

## Por- és gázrobbanásokkal kapcsolatos vizsgálatok alapjai és tapasztalatai

**Mikáczó Viktória**

tanársegéd, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet  
Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [mikaczo.viktoria@uni-miskolc.hu](mailto:mikaczo.viktoria@uni-miskolc.hu)

**Szepesi L. Gábor**

egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet  
Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [szepesi@uni-miskolc.hu](mailto:szepesi@uni-miskolc.hu)

### **Absztrakt**

*Az ipari környezetben kialakuló por- és gázrobbanások számos veszélyt hordoznak magukban, amelyek következményeinek súlyossága lefúvásos védelemmel mérsékelhető. A szerkezetekben ekkor kialakuló redukált nyomás értéke nehezen jelezhető előre, hiszen a lejátszódó fizikai-kémiai folyamatok rendkívül összetettek. A lefúvóvezetékkel kiegészített hasadófelületek robbanást mérséklő hatása még ennél is bizonytalanabb, a mérnöki gyakorlatban pedig a szabványi számításoktól eltérő megoldásokra is igény mutatkozik. Jelen cikk a tématerület alapjait és a szerzők korábbi kutatásainak tapasztalatait foglalják össze. Megjelenésének célja, hogy segítséget nyújtson azok számára, akik jelenleg csak ismerkednek a szakterülettel, ám további kutatásokat szeretnének végezni a témában.*

**Kulcsszavak:** porrobbanás, gázrobbanás, lefúvatás, lefúvóvezeték, szabvány

### **Abstract**

*Dust and gas explosions carry numerous hazards in industrial environments, however their consequences can be mitigated by venting. The value of the reduced pressure in the structures is difficult to predict, as the physicochemical processes are complex during venting. The explosion-reducing effect of rupture surfaces supplemented with a vent duct is even more uncertain. In engineering practice there is a need for solutions that differ from calculations of standards. This article summarizes the basics of the topic and the experiences of the authors' previous research.*

**Keywords:** dust explosion, gas explosion, venting protection, vent duct, standard

### **1. Bevezetés**

Amennyiben valamely ipari környezetben a por- vagy gázrobbanás zárt térben következik be, a kialakuló nyomás értéke lefúvatással redukálható. Ekkor 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. A redukált nyomás számítására a lefúvásos védelemre vonatkozó szabványok [1 – 4] tartalmazznak összefüggéseket, ám alkalmazásuk szigorú feltételekhez kötött, amely a gyakorlatban nem minden esetben tartható.

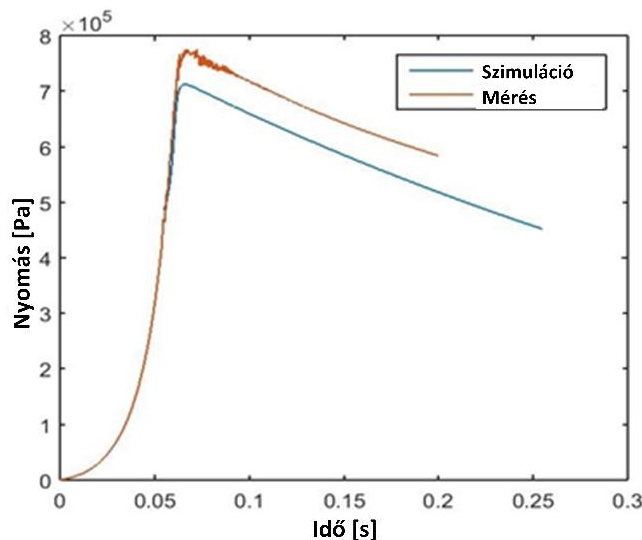
## 2. Zárt térben végbemenő gázrobbanások modellezése

### 2.1 Reakciókinetikai modellek

A különböző gázkeverékek oxidációja során számos részreakció megy végbe egyidejűleg. Ezek mindegyikéhez egyedi reakciósebességi állandó tartozik, melyek számítására vonatkozó összefüggések paraméterei a rendszer hőmérsékletétől és nyomásától is nagyban függenek, így a robbanás során dinamikusan változnak. [5] A reakcióegyenletek száma különböző megfontolásokkal redukálható, így egyszerűbbé téve a megoldást.

