

MISKOLCI EGYETEM



GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR

VEGYIPARI GÉPÉSZETI INTÉZETI TANSZÉK

LEFÚVÓVEZETÉK HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA TÖLTETROBBANÁS

HASADÓPANELES VÉDELME ESETÉN

Investigation of the relief pipe's effect in case of vented explosion

KÉSZÍTETTE:

Mikáczó Viktória

KONZULENS:

Dr. Szepesi L. Gábor

egyetemi docens

Miskolci Egyetem

Gépészmérnöki és Informatikai kar

Vegyipari Gépek Tanszéke

Miskolc, 2014.

Tartalom

Tartalom	2
Bevezetés.....	3
Porok tulajdonságai	4
Porok égési és robbanási viselkedése	5
Felkavart porok biztonságtechnikai jellemzői	6
A porrobbanás veszélyének kezelése	7
A védelem megoldásai	8
Robbanás elvezetése a szerkezetekből	9
Nyomást lefűvató készülékek: hasadópanelek és -tárcsák	9
MSZ EN 14491: Szellőzőnyílásos porrobbanás-védelmi rendszerek	10
Általános összefoglaló.....	10
Szerkezetek lefűvátása	11
Lefűvató felületek méretezése	12
Szabadon álló szerkezetek védelme	12
Lefűvató csatornák hatása	13
A lefűvátott egységek deformációja	16
NFPA 68: Útmutató a tűzesetek elvezetéséhez	17
Általános összefoglaló.....	17
A robbanások elvezetésének alapjai	18
Porok és hibrid keverékek robbanásának elvezetése	20
Lefűvató csatornák hatása	21
VDI 3673: Porrobbanások nyomásterjedése	22
Általános összefoglaló.....	22
Nyomáslefűvató szerkezetek méretezése	25
Köbös tartályok	26
Visszaható erők figyelembe vétele.....	27
Lefűvató csatornák hatása robbanáselvezetés során.....	27
Hasadótárcsák és lefűvató elemek.....	27
Lefűvató csatornák tervezése	29
Por robbanási tulajdonságainak meghatározása	29
Numerikus modellek	34
Navier-Stokes egyenlet.....	37
Időátlagolt Navier-Stokes egyenlet (RANS)	39
Modellezés	41
Összefoglalás, további távlatok	45
Források.....	46

Bevezetés

Az ipar szinte minden egyes területén előfordulnak robbanóképes porok: az élelmiszeripartól kezdve a gyógyszeriparon át a faiparig mindenütt találunk robbanásveszélyes porforrásokat. Az iparban használatos porok több mint 70%-a robbanásveszélyes. Számos finomszemcsés anyag, mint például a szén, fa, liszt, cukor, stb. is robbanóképes, amennyiben annak pora megfelelő koncentrációban található meg a levegőben, és az égéshez szükséges gyújtóforrás is jelen van. Baleset bekövetkezése esetén nem csak az anyagi kár jelentős, hanem számos esetben követel emberéleteket is. Tehát a tűz és a robbanás elkerülése mindenképpen szükséges, ámde nehéz feladatot jelent.

