 4,8, 5,8 és 6,3 V/V% propántartalmú propán-levegő keverékekkel. A kívánt mennyiségű gáz betöltésére egy – csatlakozó szerelvényekkel együtt – 0,6 liter űrtartalmú töltőkamrát (1) terveztem és alkalmaztam, amelybe a betöltött gázmennyiséget a töltőkamrán elhelyezett P1 jelű nyomástávadó segítségével ellenőriztem.

A 3. ábra a vizsgálatok eredményeképpen előálló robbanási jelzőszámokat szemlélteti: a P_{max} maximális robbanási nyomást (balra) és a K_G robbanási konstans (jobbra).



3. ábra. Zárt kamrában mért maximális robbanási nyomások (balra) és robbanási konstansok (jobbra) [25, 29, 30, 31]

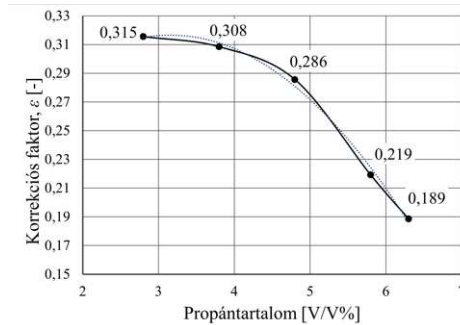
A zárt kamrás mérések eredményeinek segítségével megvizsgáltam az ideális gáz modell nyomás-idő függvényre való alkalmazhatóságát. Az eredeti modell alkalmazási tartománya a kezdeti nyomáshoz képest maximum $P_0+10\%$ nyomásemelkedésig

terjedt [2]. Mérési eredményeimet felhasználva az eredeti formulába illesztettem egy ϵ módosító tényezőt, amely segítségével a modell alkalmazhatóságát kibővíttem a $P_0+150\%$ -os tartományra:

$$P = P_0 \cdot e^{\epsilon \cdot E^2 \cdot (E-1) \left(\frac{S_l \cdot t}{R}\right)^3}, \quad (4)$$

ahol ϵ az általam bevezetett tényező, amely a turbulens lángterjedés közben lejátszódó részfolyamatok hatását fejezi ki számszerűen. Az összefüggésben szereplő E expanziós faktort, $T_{f,p}$ adiabatikus izobár lánghőmérsékletet és S_l lamináris lángterjedési sebességet irodalmi adatok felhasználásával állapítottam meg [2, 3, 31, 32]. Az ϵ korrekciós tényező értékeit szemlélteti a 4. ábra, propántartalomtól való függését pedig az (5) összefüggés írja le, amelyben V_p^* a propán térfogatkoncentrációját jelenti a kiindulási keverékben.

$$\epsilon = -0,0132 \cdot V_p^{*2} + 0,0832 \cdot V_p^* + 0,1853 \quad (5)$$

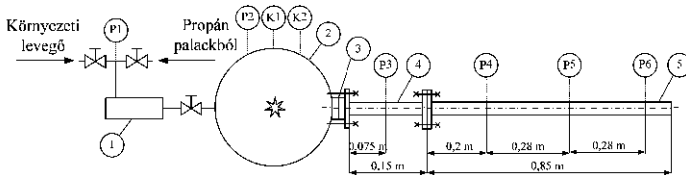


4. ábra. Az ϵ faktor értékei

3.2. A lefúvatott robbanások vizsgálata

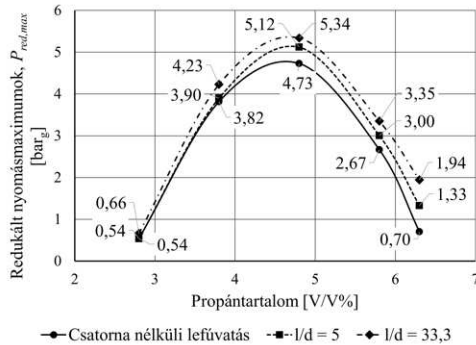
3.2.1. A mérési eljárás módosításával elért eredmények

A lefúvatott robbanásokat a zárt terű vizsgálatokhoz használt mérési elrendezés módosításával vizsgáltam (5. ábra), a korábbi keverékösszetételekkel, valamint 7,8 és 9,8 V/V% propántartalmú keverék esetén.



