

LEFÚVÓVEZETÉK HATÁSA A REDUKÁLT ROBBANÁSI NYOMÁSRA – ELMÉLETI MODELLEK

EFFECT OF VENT DUCTS ON THE REDUCED EXPLOSION OVERPRESSURE – THEORETICAL MODELS

Mikáczó Viktória*, Siménfalvi Zoltán**, Szepesi L. Gábor***

ABSTRACT

A significant number of industrial dusts, as well as vapors and many gases, carry an explosion hazard. The disadvantage of using vent ducts as explosion protection is they increase reduced explosion pressure, and venting protection may not be able to perform its function properly. Accurate determination of increased reduced pressure is a serious problem in engineering practice.

MSZ EN 14491, EN 14994, NFPA 68 and VDI 3673 standards for venting protection contain correlations for manual calculations, but their applicability cannot be maintained in engineering practice in all cases. In this paper, authors summarize the major computational contexts reported in the scientific literature that has already been published, as a guide for further use. Values of relative errors mentioned at the end of each method were determined by Lautkaski based on experiments performed over a wide range of tests.

1. BEVEZETÉS

A legtöbb iparban előforduló por és gáz robbanásveszélyt hordoz magában. A zárt térben fellépő robbanási nyomás maximuma a p_{max} értékről lefúvatás segítségével mérsékelhető a $p_{red,max}$ redukált robbanási nyomás értékre. Ennek során a lángok és égéstermékek a szabadba, vagy lefúvató csatornák segítségével a kívánt helyre irányíthatók. Ez utóbbiak hátránya, hogy ellenállásuknál fogva növelik a redukált robbanási nyomást ($p_{red,max}$ -nál nagyobb $p'_{red,max}$ értékre), így esetenként a lefúvásos védelem nem képes megfelelően ellátni a feladatát. A megnövekedett redukált nyomás pontos meghatározása komoly probléma a mérnöki gyakorlatban, mivel a hatás mértéke számos tényezőtől függ. [1]

A gyakorlatban a következő, a lefúvatást akadályozó jelenségek lépnek fel a csatorna alkalmazása kapcsán: [2][3]

- súrlódási veszteségek;
- a csatornában lévő gázoszlop tehetetlensége;
- „burn-up” a csatornában (utánégésként fordítható);

* tanársegéd, Miskolci Egyetem Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék

** egyetemi docens, Miskolci Egyetem Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék

*** egyetemi docens, Miskolci Egyetem Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék

- akusztikus oszcillációk.

A csatorna jelenléte nem csak nyomásnövekedést okoz a készülékben, hanem nagy hosszok esetén ($l > 10-20$ m) a csatornában az áramló közeg sebessége meghaladhatja a hangsebességet és a lángterjedés/égés átléphet detonációba. [4] Ezen okból a csatornahosszt ajánlott 10 méternél rövidebbre, vagy legalább 10 bar_g belső nyomásterhelésre szükséges tervezni. [5]

Jelen cikkben a szabványi összefüggések [6 – 9] mellett a már megjelent tudományos irodalmakban közölt jelentősebb számítási összefüggéseket foglaljuk össze, mintegy útmutatóként a további felhasználáshoz.

Az egyes módszerek végén említett relatív hibák értékeit Lautkaski [10] állapította meg széles vizsgálati tartományban elvégzett kísérletek alapján. A szerző propán, metán, acetón, földgáz és városi gáz 4 % - 30 % közötti gáz-levegő keverékével végzett kísérletek szakirodalmi adatait gyűjtötte össze. Ezeket a kísérleteket 3,7 dm³ – 10 m³ térfogatú edényekben végezték el, többségében középponti gyújtással és 0,3 – 25 méter hosszúságú lefúvóvezetékkel. A továbbiakban említett relatív hibák ezen kísérletek adataira vonatkoznak.