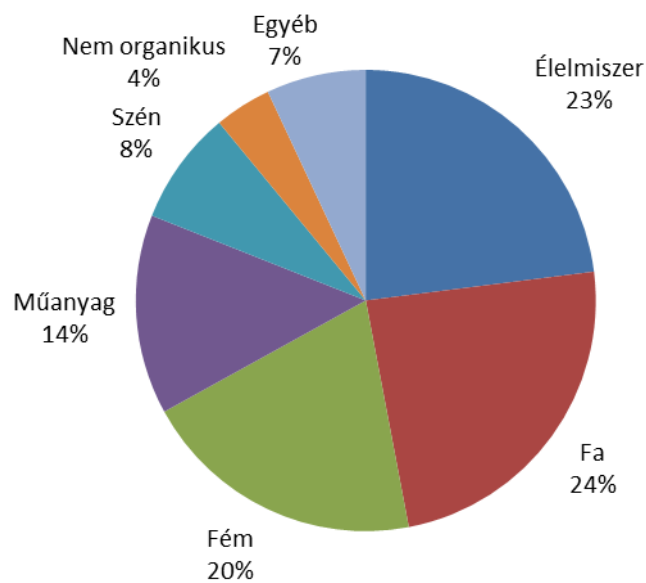
Éppen ezért fontos megismerni az egyes felhasznált porok égési és robbanási tulajdonságait. A robbantókamrás kísérletekkel meghatározott porrobbanási karakterisztikák a későbbiekben jó alapot adnak az azokkal kapcsolatba kerülő berendezések biztonsági és szilárdsági méretezéséhez. A robbanás közbeni nyomásemelkedés mértékéből meghatározhatóak az adott berendezésre előírt hasadófelület- és lefúvató csatorna-méretek, melyekre más-más országok szabványai szerint más-más előírások vonatkoznak. További érdekes kérdéseket vetnek föl a különböző szabványok szerinti eltérések. Vizsgálataim kiterjednek a magyar, német, és amerikai nemzeti szabványokra, valamint egy, már megtörtént ipari baleset elemzésére, és a védelem, lehetséges alternatíváira is.

Az egyes szabványok a lefúvató csatornák geometriájára vonatkozóan is eltérően rendelkeznek. A kialakítás főleg a robbanás során fellépő, a csatornára ható erők és nyomatékok függvénye. Mivel az egyes berendezések nagy részére csak a telepítés után kerül föl a védelem, így gyakran a lefúvató csatornák alakját a környezet beépítettsége is meghatározza. Ám sokszor a lehetőségek adta csatorna-alak a szabványi korlátozások miatt mégsem valósítható meg. A kérdés, hogy az a lefúvató csatorna alak amely az egyik szabvány szerint megfelel, viszont a másik már nem engedélyezi, valójában képes lenne-e elviselni a fellépő terhelést (tehát az eltérés csak a szabványi ráhagyásból következik), vagy egyáltalán nem jelent biztonságos védelmet? Kísérleti eredményekkel validált számítógépes szimulációk segítik az eligazodást a különböző nemzetek szabványi korlátozásai közt.

Porok tulajdonságai

A porok tulajdonságai lényegesen különböznek azoktól az anyagokétól, amelyekből képződnek. Ennek alapvető oka, hogy ugyanazon anyaghoz porképzéskor nagyságrendekkel nagyobb felület tartozik, amely felületen az oxidáció intenzitása is lényegesen nagyobb, így egyetlen porszemcse felizzásakor egy láncreakció indulhat. Elsődleges robbanásveszély lebegő porok esetén alakul ki, mert ilyenkor lehet jelen a robbanáshoz szükséges por-levegő keverék. A leülepedett por ilyen szempontból veszélytelen, viszont óriási másodlagos veszélyt rejt magában, hisz egy robbanás a leülepedett port is felkeverheti. [1]

A porfelhő számos esetben tartályokban, silókban vagy egyéb műveleti berendezésekben van jelen, amelyben az esetleges robbanás során hirtelen nyomásnövekedés következik be. Amennyiben ezek a porkezelő létesítmények nincsenek ellátva megfelelő védelemmel, a robbanás súlyos károkat tehet bennük.



1. ábra Robbanást okozó porok megoszlása 1980 és 2005 között, 281 db bekövetkezett balesetet vizsgálva [2]

A veszély, amelyet maga a robbanás hordoz magában, szintén számos tényezőtől függ.