5. ábra. A lefúvatott robbanások mérési elrendezésének vázlatja

Lefúvató csatorna nélkül (0 m hosszúságú csatorna), valamint 0,15 m (4) és 1 m (4 és 5) hosszú csatornával végeztem méréseket. Mind a hasadóelem nyílófelülete, mind a csatornák első átmérője 30 mm volt, így a vizsgált csatornák l/d viszonya rendre 0, 5 és 33,3 értékre adódott. A csatorna hossza mentén nyomástávadókat (P3-P6) helyeztem el. A hasadóelemként használt alumínium fóliák (3) nyitónyomása átlagosan $P_{set} = 0,49 \text{ bar}_g$ adódott.



6. ábra. A robbantókamrában mért redukált nyomások átlagos maximumértékei

A 6. ábra grafikusán is szemlélteti a redukált nyomások átlagértékeit a kezdeti propántartalom függvényében. Ahogyan az ábrán is látható, a csatorna alkalmazása és annak hossza jelentős hatással van a kamrában mérhető nyomásértékekre. Továbbá az is megfigyelhető, hogy a tüzelőanyagban szegényebb keverék kisebb hatást gyakorolt a kamrában mérhető maximumértékekre.

3.2.2. A megnövekedett redukált nyomás számítására alkalmas új összefüggés kidolgozása

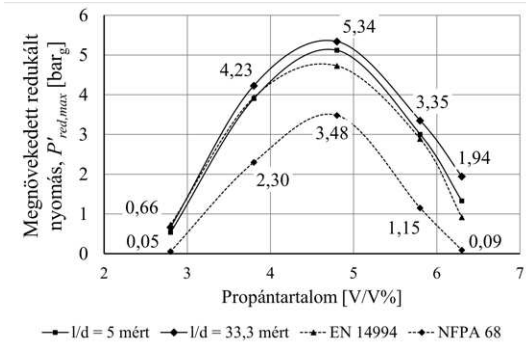
A kamrában mérhető redukált robbanási nyomás maximumértékének becslésére mind az MSZ EN 14994:2007 [23], mind az NFPA 68:2018 [25] szabvány közöl számítási módot. Az előbbi előírásai szerint a csatorna redukált nyomást növelő hatása, amennyiben a lefúvóvezeték hossza 3 méternél rövidebb:

$$P'_{red,max} = 1,24 \cdot P_{red,max}^{0,8614}$$

Az NFPA 68:2018 szabvány szerint, ha a lefúvóvezeték hossza 3 és 6 méter közé esik, vagy annál rövidebb de a hossza a hidraulikai átmérő négyszeresénél nagyobb, a csatorna hatására megnövekedett redukált nyomás az alábbi összefüggés segítségével számítható:

$$P'_{red,max} = 0,172 \cdot P_{red,max}^{1,936}$$

A szabványi előírások szerint számított redukált nyomásértékeket az $l/d = 33,3$ hosszúságú lefúvató csatorna mérési eredményeivel összehasonlítva szemlélteti a 7. ábra.



7. ábra. A mért, valamint az MSZ EN 14994:2007 és NFPA 68:2018 szabványok szerint meghatározott redukált nyomásmaximumok

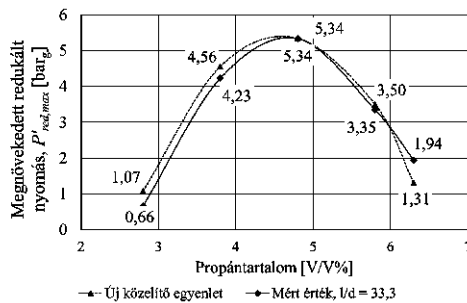
A vizsgált esetben a szabványi számítások a legkritikusabb koncentrációk esetén alulról közelítik a mérési eredményeket, ezért egy olyan egyenletet alkottam, amely pontosabban közelíti a megnövekedett redukált nyomás értékét a kamrában, és amelynek alakja:

$$P'_{red,max} = a \cdot P_{red}^b \tag{6}$$

Mérési eredményeim alapján megállapítottam az összefüggés konstansait: $a = 1,6953$ és $b = 0,7384$, amellyel az új közelítő egyenlet:

$$P'_{red,max} = 1,6953 \cdot P_{red}^{0,7384} \tag{7}$$

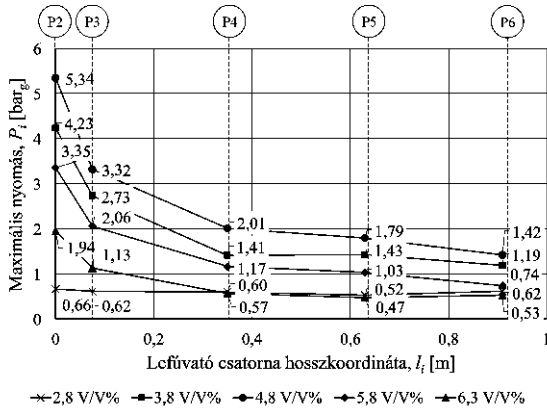
A (7) összefüggés segítségével kapott redukált robbanási nyomások a 8. ábrán láthatók. Az új összefüggés a maximumértéknél és annak szomszédos értékeinél is felülről burkolja a mérési eredmények görbéjét.