### 2.2 Egy-egyenlet modellek

Az egy-egyenlet modellek az egyensúlyi reakcióegyenletet veszik alapul, majd erre vonatkozóan határozzák meg a tüzelőanyag-fogyás mértékét. A Westbrook-féle egy-egyenlet modell [6] alkalmazhatóságát 5 térfogat %-os propán-levegő keverék esetén vizsgáltuk [7] munkánkban, amelynél teljesen előkevert állapotot feltételeztünk. Az egyes komponensek koncentráció-változásainak differenciálegyenleteit felírva számítottuk azok pillanatnyi mennyiségét. Az eredeti modell a számítás során a nyomás változását nem vette figyelembe. Számításaink során a modellt módosítottuk, a nyomásváltozást figyelembe vettük. Eredményeinket zárt kamrában elvégzett méréseinkkel összehasonlítva az 1. ábra szemlélteti.



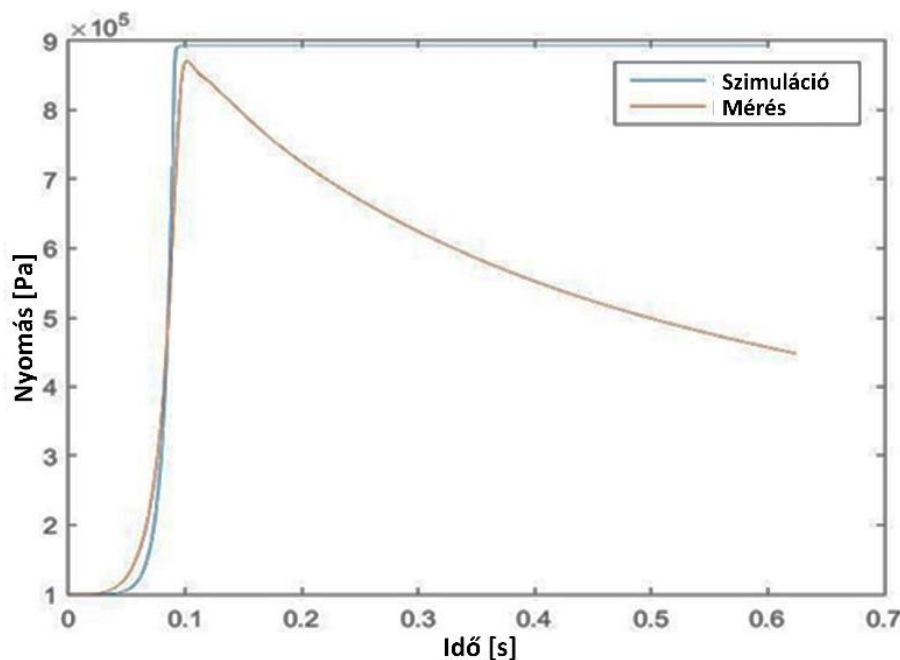
1. ábra. Egy-egyenlet modellel végzett zártterű szimuláció és mérés összehasonlítása (a nyomásértékek túlnyomásban vannak feltüntetve)

Míg a mérések során fellépő maximális nyomás értéke  $7,75 \text{ bar}_g$  volt, a szimuláció  $7,15 \text{ bar}_g$  nyomásmaximumot adott. Összehasonlításképpen, Huzayyin et al. [8] mérései szerint ugyanilyen koncentrációknál a maximális robbanási nyomás értéke  $7,2 \text{ bar}_g$ . Ahogyan az az ábrából is látható, a szimulált nyomásemelkedési görbe kezdeti szakasza hiányzik, ugyanis a számításokat előkevert állapotú közeggel végeztük el, ezért a reakció beindulásához a tér minden pontjában azonosan magas gyújtási hőmérsékletre volt szükség, amely magasabb kezdeti nyomást eredményezett a térben. Így a modell ezen formájában a lefúvatott robbanások modellezésére nem bizonyult alkalmasnak.

## 2.3 Fenomenologikus modellek

A fenomenologikus modellek egyszerűsített fizikai modellek, ezek a robbanás szempontjából a leginkább szükséges fizikai paramétereket tartalmazzák. Vizsgálataink során [9] zárt terű robbanási folyamat modellezésére a Chippett [10] által kidolgozott fenomenológiai modell módosított változatát alkalmaztuk. Az eredményeket értékelésük során általunk végzett mérési eredményekkel hasonlítottuk össze.