2. A REDUKÁLT NYOMÁS SZÁMÍTÁSÁRA ALKALMAZHATÓ MODELLEK

2.1. Az MSZ EN 14491 összefüggései

A porokra vonatkozó MSZ EN 14491 [8] szabadon álló, V térfogatú köbös edényekre az (1) összefüggést ajánlja a d átmérőjű, l hosszúságú lefúvóvezeték által megnövelt redukált nyomás maximumának meghatározására, porrobbanás esetén.

$$\frac{p'_{red,max}}{p_{red,max}} = 1 + 17,3 \cdot \left[\frac{A_v}{V^{0,753}} \right]^{1,6} \cdot \frac{l}{d} \quad (1)$$

Ezen felül a szabvány megadja, hogy a $p'_{red,max}$ a (2) szerinti hosszúnál a leghangszúlyosabb.

$$(l/d)_s = 4,564 \cdot p_{red,max}^{-0,37} \quad (2)$$

A szabvány feltételezése szerint ennél nagyobb hosszúság-átmérő viszony alkalmazása nem okoz jelentős változást $p'_{red,max}$ értékében.

Az összefüggések alkalmazhatósági tartománya:

- készüléktérfogat: $0,1 \text{ m}^3 \leq V \leq 10000 \text{ m}^3$;
- lefúvófelület statikus aktivációs nyomása: $0,1 \text{ bar}_g \leq p_{stat} \leq 1 \text{ bar}_g$;
- maximális redukált robbanási túlnyomás: $0,1 \text{ bar}_g \leq p_{red,max} \leq 2 \text{ bar}_g$ és $p_{red,max} > p_{stat}$;
- maximális robbanási túlnyomás: $5 \text{ bar}_g \leq p_{max} \leq 12 \text{ bar}_g$;
- maximális robbanási konstans (deflagrációs index): $10 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \leq K_{max} \leq 800 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

Ezen kívül a lefúvóvezetékek legyenek annyira rövidek és egyenesek amennyire csak lehetséges. Kezdeti keresztmetszetükben maximum 20° -os iránytöréssel indulhatnak, és ha szükséges, a minimum 2-es r/d arányú ívet tartalmazhatnak. Keresztmetszetük egyezzen meg a lefúvókeresztmetszettel.

Az összefüggések központi gyújtás esetén 32,5 %-os relatív hibával adják vissza a [10] szerint vizsgált mérési eredményeket.

2.2. Az MSZ EN 14994 összefüggései

A gázrobbanásokra vonatkozó EN 14994 jelű szabvány [6] gázok robbanási nyomásának lefúvatása esetén a (3) és (4) ajánlásokat adja, amelyek alapját Bartknecht [12] kutatásai adják.

- Amennyiben a lefúvóvezeték hossza 3 méternél rövidebb:

$$p'_{red} = 1,24 \cdot p_{red}^{0,8614}, \quad (3)$$

- a 3 méternél hosszabb, de 6 méternél rövidebb lefúvóvezetékek esetén:

$$p'_{red} = 2,48 \cdot p_{red}^{0,5165} \quad (4)$$

amennyiben a vizsgálati paraméterek teljesítik a szabvány további előírásait. Relatív hibájuk bármely lefúvóvezeték-hosszúság esetén 27-27,5 %. [10]

A szükséges lefúvófelület számítására alkalmas összefüggések alkalmazhatósági tartománya szabadon álló, közel köbös készülékekre (a készülék hosszúság-átmérő viszonya 2-nél kisebb):

- készüléktérfogat: $V \leq 1000 \text{ m}^3$;
- lefúvófelület statikus aktivációs nyomása: $0,1 \text{ bar}_g \leq p_{stat} \leq 0,5 \text{ bar}_g$;

- maximális redukált robbanási túlnyomás: $p_{red,max} \leq 2 \text{ bar}_g$ és $p_{red,max} > p_{stat} + 0,05 \text{ bar}_g$;
- maximális robbanási konstans: $K_{max} \leq 500 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;
- a kezdeti nyomás atmoszférius.

Ezekon felül a lefúvóvezeték keresztmetszete akkora legyen mint maga a lefúvókeresztmetszet. Továbbá a lefúvóvezeték legyen annyira egyenes és rövid amennyire csak lehetséges, valamint mentes a lefúvatást gátló akadályoktól.