8. ábra. A mért redukált nyomásmaximumok összevetése a (7) egyenlet szerinti eredményekkel

3.2.3. Nyomásvesztés az $l/d = 33,3$ hosszúságú csatorna mentén

A 9. ábra az egyes nyomástávadók által mért maximumértékeket foglalják össze, $l/d = 33,3$ hosszúságú lefúvató csatorna esetén.



9. ábra. A P2 – P6 távadók által mért nyomások átlagos maximumértékei az 1 méter ($l/d = 33,3$) hosszúságú csatorna esetén

A csatorna kezdeti szakaszán jelentős nyomásvesztés figyelhető meg. A P2 és P3 távadók eredményei közötti abszolút nyomáskülönbség, valamint az egységnyi hosszra vonatkoztatott különbség is jelentősen eltér a 2,8 V/V%-os keverék esetén a többi keverékhez képest. A nyomásértékek részletes elemzése során megállapítottam, hogy a 2,8 V/V% propántartalmú keverék esetén nem következik be vagy elhanyagolható a lefúvató során a másodlagos robbanás.

3.2.4. A lefúvató csatornában lejátszódó jelenségek és nyomáscúcsok azonosítása

A lefúvató csatornában lejátszódó jelenségek vizsgálata érdekében az $l/d = 33,3$ hosszúságú csatorna esetén mért nyomásgörbéken elkülönítettem a szakirodalomban előforduló jellegzetes lokális nyomásmaximumokat (Helmholtz- és akusztikus oszcillációkat, a membránszakadásból származó lokális maximumot, a lehetséges másodlagos robbanást és elnyújtott nyomásnövekedési szakaszt).

A vizsgálatok során a szakirodalmak által nem említett, másodlagos robbanást követő kiugró nyomáscúcs(oka)t azonosítottam. Ezek megállapításaim szerint másodlagos robbanások, amelyekből a 1. táblázat (lentebb) szerinti mennyiségeket figyeltem meg.

Az egyedi méréseket vizsgálva az is megállapítható volt, hogy bizonyos esetekben a másodlagos robbanások maximális nyomásértékeinek egyike meghaladta az elnyújtott nyomásmaximumot.

Propántartalom [V/V%]	Másodlagos robbanások száma [db]	Másodlagos robbanások átlagos maximumértékei [bar _g]		
2,8	0 – 1	0,26	–	–
3,8	1	0,875	–	–
4,8	1	1,343	–	–
5,8	2	0,809	1,563	–
6,3	3	0,538	0,843	0,979
7,8	1	0,242	–	–
9,8	0	–	–	–

1. táblázat. Másodlagos robbanások P3 távadó által mért átlagos értékei

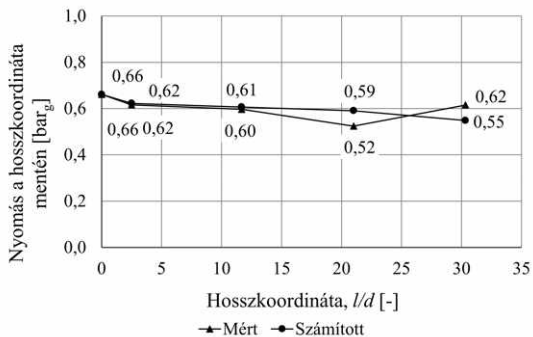
3.2.5. A csősúrlódási veszteség részarányának meghatározása

Ahhoz, hogy a lefúvató csatornában fellépő másodlagos robbanás mértéke azonosíthatóvá váljon, a csatorna csősúrlódási ellenállásának számszerűsítése szükséges. Ez az a veszteség, amely minden egyes lefúvatáskor fellép. A további hatások ezen komponensre szuperponálódnak, és együttesen adják a redukált nyomás növekedését eredményező ellenállást. Ahhoz tehát, hogy az egyéb hatásokat – másodlagos robbanásokat, oszcillációkat – számszerűsíthessem, ismernem kell a csatornában fellépő áramlási veszteség mértékét.