A [10] alapján felállított egyenletrendszer megoldása 5 térfogat %-os összetételű propán-levegő keverék zárt terű mérési eredményeivel lettek összehasonlítva. A robbanási nyomásemelkedés görbáját a 2. *ábra* szemlélteti. A diagramon megfigyelhető, hogy a szimulált görbe az emelkedő szakaszán jól követi a mérési eredményeket, azonban a maximumérték elérése után elválnak attól, konstans marad. Ennek oka a kamra falán keresztüli hőenergia-transzport elhanyagolásában keresendő.



2. *ábra.* Mérési és szimulációs eredmények összehasonlítása 5 térfogat % összetételű propán-levegő keverék esetén (a nyomásértékek abszolút nyomásban vannak feltüntetve)

## 3. A lefűvások védelem számítási módszerei

A megfelelő lefűvást ellátó hasadófelületek által redukált nyomásértékek meghatározására alkalmazhatók a már jól ismert szabványi összefüggések:

- az MSZ EN 14491 [1] porrobbanásokra,
- az EN 14994 [2] gázrobbanásokra,
- az NFPA 68 [3] porrobbanásokra és gázrobbanásokra,
- a VDI 3673 [4] porrobbanásokra és gázrobbanásokra

vonatkozó összefüggései. Az összefüggések olyan neves tudósok munkáit és modelljeit foglalják össze, mint például Bartknecht, Molkov és Ural. Mivel ezek az összefüggések a jelölt szabványokban elérhetők, így ezeket jelen cikkben nem részletezzük.

#### 4. Lefúvóvezetékekkel történő lefúvatás

A lefúvóvezetékek ugyan biztonságosan elvezetik a megfelelő anyagmennyiséget és a robbanás energiáját, ám ellenállásuknál fogva megakadályozhatják a robbanási nyomás kielégítő mérséklését. [4] A gyakorlatban a következő, a lefúvatást akadályozó jelenségek lépnek fel [11][12]: súrlódási veszteségek [13][14]; a csatornában lévő gázoszlop tehetetlensége [13]; „burn-up” a csatornában (utánégés vagy másodlagos robbanás) [11][14][15]; akusztikus oszcillációk [12]. Csatorna alkalmazásakor, elegendően nagy hosszok esetén a csatornában áramló közeg sebessége meghaladhatja a hangsebességet és a lángterjedés átléphet detonációba. [16] Ezért a csatornahosszt ajánlott 10 m alatt tartani. Amennyiben ez nem oldható meg, annak ellenállóképességét legalább 10 bar<sub>g</sub> értékűre szükséges tervezni. [17]

##### 4.1 Bartknecht modellje

Bartknecht [17] számítási összefüggéseit alkalmazza az EN 14994 szabvány is. A maximális redukált robbanási túlnyomás értéke 3 méretnél rövidebb csatorna esetén:

$$P_{red,vd} = 1,24 \cdot P_{red}^{0,8614} \quad (1)$$

Valamint  $3m < L_d \leq 6m$  hosszúságú csatorna esetén:

$$P_{red,vd} = 2,48 \cdot P_{red}^{0,5165} \quad (2)$$

Porrobbanásokra hasonló szerkezetű összefüggéseket alkotott, 3 m-nél rövidebb csatorna esetén (ezen összefüggések már nem szerepelnek az EN 14994 szabványban):

$$P_{red,vd} = 1,84 \cdot P_{red}^{0,654} \quad (3)$$

Valamint  $3m < L_d \leq 6m$  hosszúságú csatorna esetén:

$$P_{red,vd} = 3,00 \cdot P_{red}^{0,4776} \quad (4)$$

##### 4.2 Bradley és Mitcheson összefüggései

Bradley és Mitcheson [18] munkájuk során az alábbi dimenziótlan mennyiségeket definiálták. Az  $S$  dimenziótlan mennyiség a lángfront előtti gázáramlás sebességének és a hangsebesség arányát fejezi ki, az  $A$  pedig a  $C_d A_v$  hatásos lefúvófelület (ahol  $C_d = 0,6$ ) és a készülék belső felületének aránya:

$$S = \frac{S_0(E-1)}{c}, \quad A = \frac{C_d A_v}{A_s} \quad (5)$$

ahol  $E$  az expanziós faktor. Ezek arányához hasonlóan Molkov [15] definiálta a Bradley-számot:

$$Br = \frac{A_v}{v^{2/3}} \frac{c}{S_0 \left( E - \frac{1-\gamma_b}{1-\gamma_u} \right)} \quad (6)$$

ahol  $c$  a hangsebesség;  $\gamma$  az egyes közegek izentropikus kitevője. A turbulens Bradley-szám pedig:

$$Br_t = \frac{\sqrt{E}}{\sqrt[3]{36\pi}} \frac{Br}{\frac{\chi}{\mu}} \quad (7)$$

ahol  $\chi$  a lángfront turbulenciának és áramlásnak köszönhető ráncolódása a lefűvónyílás közelében;  $\mu$  egy általánosított lefűvási együttható. A kettő hányadosát Molkov (említve: Di Benedetto et al. [19]) a következő összefüggéssel írja le:

$$\frac{\chi}{\mu} = \alpha \left[ \frac{(1+V^{1/3})(1+0,5Br\beta)}{1+\frac{P_{stat}}{P_0}} \right]^\gamma \quad (8)$$

ahol  $P_{stat}$  a hasadófelület nyitónyomása,  $P_0$  a kezdeti nyomás. Az  $\alpha = 1,75$ ,  $\beta = 0,5$ ,  $\gamma = 0,4$  szénhidrogén-levegő keverékek esetén. A lefűvővezetékkel történő lefűvítésre a turbulens Bradley-szám ( $Br_{t,vd}$ ) és a redukált nyomás ( $P_{red,vd}$ ) kapcsolata a következő:

$$\frac{P_{red,vd}}{P_0} = \frac{1}{Br_{t,vd}^2} \quad (9)$$

A fentebbieket figyelembe véve Lautkaski [20] vizsgálatai alapján a lefűvővezeték alkalmazása melletti redukált nyomás ( $P_{red,vd}$ ) számítható:

$$\frac{Br_{t,vd}}{Br_t} = 0,497Re_f^{-0,03} \left( \frac{P_{max}}{P_0} \right)^{0,432} \left( \frac{L_d}{D_d} \right)^{-0,098} \left( \frac{P_{stat}}{P_0} \right)^{-0,417} \quad (10)$$

### 4.3 Ural módszere

Az NFPA 68 szabvány Ural [21] módszerének alapján rendelkezik. A szükséges lefűvőfelület nagysága  $L/D \leq 2$  esetén:

$$A_v = 10^{-4} \left( 1 + 1,54P_{stat}^{4/3} \right) K_{St} V^{3/4} \sqrt{\frac{P_{max}}{P_{red}} - 1} \quad (11)$$

A 2-nél nagyobb  $L/D$  arányú szerkezetekre a következő, módosított összefüggés használható:

$$A_{v1} = A_v \left[ 1 + 0,6 \left( \frac{L}{D} - 2 \right)^{0,75} \cdot \exp(-0,95P_{red}^2) \right] \quad (12)$$

A szükséges lefűvőfelület, amennyiben lefűvató csatorna is tartozik a rendszerhez, a következőképpen határozható meg:

$$A_{v,vd} = A_{v1} \left( 1 + 1,18E_1^{0,8} E_2^{0,4} \right) \sqrt{\frac{\sum_i \zeta_i}{1,5}} \quad (13)$$

ahol  $A_{v1}$  a lefűvató csatorna nélküli szerkezet biztosításához szükséges lefűvőfelület nagysága (kiszámítva (11) vagy (12) alapján);  $\sum_i \zeta_i$  pedig a csatornák áramlási ellenállás tényezője. Az összefüggésben szereplő  $E_1$  és  $E_2$  dimenziótlan mennyiségek:

$$E_1 = \frac{A_v L_d}{V}; E_2 = \frac{10^4 A_v}{K_{St} (1 + 1,54P_{stat}^{3/4}) V^{3/4}} \quad (14)$$

A  $\sum_i \zeta_i$  áramlási ellenállások összegének meghatározása teljesen érdes csőben történő áramlás alapján történik, melyben a sűrűlási tényező csak a csatorna felületének  $\epsilon$  felületi érdességétől függ.

$$\sum_i \zeta_i = 1,5 + \frac{L_d/D_d}{\left[ 1,14 + 2lg\left(\frac{D_d}{\epsilon}\right) \right]^2} + 0,35n_{45} + 1,12n_{90} \quad (15)$$

ahol értelemszerűen  $n_{45}$  és  $n_{90}$  a  $45^\circ$  és  $90^\circ$ -os ívek száma.