2.3. Az NFPA 68 szabvány összefüggései

2.3.1 Porokra vonatkozó összefüggések

Az NFPA 68 szabvány [7] Ural legújabb kutatási eredményei alapján fogalmaz meg összefüggéseket. A Russo et al. [1] kutatási eredményei szerint korábbi összefüggéssel meghatározott, emelt redukált túlnyomás értéke az esetek többségében (leginkább 4 bar_g redukált nyomás alatt) 56 %-os relatív hibával túlbecsüli a mérési eredményeket.

A lefúvóvezeték hatására megnövekedett redukált robbanási nyomás számítása helyett a jelenleg hatályos szabvány olyan lefúvófelület számítására helyezi a hangsúlyt (5), amelynek segítségével a nyomásemelkedés hatása is kiküszöbölhető.

$$A_{vf} = A_v \cdot \left(1 + 1,18 \cdot E_1^{0,8} \cdot E_2^{0,4}\right) \cdot \sqrt{\frac{K}{K_n}} \quad (5)$$

ahol az egyes tényezők (6), (7) és (8) szerint számíthatók. Az A_v lefúvófelület számításakor figyelembe kell venni a készülék hosszúság-átmérő viszonyát, a hasadóelem tehetetlenségét, valamint a szabvány által meghatározott egyéb tényezőket.

$$E_1 = \frac{A_{vf} \cdot l}{V} \quad (6)$$

$$E_2 = \frac{10^4 \cdot A_{vf}}{\left(1 + 1,54 \cdot p_{stat}^{4/3}\right) \cdot K_{st} \cdot V^{3/4}} \quad (7)$$

A lefúvóvezeték-rendszer teljes ellenállása a (8) szerint számítható:

$$K \equiv K_{inlet} + \frac{f_D \cdot l}{d} + K_{elbows} + K_{outlet} + \dots \quad (8)$$

Az f_d D'Arcy-féle súrlódási tényező általános meghatározása teljesen turbulens áramlásra:

$$f_d = \left\{ \frac{1}{\left[1,14 - 2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{d}\right)\right]} \right\}^2 \quad (9)$$

Néhány jellemző ellenállás-tényező értéket foglal össze az 1. táblázat.

1. táblázat Ellenállás-tényező értékek

Geometria	K
Készülékbe nyúló belépő keresztmetszet	2
Készülékre ültetett belépő keresztmetszet	1,5
Szabad kilépő keresztmetszet	0
90°-os kör keresztmetszetű könyökök:	
r/d = 2,75	0,26
r/d = 2,5	0,22
r/d = 2,25	0,26
r/d = 2	0,27
r/d = 1,75	0,32
r/d = 1,5	0,39

Az összefüggések kiterjedt feltételrendszer keretei között érvényesek, amelyek közül a jelentősebbek:

- kezdeti nyomás: $p_0 \leq 1,2 \text{ bar}_g$;
- maximális robbanási nyomás: $5 \text{ bar}_g \leq p_{max} \leq 12 \text{ bar}_g$
- a készülék magasság-átmérő viszonya 1 és 6 közé esik;
- készüléktérfogat: $0,1 \text{ m}^3 \leq V \leq 10000 \text{ m}^3$;
- lefúvófelület statikus aktivációs nyomása: $p_{stat} \leq 0,75 \cdot p_0$ ha $p_0 > 0,2 \text{ bar}_g$; $p_{stat} < 0,75 \text{ bar}_g$ ha $p_{stat} < 0,2 \text{ bar}_g$;
- maximális robbanási konstans: $10 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \leq K_{max} \leq 800 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

A teljes feltételrendszer a [7] szabvány 8.5.10 táblázatában érhető el, az összefüggések alkalmazása csak ezek figyelembevételével érvényes.

A módszer relatív hibája bármely lefúvóvezeték-hosszra 35,5 – 36 %. [10]

2.3.2 Gázokra vonatkozó összefüggések

Gázok és ködök robbanási nyomásának lefúvatása esetén azonban a szabvány a redukált robbanási nyomásnövekményre a (10) és (11) összefüggéseket adja, amennyiben a vizsgálati paraméterek teljesítik a szabvány további előírásait.