Ez utóbbi meghatározásához a lefúvató csatorna nélküli, valamint az 1 méter ($l/d = 33,3$) hosszúságú csatornával elvégzett mérési eredményeimet használtam fel. Mivel megállapítottam, hogy a 2,8 V/V% propántartalmú keverék lefúvatásakor a csatornában nem következett be másodlagos robbanás vagy annak hatása elhanyagolható volt, a csősúrlódási veszteség meghatározását ezen keverék adatai alapján végeztem el.

3.2.6. Nyomásesések a 2,8 V/V% propántartalmú keverék esetén

A csatorna mentén mért és számított nyomásértékeket a 10. ábra szemlélteti.



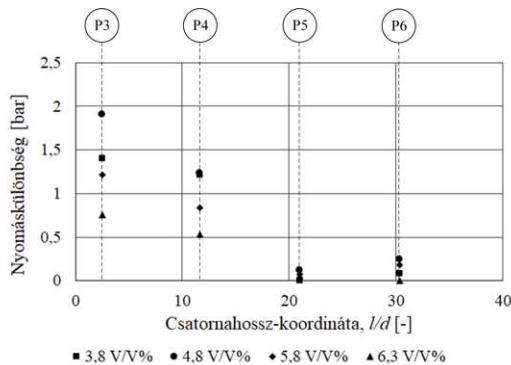
10. ábra. A mért és számított nyomásértékek összehasonlítása a lefúvató csatorna hossza mentén ($l/d = 33,3$; 2,8 V/V%-os keverék)

Az ábrán a P5 és P6 pozíciókban nem jelentős, de jól látható különbségek figyelhetők meg a mért és számított nyomáscsúcsok között. A jelenség magyarázata a Helmholtz-oszcilláció, valamint a lefúvatáskor végbemenő jelentős turbulencia együttes hatása.

Mérési eredményeim és számításaim segítségével megállapítottam, hogy a csősúrlódási veszteség számítására alkalmazható összefüggések lefúvatott robbanások esetén is alkalmasak a csatorna csősúrlódási veszteségének számítására, és a lefúvató csatorna hatására megnövekedő redukált nyomás értéke nagy pontossággal meghatározható. Olyan keverékek esetén, ahol másodlagos robbanás is tapasztalható, a csatorna teljes áramlási veszteségének csősúrlódási veszteségi része is meghatározható.

3.2.7. Nyomásesések a 3,8 – 6,3 V/V% propántartalmú keverékek esetén

A 3,8 – 3,6 V/V% propántartalmú keverékek esetén is megállapítottam a lefúvató csatorna csősúrlódási veszteségeit. A csatorna meghatározott hosszkoordinátáinál mért nyomásokból kivonva a számított csősúrlódási veszteségeket, meghatároztam a lefúvatáskor fellépő, a csősúrlódási veszteségre szuperponálódó egyéb ellenállások mértékét (11. ábra).



11. ábra. A 3,8 – 6,3 V/V%-os összetételű keverékek mért nyomásmaximumainak és számított csősúrlódási veszteségeinek különbségei

Megállapítható, hogy a legintenzívebb másodlagos robbanás a P3 távado környezetében következett be. Az ezen a helyen mérhető legnagyobb nyomásmaximum a 4,8 V/V%-os keverék esetén adódott. Ez azt bizonyítja, hogy ezen a helyen az a keverék robbant be, amelyet a lángfront maga előtt tolt és a lefúvatáskor hirtelen expandált. A későbbi másodlagos robbanások a lefúvatott keverék maradék propántartalmának újbóli berobbanásai.

Tovább megállapítható, hogy a másodlagos robbanások hatása a csatorna $l/d = 21$ koordinátájáig áll fenn, ezt követően nagyságrendi változás áll be az értékekben.

A kezdeti szakaszon tehát leginkább a másodlagos robbanások hatása érvényesül, míg az ezt követő nyomáskülönbség növekményért a csatornában kialakuló oszcilláció felel, amely azonban elhanyagolható mértékű a másodlagos robbanás hatásához képest.

4. Új tudományos eredmények

A 2,8 – 6,3 V/V% propántartalmú propán-levegő keverékek 20 literes űrtartalmú, gömb alakú robbantókamrában, módosított gáztöltési eljárással végzett robbanásának zárt terű és lefúvatott (0,49 bar_g nyitónyomású hasadóelem, valamint $l/d = 0, 5$ és 33,3 hosszúság-átmérő viszonyú lefúvató csatornák) elméleti és szimulációs vizsgálati, valamint mérési eredményei alapján az alábbi új tudományos eredményeket fogalmazom meg.