1. Maga a por: a porok robbanóképessége nagyban befolyásolja a robbanás erősségét.
2. A por összetétele: a robbanás erőssége annál nagyobb, minél több illékony összetevőt tartalmaz maga a por.
3. A részecskeméret, és a részecskeméret eloszlása: a finomabb részecskék nagyobb fajlagos felületet jelentenek, amely jobban kedvez a robbanásnak is.
4. Az eloszlatott por koncentrációja: amennyiben a koncentráció az alsó robbanási határ alatt marad, ami általában $10\text{-}100\text{ g/m}^3$ körül alakul, a robbanás nem következik be. A robbanás erőssége a koncentrációval arányosan növekszik az optimális koncentráció eléréséig. Ennél magasabb koncentrációk esetén a robbanás ereje csökken vagy stagnál.
5. Nedvességtartalom: a robbanás ereje a por nedvességtartalmával fordított arányban változik. Egy bizonyos pont felett a por már nem robbanóképes.
6. Környezeti hőmérséklet és nyomás: adott porkoncentráció esetén a magasabb környezeti hőmérséklet-értékek a maximális robbanási nyomás értékeire nagyon kis hatással vannak. Ha a környezeti nyomás emelkedik, a maximális robbanási nyomás és a nyomásemelkedés értéke is nő.
7. A porfelhő keveredése: alacsony keveredettséű porfelhő esetén a robbanás viszonylag gyenge, míg magas keveredettségi szint esetén a robbanás sokkal gyorsabban és erőszakosabban terjed.
8. Éghető gázok jelenléte: az éghető gázok jelenléte növeli a robbanás erősségét.
9. A tartály mérete: a nyomásemelkedés lassabb mértékű a nagyobb tartályokban, azonban a pusztítás mértéke is nagyobb a maximális robbanási nyomás miatt. Az egyik legáltalánosabb törvény a köbös törvény, amely leírja a robbanási nyomás és a tartály térfogata közti kapcsolatot. [3]

Porok égési és robbanási viselkedése

Robbanásnak nevezzük azt az exoterm kémiai folyamatot, mely egy véges térfogatban következik be hirtelen és jelentős nyomásnövekedés kíséretében. [4] Az ilyenkor tapasztalható léglökéshullám okozta hőmérséklet-emelkedés váltja ki a gyújtást, ezért a láng terjedési sebessége közel állandó.

Felkavart porok biztonságtechnikai jellemzői

A por felkavarodása esetén robbanásra lehet számítani, ha a por/levegő keverékben gyulladás után heves nyomásnövekedéssel járó lángterjedés következik be. Az ilyen reakciók lényegesen gyorsabban mennek végbe, mint a tüzek. Sok esetben a porrobbanási képességet laboratóriumi körülmények között különféle gyújtóforrásokkal állapítjuk meg: elektromos szikra, a láng, vagy az izzó huzal.

A robbanási határértékek jellemzik a porok levegővel képződött keverékében kialakuló azon koncentrációs tartományát, amelyen belül robbanás történhet. Általában az alsó robbanási határt határozzuk meg, ügyelve arra, hogy különböző vizsgálati eljárások különböző eredményekhez vezethetnek. A por/levegő keverékek alsó robbanási határértékét szintén kísérleti úton, robbantásos kísérletekkel határozzuk meg.

A robbanási nyomás és a (dp/dt) időbeli nyomásnövekedés (nyomásemelkedés sebessége) határozzák meg azt a hevésséget, amellyel a tetszőleges koncentrációjú por/levegő keverék gyulladás esetén reagál. A maximális értékek a széles koncentrációtartományban végzett vizsgálatokból állapíthatók meg. A maximális robbanási nyomást megfelelő méretű, közel gömb alakú zárt robbantókamrában vizsgáljuk. A maximális időbeni nyomásnövekedés térfogatfüggő. Minél nagyobb a térfogat, a köbös törvény szerint annál kisebb a maximális időbeni nyomásnövekedés.

Amennyiben a lerakódott porréteget felkavarják (pl. a szél, nyomáshullám, sűrített levegő sugár stb.), akkor robbanóképes por/levegő keverékek képződhetnek. Az ilyen por/levegő keverék esetleges meggyulladásakor keletkező nyomáshullám további port kavarhat fel, és ez a káresemények kapcsán gyakran megfigyelt heves szekunder robbanást idézhet elő.