- Amennyiben a lefúvóvezeték hossza 3 méternél rövidebb:

$$p'_{red} = 0,779 \cdot p_{red}^{1,161}, \quad (10)$$

- Ha a lefúvóvezeték 3 méternél hosszabb, de 6 méternél rövidebb:

$$p'_{red} = 0,172 \cdot p_{red}^{1,936} \quad (11)$$

A [7] szabvány a szükséges lefúvófelület számításának különböző módjaihoz eltérően fogalmaz meg megkövetéseket. Mivel ehhez az egyes összefüggések

közlése is szükségessé válna, ezért ezeket itt nem közöljük.

Russo et al. [1] vizsgálatai alapján ez utóbbi összefüggések alulbecsülik a redukált nyomás csúcsertékét a csatorna alkalmazása esetén. A számítások relatív hibája: 44%.

2.4. Bartknecht összefüggései

Bartknecht [12] munkájában a gázokra vonatkozó (12) és (13) összefüggéseken kívül hasonló felépítésű egyenleteket adott meg porokra is.

- Amennyiben a lefúvóvezeték hossza 3 méternél rövidebb:

$$p'_{red} = 1,84 \cdot p_{red}^{0,654}, \quad (12)$$

- a 3 méternél hosszabb, de 6 méternél rövidebb lefúvóvezeték esetén:

$$p'_{red} = 3 \cdot p_{red}^{0,4776} \quad (13)$$

Ezeket az összefüggéseket azonban nem tartalmazzák az EN jelű szabványok. Relatív hibájuk 23,5%. [10]

2.5. A VDI 3673-2002 szabvány összefüggései

A VDI 3673 szabvány [9] porok esetén a (14) összefüggést adja meg.

$$\frac{p'_{red,max}}{p_{red,max}} = 1 + 17,3 \cdot \left[\frac{A_v}{V^{0,753}} \right]^{1,6} \cdot l \quad (14)$$

A VDI szerint a (15) alapján számított hossz fölött a csatorna jelenléte már nincs jelentős hatással a redukált maximális nyomásra.

$$l_s = 4,564 \cdot p_{red,max}^{-0,37} \quad (15)$$

Az összefüggés a csatornaátmérő híján megegyezik az MSZ EN szabvány által ajánlott (2) összefüggéssel. Alkalmazhatósági határai abszolút köbös készülékekre:

- készüléktérfogat: $V \leq 10000 \text{ m}^3$;
- lefúvófelület statikus aktivációs nyomása: $0,1 \text{ bar}_g \leq p_{stat} \leq 1 \text{ bar}_g$;
- maximális redukált robbanási túlnyomás: $0,1 \text{ bar}_g \leq p_{red,max} \leq 2 \text{ bar}_g$ ha $p_{red,max} > p_{stat}$;
- maximális robbanási konstans: $K_{max} \leq 500 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;
- maximális robbanási nyomás: $5 \text{ bar}_g \leq p_{max} \leq 12 \text{ bar}_g$;
- a lefúvóvezeték hossza kisebb mint l_s .

A Russo et al. [1] kutatási eredményei szerint a (14) összefüggéssel meghatározott, emelt redukált túlnyomás értéke 33 %-os relatív hibával közelíti a mérési eredményeket, központi gyújtás esetén.

Ahogy arra Russo et al. [1] is rámutatott, a lefúvóvezeték átmérője jelentős hatást gyakorol a lefúvatás közben végbemenő folyamatokra és a maximális nyomás értékére. Mivel az összefüggések az (1) és (2) összefüggésekkel mind a konstansok, mind változók tekintetében teljesen azonosak, feltételezhetjük, hogy a VDI szabványi összefüggések mindössze nyomdahibát tartalmaznak.

2.6. Kiterjesztett Yao modell (Di Benedetto et al.) modellje gázrobbanásra

Bradley és Mitcheson [13][14] munkáikban Yao elméletét kiegészítve olyan modellt dolgoztak ki lefúvatott gázrobbanásra, melynek segítségével egyszerű összefüggések felhasználásával méretezhető a szükséges lefúvófelület. Két dimenziótlan mennyiséget definiáltak: az S a lángfront előtti gázáramlás sebességének és a hangsebesség arányát fejezi ki:

$$S = \frac{S_0(E-1)}{c} \quad (16)$$

Az A paraméter a $C_d A_v$ hatásos lefúvófelület (ahol $C_d = 0,6$) és a készülék belső felületének aránya:

$$A = \frac{C_d A_v}{A_s} \quad (17)$$

A két paraméter arányához hasonlóan Molkov [15] definiálta a Bradley-számot:

$$Br = \frac{A_v}{V^{2/3}} \frac{c}{S_0 \left(E - \frac{1-1/\gamma_b}{1-1/\gamma_u} \right)} \quad (18)$$