- T1. Laboratóriumi méretű (20 literes űrtartalmú) készülék esetén az MSZ EN 14994: 2007 és NFPA 68:2018 szabványokban található összefüggések pontosítására, a lefúvóvezeték hatására bekövetkező redukált nyomás növekedésére egy új összefüggést határoztam meg, amelynek alakja a következő:

$$P'_{red,max} = a \cdot P_{red,max}^b.$$

Az összefüggés az említett szabványok megengedett alsó készülék méret tartományában pontosabb eredményt szolgáltat, mint az eredetiek.

Propán-levegő keverékek esetén meghatároztam az összefüggés a és b konstansait ($a = 1,6953$ és $b = 0,7384$) a robbanásveszély szempontjából legveszélyesebb koncentrációk tartományában.

A tézishez tartozó publikáció: (16)

- T2. Kidolgoztam a zárt téri robbanás kezdeti szakaszán a nyomásváltozás modellezésére szolgáló, mérnöki gyakorlatban alkalmazható eljárást. A zárt téri robbanást ideális gázként közelítő nyomásfüggvénybe illesztett ϵ módosító tényező alkalmazásával a függvény értelmezési tartományát kiterjesztettem. A módosított összefüggés a következő alakban írható fel:

$$P = P_0 \cdot e^{\epsilon \cdot E^2 \cdot (E-1) \left(\frac{S_{l-t}}{R}\right)^3}.$$

Az összefüggés alkalmazhatóságát propán-levegő keverék esetén mérésrel és szakirodalmi adatokkal való összevetéssel igazoltam, továbbá propán-levegő keverék esetén meghatároztam az ϵ korrekciós tényező propántartalomtól való függését az

$$\epsilon = -0,0132 \cdot V_p^{*2} + 0,0832 \cdot V_p^* + 0,1853$$

alakban. A bemutatott eljárás alkalmazásával az ϵ tényező tetszőleges robbanóképes gáz levegővel alkotott keverékére meghatározható.

A tézishez tartozó publikációk: (1)(2)(9)(10)(14)

- T3. Kísérleti vizsgálatokkal igazoltam, hogy 20 literes űrtartalmú, gömb alakú robbantókamrából történő lefúvatás esetén, lefúvató csatorna alkalmazása mellett, a szakirodalomban általánosan megjelenő egyetlen másodlagos robbanáson kívül további másodlagos robbanások is felléphetnek, amelyek esetenként a csatornában mérhető elnyújtott nyomáscsúcs maximumértékét is meghaladhatják.

A mérési eljárás alkalmazásával propán-levegő keverék különböző koncentrációira igazoltam, hogy 20 literes űrtartalmú, gömb alakú robbantókamra, $l/d = 33,3$ hosszúság-átmérő viszonyú lefúvató csatorna esetén a szakirodalomban említett

egyetlen másodlagos robbanáson kívül további másodlagos robbanások is fellépnek. A másodlagos robbanások száma a propánkoncentráció függvénye, amely maximumát a sztöchiometriai arányú keverék közelében éri el.

A tézishez tartozó publikáció: (15)

T4. A elvégzett elméleti, szimulációs és kísérleti vizsgálatok segítségével a lefúvó-vezetékkel ellátott, lefúvatott gáz-levegő keverékek robbanása esetén az alábbi megállapításokat tettem.

- a) Igazoltam, hogy a másodlagos robbanás nélküli esetben a kamrában mérhető redukált nyomás növekményét a lefúvató csatorna csősúrlódási vesztesége okozza.
- b) Kísérletek és számítások segítségével igazoltam, hogy a csőbe történő belépési és a csőben történő áramlási veszteség számítására szolgáló összefüggések lefúvatott robbanás esetén is alkalmazhatók a csatornában fellépő csősúrlódási veszteség számítására.
- c) Propán-levegő keverékek esetén kimutattam, hogy amennyiben másodlagos robbanás is megfigyelhető a csatornában, a legintenzívebb másodlagos robbanás a lefúvónyílás környezetében következik be. Az ezen a helyen mérhető nyomásmaximumok szintén a kiindulási koncentráció függvényei, amely a csúcsát sztöchiometriai arányú keverék környezetében éri el.
- d) Megállapítottam, hogy az először bekövetkező másodlagos robbanást a csatornában megjelenő kiindulási összetételű keverék robbanása okozza. Az esetlegesen létrejövő későbbi másodlagos robbanások a lefúvatott (már égéstermékeket is tartalmazó) keverék maradék tüzelőanyag-tartalmának újbóli berobbanása következtében alakulnak ki.
- e) A másodlagos robbanások hatása a csatornaszakasz adott tartományában jelenik meg. A vizsgált csatorna kilépési keresztmetszete környezetében bekövetkező nyomáskülönbség-növekmény oka a csatornában kialakuló oszcilláció, amely azonban elhanyagolható mértékű a másodlagos robbanás hatásához képest.