Vannak olyan porok is, amelyek nem éghető anyagokból képződnek, azonban drasztikusan megnövekedett fajlagos felületük és oxidációra való hajlamuk miatt robbanóképesek. Ezek többnyire fémek és fémötvözetek porai. Robbanási jellemzői az éghető porokéhoz hasonlóan változnak, főként a szemcseméret függvényében. A porrobbanások esetében igen sokszor azonban nem tisztán por/levegő keverékkel van dolgunk, hanem különböző hibrid-keverékekkel, amelyek valamilyen éghető gázt, vagy gőzt is tartalmaznak a por mellett. Ezek a keverékek azért sokkal veszélyesebbek, mint a tisztán por/levegő keverékek, mert a gyulladást a gyújtásra sokkal érzékenyebb gáz/gőz keveréke kezdi, majd az így keletkező energia a lényegesen nagyobb energiaszinttel gyújtható porkeveréket is képes

begyűjtani – emellett a már leülepedett port is felkeverve komoly másodlagos robbanást képes előidézni.

A porrobbanás veszélyének kezelése

A robbanásveszély megfelelő kezelésének két alappillére a megelőzés és a védelem. Amennyiben lehetséges, meg kell előzni a robbanóképes atmoszféra kialakulásának lehetőségét. Mint például:

- Az éghető anyagokat nem-éghetőekkel helyettesíteni.
- Az anyagoknál minél kisebb porképződéssel járó alternatívákat választani, és minimalizálni a kopást.
- A képződő porfelhő méretét minimalizálni.
- Elkerülni a porfelhalmozódást.
- Elkerülni a robbanóképes porkoncentrációkat.
- A folyamatot inert atmoszférába helyezni.
- Ki kell küszöbölni a lehetséges gyújtóforrásokat és megszüntetni azokat, amennyiben ez az észszerűség határain belül lehetséges.

Védelmet kell biztosítani a lehetséges legkedvezőtlenebb hatásokkal szemben; valamint a robbanás bekövetkezése esetén a robbanási nyomáshullámokat és a lángot biztonságos méretek közt kell tartani:

- Behatárolás – a tartályokat és a készülékeket úgy kell megépíteni, hogy ellenálljanak a robbanás nyomáshullámainak és a keletkező lángnak.
- Elkülönítés – a robbanásnak elkülönültnek kell lennie a porkezelő szerkezetek többi részétől azért, hogy a káros hatásokat mérsékeljük.
- Elfojtás – fojtóanyagot fecskendezni a robbanás központi helyére, hogy a robbanási nyomást olyan alacsonyan tartsuk amennyire csak lehetséges.
- Elvezetés – gyengített elemek a létesítmények falán. A robbanás fő ereje a nyílt légtérbe távozik.
- A létesítmény legmegfelelőbb helyének kiválasztása. [3]

A védelem megoldásai

A szerkezetek védelmére a következő megoldások állnak rendelkezésre:

1. Robbanásálló építési mód: a berendezés szerkezeti kialakítása biztosítja robbanás esetén a belső robbanás elviselését tönkremenetel nélkül. Kétféle kivitelben készülhetnek:

- Robbanási nyomásnak ellenálló kivitel: a legnagyobb robbanási nyomásra méretezve.
- Robbanási nyomáshullámnak ellenálló kivitel: a redukált robbanási nyomásra méretezve és összekapcsolva a nyomásleeresztés, vagy a robbanáselfojtás megoldásaival.

2. Robbanási nyomás lefúvatása: eszközei a hasadótárcsák, hasadóapanelek és a robbanóajtók. A méretezésük a megnyílási nyomásra történik. A redukált robbanási nyomás értékének számítása a berendezés nyomásállóságát figyelembe véve a megnyílási nyomásérték és a nyíló felület nagyságának ismerete alapján történik.