Az úgynevezett turbulens Bradley-szám pedig:

$$Br_t = \frac{\sqrt{E}}{\sqrt[3]{36\pi}} \frac{Br}{\frac{\chi}{\mu}} \quad (19)$$

A kettő hányadosát Molkov (említve: Di Benedetto et al. [16]) a következő összefüggéssel írja le:

$$\frac{\chi}{\mu} = \alpha \left[\frac{(1+V^{1/3})(1+0,5Br^\beta)}{1+\frac{p_{stat}}{p_0}} \right]^\gamma \quad (20)$$

Az összefüggés empirikus paramétereit szénhidrogén-levegő keverékek esetén a következők: $\alpha = 1,75$, $\beta = 0,5$, $\gamma = 0,4$. Di Benedetto et al. [16] szerint a lefúvóvezetékkel történő lefúvatásra a turbulens Bradley-szám és a redukált nyomás kapcsolata a következő:

$$\frac{p'_{red}}{p_0} = \frac{1}{Br_{t,vd}^2} \quad (21)$$

A láng Reynolds-száma a (22) szerint számítható:

$$Re_F = \frac{S_0 V^{1/3} \rho}{\mu} \quad (22)$$

A fentebbiek értelmében és Lautkaski [10] vizsgálatai alapján:

$$\frac{Br_{t,vd}}{Br_t} = 0,497 Re_F^{-0,03} \cdot \left(\frac{p_{max}}{p_0} \right)^{0,432} \left(\frac{l}{d} \right)^{-0,098} \left(\frac{p_{stat}}{p_0} \right)^{-0,417} \quad (23)$$

A fentebbi empirikus összefüggések alapján a lefúvóvezeték alkalmazása melletti redukált nyomás (p'_{red}) számítható. Lautkaski [10] vizsgálatai alapján a modell relatív hibája 24 %.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben bemutatott számítási modellek és egyéb módszerek alkalmasságát a maximális redukált robbanási nyomás meghatározására a cikkek, tanulmányok, publikációk szerzői megfelelően alátámasztották munkájuk során. Legtöbbjük a megnövekedett redukált robbanási nyomás számítására alkalmas összefüggés, ám az NFPA 68 a szükség szerint megnövelt lefúvató felület számítására használatos összefüggéseket ad meg. A számítási modellek mindegyike alkalmas a lefúvóvezeték hatásának leírására.

4. JELÖLÉSJEGYZÉK

Jelölés	Megnevezés
A	dimenziótlan felület, -
A_s	készülék belső felülete, m^2
A_v	lefúvófelület, m^2
A_{vf}	szükséges lefúvófelület csatorna alkalmazása mellett, m^2
Br	Bradley-szám, -
Br_t	turbulens Bradley-szám, -
$Br_{t,vd}$	turbulens Bradley-szám, lefúvóvezeték alkalmazásával, -
c	helyi hangsebesség, m/s
C_d	lefúvási tényező, -
d	lefúvóvezeték hidraulikai átmérője, m
E	expanziós faktor, -
f_d	D'Arcy-féle súrlódási tényező teljesen turbulens áramlásra, -
K_{elbow}	könyök idom ellenállási tényezője, -
K_{inlet}	csatorna belépő keresztmetszet ellenállási tényezője, -
K_{max}	robbanási konstans, $bar \cdot m \cdot s^{-1}$