A tézishez tartozó publikáció: (15)

5. Fejlesztési lehetőségek

Ahogy a dolgozatból is kitűnik, a robbanásvédelem témaköre minden egyes vizsgált területen bőven rejt magában tudományos potenciált. Ebből kiindulva a továbbiakban is szeretném folytatni a kutatásaimat a témában.

A dolgozatban ismertetett eljárások mindegyikét úgy alakítottam ki, hogy nem csak propán-levegő keverékek, hanem tetszőleges robbanóképes gázelegy robbanási jellemzői (maximális robbanási nyomás, robbanási konstans) vizsgálhatók legyenek mind a robbantókamra belsejében, mind – lefúvató csatornák alkalmazása esetén – a lefúvató csatornában.

Mivel a dolgozatban összefoglalt vizsgálataimat adott összetételű keverékek esetén végeztem el, így ezekre határoztam meg az ideális gáz modellbe illesztett ϵ korrekciós tényezőt, valamint a megnövekedett redukált nyomás számítására szolgáló a és b konstansokat. Ahhoz, hogy ezek valóban a mérnöki gyakorlat számára hasznos kutatási eredmények lehessenek, az első és legfontosabb szempont ezek kiterjesztése az iparban előforduló egyéb gázkeverékekre is. Így elsődleges kutatási irányként ezt a vonalat jelölöm ki.

A lefúvatott robbanások témaköre szintén rendkívül összetett. Különösen igaz ez a lefúvóvezetékek alkalmazására, amelyek számos paraméterét (hosszúság/átmérő viszony változása, keresztmetszet geometriája, egyenestől eltérő csatornaalakok) a jelenlegi dolgozatban nem vizsgáltam. Így ahhoz, hogy a valós körülményeket valóban széleskörűen lefedjék az eredmények, ezek vizsgálata is egy további kutatási irányt jelöl ki. A másodlagos robbanások bekövetkezési helye, és azok részaránya a lefúvató csatorna nyomásvesztésében az egyéb ellenállásokhoz képest olyan alapinformációk, amelyek a későbbi tudományos előrelépést szolgálhatják és további munkával a lefúvós védelmi berendezések fejlesztési irányaira is hatással lehetnek.

A lefúvató csatornára vonatkozó vizsgálataim mindössze a hangsebesség alatti áramlásokra terjedtek ki, azonban a csatornában hangsebesség fölötti áramlás is kialakulhat, amely egészen eltérő áramlás- és nyomásviszonyokat okoz a csatornában és a készülékben egyaránt. További kutatási lehetőség ezen folyamatok vizsgálata.

A disszertációban áttekintett szabványok közül egyedül az NFPA 68:2018 porrobbanásokra vonatkozó része közöl számítási módot az egyenestől eltérő kialakítású csatornák nyomásvesztésének számítására, ám azok is korlátozott mennyiségű mérési eredményen alapuló empirikus összefüggések. Ilyen szabványi ajánlások a gázrobbanásokra vonatkozóan az általam vizsgált körben nem léteznek. Ezek pontosítása vagy a felhasználható összefüggések körének bővítése is további kutatási irány a témában.