Alkalmazásukkal kétféle cél valósítható meg:

- A berendezések szükségtelen túlméretezése korlátozható a redukált robbanási nyomásig.
- A lefúvatás iránya előre meghatározható.

3. Robbanáselfojtó berendezések: a kialakuló nyomáshullámot és/vagy a gyújtás fénysugárzását észlelik, majd nagynyomású oltóanyag bejuttatásával a redukált robbanási nyomás elérése előtt megállítják a robbanást. Ehhez a védendő berendezésnek két feltételt kell teljesítenie:

- nem nyílhat ki a környezet felé, illetve nem lehet üzemszerűen nyitott nyílása, csak ha igen gyorsan lezárható;
- a berendezés robbanásálló kivitelű legyen.

4. A robbanásterjedés megakadályozása

Különböző védelmi eszközöket építhetünk be. Ezek közül néhány porok esetén: tűzoltó gátak gyorszárasú szelepek, csappantyúk, forgócellás adagolók, lefúvató csatornák, kettős tolózárak, fojtások (anyaggal teli kihordócsiga).

Robbanás elvezetése a szerkezetekből

A robbanást elvezető védelmi intézkedések megelőzik a tartályban történő nemkívánatos nyomásemelkedést porrobbanás során úgy, hogy egy meghatározott felület időben kinyílik. A nyomáslefúvatás maximálja a robbanás során fellépő nyomást az el nem égett alapanyagok és az égéstermékek elvezetésével. Az így eredményül kapott maximális redukált robbanási nyomás nem haladhatja meg a szerkezet tervezési nyomását. Maga a robbanás ezzel az intézkedéssel nincs kiküszöbölve, azonban annak káros következményeit lekorlátozza. A lefúvatást követően az elvezetett tűz által okozott károokra számítani kell.

A robbanást elvezető elemeket tervezhetik egyszer használatosra (hasadótárcsák), valamint többszöri használatra (robbanó ajtók). A lefúvató elemek használatának előfeltétele a tartály vagy a szerelvények tervezési nyomásának megfelelő megválasztása. Ennek ellen kell állnia a maximális redukált tervezési nyomásnak ($p_{red,max}$).

A helyiségeknek és az épületek egyéb részeinek szintén védettnek kell lenniük a nyomáshullám elvezetése által. Ilyen esetben a nyomáselvezetés az épület épségét is óvja. A lefúvatás ilyen esetben megoldható például az ablakokon keresztül, így a falak és a földem védett marad. A lefúvató rendszer közelében tágas biztonsági zónát szükséges kialakítani az emberek és a fontosabb szerkezetek védelme érdekében. [7]

Nyomást lefúvató készülékek: hasadópanelek és -tárcsák

A hasadópanelek lehetnek kör alakú lapos, szögletes vagy egyéb formájúak, amelyek illeszkednek az alapfelületre és megfelelő lefúvási felületűek.

Számos, a hasadópanelekhez használt alapanyag képes kidomborodni, kiszakadni az alapot nyújtó keretből, vagy valamely véletlen módon kinyílni, ezzel megkezdve a lefúvatást. Azonban az ellenállás pillanatnyi, mindössze néhány milliszekundumon belül megkezdődik a robbanás mentesítése, elvezetve a porokat és a gázokat melyek magas nyomásnövekedésükkel hatalmas károkat okoznának a szerkezetben. A hasadópanelek meghatározott nyitási mintával rendelkeznek, amely a panel teljes nyitását eredményezi már a kezdeti hasadáskor is. [6]

A hasadótárcsák kis tömegűek, és majdnem tehetetlenség nélkül válaszolnak a nyomásemelkedésre. Egymástól függetlenül telepíthetőek, és garantálják a portömör zárást. A robbanás bekövetkezésekor, károsodásuk után teljes felületük szabaddá válik.