## 5. Összefoglalás

Jelen cikkben a szerzők betekintést nyújtottak a zárt terű, valamint a lefűvóvezeték nélkül és annak alkalmazásával lefűvatott robbanások modellezési lehetőségeibe, a rendelkezésre álló szabványi megoldásokon kívül. Ezen felül a zárt terű gázrobbanások modellezésével kapcsolatos eredményeik is említésre kerültek, amelyekből leszűrhetőek az alkalmazott módszerek korlátai és lehetőségei.

## 6. 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.

## Irodalom

- [1] MSZ EN 14491-2006 szabvány: *Dust Explosion Venting Protective Systems*
- [2] EN 14994-2007 szabvány: *Gas Explosion Venting Protective Systems*
- [3] NFPA 68-2018 szabvány: *Guide for Venting of Deflagrations*
- [4] VDI 3673-2002 szabvány: *Pressure Release of Dust Explosions*
- [5] Titova, N., Kuleshov, P., Starik, A.: *Kinetic mechanism of propane ignition and combustion in air*, Combustion Explosion and Shock Waves, Vol. 47 (2011) pp. 294-264.  
<https://doi.org/10.1134/S0010508211030014>
- [6] Westbrook, C., Dryer, F.: *Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames*, Combustion Science and Technology, Vol. 27 (1981) pp. 31-43.  
<https://doi.org/10.1080/00102208108946970>
- [7] Mikáczó, V., Szepesi, L. G., Siménfalvi, Z.: *Simulation of propane explosion in closed vessel*, Annals of Faculty Engineering Hunedoara, Vol. 15 (2017) pp. 49-54.
- [8] Huzayyin, A. S., Monieb, H. A., Shehatta, M. S., Attia, A. M. A.: *Laminar burning velocity and explosion index of LPG-air and propane-air mixtures*, Fuel, Vol. 87 (2008) pp. 39-57.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.04.001>
- [9] Mikáczó, V., Szepesi, L. G.: *Phenomenological modeling of gas explosion in closed vessel*, MultiScience - XXXIII. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, Miskolc (2019) pp. 1-9. Paper: D3-4, 9 p. <https://doi.org/10.26649/musci.2019.047>
- [10] Chippett, S.: *Modeling of vented deflagrations*, Combustion and Flame, Vol. 55 (1984), pp. 127-140. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(84\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0010-2180(84)90022-1)
- [11] Ponizy, B., Leyer J. C.: *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.  
[https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(98\)00038-8](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(98)00038-8)
- [12] Kordylewski, Wach, W. J.: *Influence of ducting on explosion pressure: Small scale experiments*, Combustion and Flame, Vol. 71. (1988), pp. 51-61.  
[https://doi.org/10.1016/0010-2180\(88\)90105-8](https://doi.org/10.1016/0010-2180(88)90105-8)
- [13] Wiekema, B., Pasman, H., Groothuizen, T.: *The effect of tubes connected with pressure relief vents*, Proceedings of the Second International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, 1977.

- [14] Yang, F., Guo, J., Wang, C., Lu, S.: *Duct-vented hydrogen{air deagratons: The effect of duct length and hydrogen concentration*, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 43, No. 45 (2018), pp. 21142-21148. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.074>
- [15] Molkov, V. V.: *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] Schildberg, H. P.: *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.
- [17] Bartknecht, W.: *Explosions*, Springer-Verlag, Berlin, 1981., ISBN 978-3-642-67749-6
- [18] Bradley, D., Mitcheson, A.: *The venting of gaseous explosions in spherical vessels. I -Theory*, Combustion and Flame, Vol. 32 (1978), pp. 221-236.  
[https://doi.org/10.1016/0010-2180\(78\)90098-6](https://doi.org/10.1016/0010-2180(78)90098-6)
- [19] Di Benedetto, A., Russo, P., Salzano, E.: *The design of duct venting of gas explosions*, Process Safety Progress, (2008) pp. 164-172. <https://doi.org/10.1002/prs.10239>
- [20] Lautkaski, R.: *Duct venting of gas ecplosions. Revision of two piposed engineering correlations*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 25 (2012), pp. 400-413.  
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.09.009>
- [21] Ural, E.: *Dust explosion venting through ducts*, 2005 AIChE Spring National Meeting, Conference Proceedings, pp. 3985-4019.