6. A disszertációhoz kapcsolódó publikációk jegyzéke

1. V. Mikáczó, G. L. Szepesi „*Theoretical Investigation of Pressure-Characteristic in case of Gas Explosion*”, Proceedings of the International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2014) Debrecen, Magyarország : University of Debrecen Faculty of Engineering (2014) pp. 82-90. , 8 p.
2. Mikáczó V., Szepesi L. G. „*Nyomás-idő függvény elméleti vizsgálata gázrobbanás esetén*”, GÉP 65: 1 pp. 33-37 (2014)
3. Mikáczó V. „*Hydrodynamical Investigation of Vent Duct in case of Dust Explosion*”, Tavaszi Szél 2014 Konferencia: Konferenciakötet VII., Debrecen, Magyarország : Doktoranduszok Országos Szövetsége (DOSZ) (2014) 570 p. pp. 460-470. Paper: ISBN 978-615-80044-6-6 , 11 p.
4. Mikáczó V. „*Lefúvóvezeték hatásának vizsgálata töltetrobbanás hasadópaneles védelme esetén*”, Pokorádi, László; Vámosy, Zoltán (szerk.) XXXII. OTDK Műszaki Tudományok Szekció : Tartalmi kivonatok, Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem, (2015) p. 298 Paper: ISBN
5. V. Mikáczó, G. L. Szepesi „*Theoretical and Experimental Investigation of Pressure Rise Generated by Dust Explosion*”, Tavaszi Szél : Absztraktkötet 2015 Budapest, Magyarország, Győr, Magyarország : Doktoranduszok Országos Szövetsége (DOSZ), Publio Kiadó (2015) 485 p. pp. 332-332. Paper: ISBN , 1 p.
6. Mikáczó V. „*Gázkeverék robbanása során történő lefúvatás vizsgálata - I. rész*”, The Publications of the MultiScience - XXX. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, Miskolc, Magyarország : University of Miskolc (2016) Paper: D4.8 , 5 p.
7. V. Mikáczó, Z. Siménfalvi, G. L. Szepesi „*Investigation of deflector plates in case of gas explosion*”, Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2016) Debrecen, Magyarország : University of Debrecen Faculty of Engineering (2016) 654 p. pp. 330-335. , 6 p.
8. V. Mikáczó, Z. Siménfalvi, G. L. Szepesi „*Influence of the vent duct design in case of gas explosion in 20 litre sphere apparatus*”, 22nd International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA 2016 and 19th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction, PRES 2016, Prága, Csehország : Czech Society of Chemical Engineering (2016) p. 682 *Scopus*
9. V. Mikáczó, Z. Siménfalvi, G. L. Szepesi „*Simulation of propane explosion in closed vessel*”, Annals of Faculty of Engineering Hunedoara - International Journal of Engineering 15 : 3 pp. 49-54. , 6 p. (2017)
10. V. Mikáczó, G. L. Szepesi „*Phenomenological modeling of gas explosion in closed vessel*”, MultiScience - XXXIII. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, Miskolc-Egyetemváros, Magyarország : Miskolci Egyetem (2019) pp. 1-9. Paper: D3-4 , 9 p.

11. Mikáczó V., Szepesi L. G., Siménfalvi Z. „*Lefűvővezeték hatása a redukált robbanási nyomásra - elméleti modellek*”, GÉP LXXII. : 1-2 pp. 26-30. , 5 p. (2021)
12. Mikáczó V., Szepesi L. G. „*Por- és gázrobbanásokkal kapcsolatos vizsgálatok alapjai és tapasztalatai*”, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem közleménye 11 : 2 pp. 93-99. , 7 p. (2021)
13. V. Mikáczó, Z. Siménfalvi, G. L. Szepesi „*Practical Extension of Ideal Gas Model for Propane Explosions*”, Abstract book for the 17th Miklós Iványi International PhD & DLA Symposium: Architectural, Engineering and Information Sciences, Pécs, Magyarország : Pollack Press (2021) 227 p. p. 143
14. V. Mikáczó, Z. Siménfalvi, G. L. Szepesi „*Practical Extension of Ideal Gas Model for Propane Explosions*”, Pollack Periodica: An International Journal for Engineering an Information Sciences, Paper: 10.1556/606.2022.00603 (2022) Scopus, Q3
15. V. Mikáczó „*Gas explosion venting of 20-litre vessel with and without various length of vent ducts*”, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem közleménye, 12 : 3 pp. 207-216. , 7 p. (2021), DOI: <https://doi.org/10.35925/j.multi.2022.3.19>
16. Mikáczó V., Siménfalvi Z. „*Lefűvatott robbanások maximális redukált nyomásának vizsgálata az EN 14994 és NFPA 68 szabványok tükrében*”, GÉP LXXIII : 5 pp. 52-55., 4 p. (2022)