Legelterjedtebb szerkezeti anyagaik a fémek és ötvözetek. A hasadótárcsák kombinálhatóak jelzőkészülékekkel is, pl. megszakító vezetékekkel, amely bekapcsol egy leállító gombot vagy a szabályozó módot.

Személyek védelmében kerülni kell azt, hogy a hasadótárcsából töredékek váljanak le. Ha ez bekövetkezik, az valószínűleg az alapanyag hibája. Széles skálán változó hőmérsékleteknek kitett anyag lágyulhat vagy ridegedhet. Továbbá a korrózió, erózió, hőterhelés és a jegesedés hatása is módosíthatja a hasadótárcsa statikus aktiválási nyomását.

Speciális alkalmazási területekre kaphatóak gyanta-impregnált grafit vagy edzett üvegből készült hasadótárcsák is. Ez utóbbihoz szükség van egy kontrollált, külső energiaforrásra, mint például egy kapcsoló, mivel nem hasad fel pusztán a robbanási nyomástól. Az összes típusnál megtalálhatóak a különleges alakok. [7]

A továbbiakban a porrobbanás elleni védelem elkészítésének módszereit foglalom össze a magyar, amerikai és német szabványok szerint. A további számításokat ezen szabványokban megfogalmazott irányelveknek megfelelően végeztem el. A következő leírások egy része szabványok ide vonatkozó részének fordítása, kiegészítve számos elméleti információval. [5] [6] [7]

MSZ EN 14491: Szellőzőnyílásos porrobbanás-védelmi rendszerek

Általános összefoglaló

Tervezési nyomás (p): a szerkezet/tartály ellenállása a nyomással szemben.

K_{st} érték: paraméter, amely a porra és annak robbanási karakterisztikájára jellemző. Számítása a köbös törvény alapján történik. A köbös törvény teremt összefüggést a por kísérleti robbanási karakterisztikája és a valós tárolótartály mérete között.

Nyílásfelület (A): a szerkezeten található nyílás geometriai területe.

Szükséges nyílásfelület: (A_v) a nyílásfelület az E_f lefűvadási hatásfokkal súlyozva.

Effektív szerkezeti terület (A_{eff}): a szerkezet teljes szabad térfogatának és magasságának hányadosa.

Maximális robbanási túlnyomás (p_{max}): a zárt tartályban a robbanás alatt előforduló maximális túlnyomás, robbanási atmoszférában és speciális tesztkörülmények között.

Robbanási atmoszféra: levegőkeverék robbantási körülmények között, gyúlékony gázokkal, gőzökkel, ködökkel vagy porokkal, amelyekben – miután az égés megkezdődött – a láng továbbterjed a még el nem égett keverékre.

Maximális redukált robbanási túlnyomás ($p_{red,max}$): az a maximális túlnyomás, amely a tartályban a robbanás következtében kialakul akkor, amikor az valamely robbanás elleni (lefúvató) védelemmel vagy robbanásfojtással van ellátva.

Robbanási nyomásterjedés legnagyobb mértéke $(dp/dt)_{max}$: robbanáskor a nyomásemelkedés maximális értéke, egységnyi idő alatt, robbanási atmoszférára vonatkoztatva, a tartályban fennálló tesztkörülmények között.

Túlnyomás maximális csúcsértéke (p_{ext}): a külső nyomás csúcsértéke akkor, amikor a nyomáscsúcsot egy lefúvatott porrobbanás okozza.