K_{outlet}	csatorna kilépő keresztmetszet ellenállási tényezője, -
K_{st}	robbanási konstans por közegre, $\text{bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
l	lefűvővezeték hossza, m
l_s	hangsebességhez tartozó lefűvővezeték-hossz, m
$(l/d)_s$	hangsebességhez tartozó l/d viszony, -
p_0	kezdeti nyomás, bar_g
p_{max}	maximális robbanási nyomás zárt térben, bar_g
p_{red}	redukált robbanási túlnyomás, bar_g
$p_{\text{red,max}}$	maximális redukált robbanási túlnyomás, bar_g
p'_{red}	redukált robbanási túlnyomás lefűvővezeték alkalmazásával, bar_g
$p'_{\text{red,max}}$	maximális redukált robbanási túlnyomás lefűvővezeték alkalmazásával, bar_g
p_{stat}	hasadóelem statikus aktivációs nyomása, bar_g
r	lefűvővezeték hajlítási sugara, m
Re_f	láng Reynolds-száma, -
S	lángfront előtti gázáramlás sebességének és a helyi hangsebesség viszonya, -
S_0	lángterjedési sebesség, m/s
V	készülék térfogata, m^3
α, β, γ	empitikus konstansok, -
γ_b, γ_u	elégett és el nem égett közeg izentropikus kitevője, -
ε	felületi érdesség, -
η	levegő dinamikai viszkozitása, Pas
μ	lefűvási együttható, -
ρ	levegő sűrűsége, kg/m^3
χ	lángfront ráncolódási együtthatója a lefűvőnyílás közelében, -

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikkben ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

6. IRODALOM

[1] P. RUSSO, A. DI BENEDETTO: Effects of a Duct on the Venting of Explosions – Critical Review, *Trans IChemE*, Vol. 85 (B1), pp. 9-22, doi:10.1205/psep.04268

- [2] B. PONIZY, J. C. LEYER: Flame Dynamics in a Vented Vessel Connected to a Duct: 1. Mechanism of Vessel-Duct Interaction, *Combustion and Flame*, Vol. 116 (1999), pp. 259-271, doi: 10-2180/99/\$19.00
- [3] W. KORDYLEWSKI, J. WACH: Influence of Ducting on Explosion Pressure: Small Scale Experiments, *Combustion and Flame*, Vol. 71. (1988), pp. 51-61.
- [4] H. P. SCHILDBERG: Gas Phase Detonations: Effective Pressures Acting on the Walls of the Enclosures and Probability of Deflagration-to-Detonation Transition to Pipes, Vessels and Packings, *Lecture on the occasion of the award of the EPSC price for Process Safety 2018*, Tuesday, 12th June 2018.
- [5] W. BARTKNECHT: *Explosions*, Springer-Verlag, Berlin, 1981., ISBN 978-3-642-67749-6
- [6] EN 14994-2007 szabvány: Gas Explosion Venting Protective Systems
- [7] NFPA 68-2002 szabvány: Guide for Venting of Deflagrations
- [8] MSZ EN 14491-2006 szabvány: *Dust Explosion Venting Protective Systems*
- [9] VDI 3673-2002 szabvány: Pressure Release of Dust Explosions
- [10] R. LAUTKASKI: *Duct venting of gas explosions. Revision of two proposed engineering correlations*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol.25 (2012), pp.400-413.
- [11] R. K. ECKHOFF: Differences and similarities of dust and gas explosions: A critical evaluation of the european 'ATEX' directives in relation to dusts, *Journal of Loss Prev. in the Proc. Ind.*, Vol. 19 (2006), pp. 553-560.
- [12] W. BARTKNECHT: *Explosionsschutz, Grundlagen und Anwendung*, Springer (Berlin), 1993., pp. 470-535.
- [13] D. BRADLEY, A. MITCHESON: *The venting of gaseous explosions in spherical vessels. I -Theory*, Combustion and Flame, Vol. 32 (1978), pp. 221-236
- [14] D. BRADLEY, A. MITCHESON: *The venting of gaseous explosions in spherical vessels. II -Theory and Experiment*, Combustion and Flame, Vol. 32 (1978), pp. 237-255
- [15] V. V. MOLKOV: Explosion Safety Engineering: NFPA 68 and improved vent sizing technology, *Interflam '99. Proceedings of the 8th International Fire Science & Engineering Conference, Edinburgh, 29 June – 1 July 1999*, pp. 1129-1134
- [16] A. DI BENEDETTO, P. RUSSO, E. SALZANO: *The Design of Duct Venting of Gas Explosions*, Wiley InterScience, 2007. nov. 19., doi: 10.1002/prs.10239