Hivatkozások

- [1] Chris T. Cloney. 2021 Mid-year combustible dust incident report - Version 1. Technical report, DustEx Research Ltd. Retrieved, 2021.
- [2] Qingming Liu, Yunming Zhang, Fang Niu, and Lei Li. Study on the flame propagation and gas explosion in propane/air mixtures. *Fuel*, 140:677–684, 2015.
- [3] Venera Brinzea, Maria Mitu, Codina Movileanu, Adina Musuc, Domnina Razus, and Dumitru Oancea. Propagation velocities of propane-air deflagrations at normal and elevated pressures and temperatures. *Revista de Chimie*, 63(3):289–292, 2012.
- [4] G. Cicarelli and S. Dorofeev. Flame acceleration and transition to detonation in ducts. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(4):499–550, 2008.
- [5] Christophe Proust. A few fundamental aspects about ignition and flame propagation in dust clouds. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19(2-3):104–120, 2006.
- [6] Ömer L. Gülder. Turbulent premixed flame propagation models for different combustion regimes. *Symposium (International) on Combustion*, 23(1):743–750, 1991.
- [7] C J Lea and H S Ledin. A review of the State-of-the-art in gas explosion modelling. Technical report, 2002.
- [8] S. M. Frolov, V. S. Aksenov, and I. O. Shamshin. Reactive shock and detonation propagation in U-bend tubes. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 20(4-6):501–508, 2007.
- [9] Jennifer Wen and Changjian Wang. The new single-step reaction mechanism for propane explosions covering the entire spectrum of flame acceleration, transition to detonation and detonation. Technical report, The University of Warwick, 2013.
- [10] Song Sun, Yanyu Qiu, Huadao Xing, and Mingyang Wang. Effects of concentration and initial turbulence on the vented explosion characteristics of methane-air mixtures. *Fuel*, 267(1):1–9, 2020.
- [11] Vladimir V. Molkov. Unified correlations for vent sizing of enclosures at atmospheric and elevated pressures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 14(6):567–574, 2001.
- [12] J. Sustek and B. Janovsky. Comparison of empirical and semi-empirical equations for vented gas explosion with experimental data. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(6):1549–1557, 2013.
- [13] Risto Lautkaski. Duct venting of gas explosions. Revision of two proposed engineering correlations. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25(2):400–413, 2012.
- [14] R. K. Eckhoff. Current status and expected future trends in dust explosion research. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 18(4-6):225–237, 2005.
- [15] B. Ponizy and J. C. Leyer. Flame dynamics in a vented vessel connected to a duct: 1. Mechanism of vessel-duct interaction. *Combustion and Flame*, 116:259–271, 1999.
- [16] Lei Pang, Zhiwen Zhang, Shiqi Cui, and Siheng Sun. Experimental study of the venting characteristics of dust explosion through a vent duct. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 65:104144, 2020.
- [17] P. Russo and A. Di Benedetto. Effects of a duct on the venting of explosions - Critical review. *Process Safety and Environmental Protection*, 85(1 B):9–22, 2007.

- [18] J. F. Ye, X. H. Jiang, Z. W. Jia, and B. C. Fan. Experimental investigations of external second-explosion induced by vented explosion. *Explosion Shock Waves*, 04:356–362, 2004.
- [19] M. Hey. Pressure relief of dust explosions through large diameter ducts and effects of changing the position of the ignition source. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 4(4):217–222, 1991.
- [20] W. Kordylewski and J. Wach. Influence of ducting on the explosion pressure. *Combustion and Flame*, 66(1):77–79, 1986.
- [21] Weiguo Cao, Wenjuan Li, Liang Zhang, Jianfa Chen, Shuo Yu, Zhuanghong Zhou, Yun Zhang, Xiaobo Shen, and Yingxin Tan. Flame characteristics of premixed H₂-air mixtures explosion venting in a spherical container through a duct. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(52):26693–26707, 2021.
- [22] MSZ EN 14797. Robbanásvédelmi szellőztetőeszközök, 2007.
- [23] EN 14994. Gas Explosion Venting Protective Systems, 2007.
- [24] MSZ EN 14491. Dust Explosion Venting Protective Systems, 2013.
- [25] NFPA 68. Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting, 2018.
- [26] Erdem A. Ural. Dust explosion venting through ducts. In *AIChE 2005 Spring national meeting 39th annual loss prevention symposium, Atlanta, GA, April 11e13*, pages Paper TG004–5, 2005.
- [27] Almerinda Di Benedetto, Paola Russo, and Ernesto Salzano. The Design of Duct Venting of Gas Explosions. *Wiley InterScience*, 2007.
- [28] EN 14034-1+A1. Determination of explosion characteristics of dust clouds - Part 1: Determination of the maximum explosion pressure P_{max} of dust clouds, 2004.
- [29] Kenneth L. Cashdollar. Overview of dust explosibility characteristics. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, (13):183–199, 2000.
- [30] Domnina Razus, Dumitru Oancea, Venera Brinzea, Maria Mitu, and Codina Movileanu. Experimental and computed burning velocities of propane-air mixtures. *Energy Conversion and Management*, 51(12):2979–2984, 2010.
- [31] A. S. Huzayyin, H. A. Moneib, M. S. Shehatta, and A. M A Attia. Laminar burning velocity and explosion index of LPG-air and propane-air mixtures. *Fuel*, 87(1):39–57, 2008.
- [32] Venera Brinzea, Maria Mitu, Codina Movileanu, Adina Musuc, and Domnina Razus. Expansion coefficients and normal burning velocities of propane-air mixtures by the closed vessel technique. *Analele Universitatii Bucuresti: Chimie*, 19(2):31–37, 2010.