Statikus aktivációs nyomás (p_{stat}): a hasadótárcsa vagy robbanóajtó aktiválási nyomása, amely lassú nyomásemelkedésre vonatkozik ($\leq 0,1 \text{ bar min}^{-1}$)

Szerkezetek lefúvatása

A robbanáselvezetés egy védelmi eljárás, amely a magas belső robbanási nyomás elleni védekezést foglalja magába. A szerkezet gyenge falfelületei a robbanás egy korai szakaszában megnyílnak, és az égő vagy még el nem égett anyagok az égéstermékekkel együtt kiáramlanak a keletkezett nyíláson, amely hatására a belső túlnyomás redukálódik. A nyitási felület egy nagyon fontos paramétere a maximális redukált robbanási túlnyomás ($p_{red,max}$) meghatározásának a szerkezeten belül a robbanás elvezetése során. A nyitási felület számításához szükséges a szerkezet tervezési nyomása, a por robbanási karakterisztikája, a szerkezet alakja és mérete, és a lefúvató elem statikus aktivációs túlnyomása és a porfelhő állapota a szerkezeten belül.

A robbanás lefúvatása nem történhet meg, ha a töltet mérgező, korrozív, irritáló, karcinogén, teratogén, vagy mutagén, vagy a por vagy az égéstermékek veszélyt jelentenek a közvetlen környezetre. Ez esetben nincs lehetőség elvezetésre, ekkor a veszélyes területet kell kijelölni.

A lefúvatás nem jelenti a robbanás megszüntetését, mindössze a robbanási túlnyomást csökkenti. A tűz és nyomás szerkezeten kívüli hatásait és a szálló törmelékeket figyelembe véve előzetes megfontolásokra van szükség.

A szerkezet hosszúság-átmérő arányának (L/D) növelése a lángnövekedés mértékének fokozódását vonja magával.

Amennyiben a rendszer csatlakozó szerkezeteket tartalmaz, a porrobbanás és az égés a kettő közti kapcsolaton keresztül tovaterjedhet a másik szerkezetre, turbulenciát indukálhat, vagy akár egy újabb, nagy égési forrást jelenthet a kapcsolódó szerkezetben. Ezen hatások kombinációja a másodlagos robbanás erejét fokozhatja, ennek hatására pedig a lefúvatással szemben támasztott követelményeket is.

Lefúvató felületek méretezése

A lefúvató felületek pontos méretezése a védelem megtervezésének legfontosabb lépése. A lefúvató méretezése a por robbanási karakterisztikáján alapszik, a porfelhő állapotán (koncentráció, turbulencia, eloszlás), a szerkezet geometriáján és a lefúvató eszköz kialakításán.

A porrobbanási karakterisztika két fő jellemzője a maximális túlnyomás értéke ($p_{\max}$) és a porrobbanási konstans (K_{St}). Ezek az egyes porokra standard tesztkörülmények közt lettek meghatározva, amelyek reprezentatív üzemanyag-koncentrációkat és porfelhő-homogenitást és turbulenciát vettek figyelembe, hogy jól közelítsék a gyakorlati alkalmazásokat. Kőbős szerkezeteknél a $p_{\max}$ és a K_{St} értéke függetlenek a szerkezet térfogatától.

A szerkezet térfogata és az L/D viszonya kapcsolatban áll a szerkezet alakjával és a szükséges robbanást lefúvató nyílás felületével. A szerkezet tervezési nyomása $p_{red,max}$ szintén fontos követelmény a lefúvatás méretezésénél. A szerkezet minden egyes egyéb részét ismerni kell a robbanási nyomás szempontjából, valamint a szerkezet leggyengébb része fogja meghatározni a szerkezet robbanási nyomását.

A lefúvató eszközök két legfőbb paramétere a statikus aktiválási túlnyomás p_{stat} és a lefúvató elem egységenkénti súlya. Ez határozza meg a lefúvatás hatásossági faktorát.

Szabadon álló szerkezetek védelme

A következő összefüggések olyan szabadon álló tartályokra vonatkoznak, amelyek közt a láng áttérjedése egyik szerkezetről a másikra nem lehetséges.

Az A_v szükséges lefúvatási keresztmetszet számítására szolgáló összefüggés $0,1bar \leq p_{red,max} \leq 1,5bar$ túlnyomások esetén

$$A = B(1 + C \times \log L / D) \text{ [m}^2\text{]}$$

Ahol

$$B = \left[3,264 \times 10^{-5} \times p_{\max} \times K_{St} \times p_{red,\max}^{-0,569} + 0,27 \times (p_{stat} - 0,1) \times p_{red,\max}^{-0,5} \right] \times V^{0,753}$$

$$C = (-4,305 \times \log p_{red,\max} + 0,758)$$

$$A_v = A / E_f \quad (E_f \text{ lefúvatási hatásfok})$$

Az összefüggések alkalmazhatósági köre:

Szerkezet térfogata	$0,1m^3 \leq V \leq 10000m^3$
A lefúvató elem statikus aktiválási túlnyomása	$0,1bar \leq p_{stat} \leq 1bar$; ha $p_{stat} < 0,1bar$ akkor $p_{stat} = 0,1bar$
Maximális redukált túlnyomás	$p_{stat} \leq p_{red,\max} \leq 2bar$; $p_{red,\max}$ legalább 0,12 bar legyen
Maximális robbanási túlnyomás	$5bar \leq p_{\max} \leq 10bar$ amennyiben $10barms^{-1} \leq K_{St} \leq 300barms^{-1}$
Maximális robbanási túlnyomás	$5bar \leq p_{\max} \leq 12bar$ amennyiben $300barms^{-1} \leq K_{St} \leq 800barms^{-1}$
Légköri viszonyok	A környezeti viszonyok atmoszférikus nyomáson értendők, amely 80 kPa és 110 kPa közt változhatnak, a hőmérséklet -20°C és 60°C közt (a hőmérséklet változása kevesebb mint 0,5°C/min), a relatív páratartalom 5 V/V% és 85 V/V% közt, és az oxigén-koncentráció (20,9±0,2) V/V%
Hosszúság-átmérő arány	$1 \leq L / D \leq 20$

„A” az a lefúvató felület, amely a szerkezet felületén található. Ez esetben a lefúvatási hatásfok 1, és a hatásos lefúvatási keresztmetszet megegyezik a valós lefúvatási keresztmetszettel.

Lefúvató csatornák hatása

A lefúvató csatornák feladata a lefúvatott robbanás továbbítása egy olyan területre, ahová a lángokat biztonságosan el lehet bocsájtani. Például egy épületen belüli szerkezettől továbbítja el a nyomáshullámot egy, az épületen kívüli biztonságos területre. Mivel a lefúvató

csatornák gátolják a lefűvatósi folyamatot, a maximális redukált robbanási túlnyomás a védelmi eszközökben jelentősen megnövekszik.

Egyenes lefűvató csatornára a maximális lefűvatósi túlnyomásra való hatását a következő összefüggéssel számíthatjuk:

$$\frac{p_{red,max}^1}{p_{ped,max}} = 1 + 17,3 \left[\frac{A}{V^{0,753}} \right]^{1,6} l/d$$

Ahol

$p_{red,max}^1$ a maximális robbanási túlnyomás lefűvató csővezetékkel [bar]

$p_{red,max}$ a maximális robbanási túlnyomás lefűvató csővezeték nélkül [bar]

A a geometriai lefűvató keresztmetszet [m^2]

V a szerkezet térfogata [m^3]

l a lefűvató csatorna hossza

d a lefűvató csatorna átmérője.

Az összefüggés érvényességi határai:

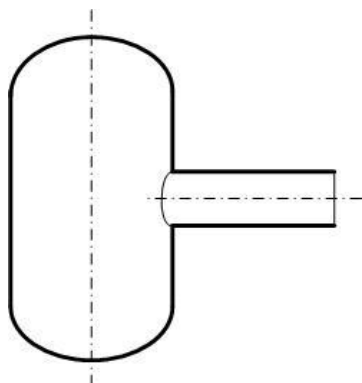
Szerkezet térfogata	$0,1m^3 \leq V \leq 10000m^3$
A lefűvató elem statikus aktiválási túlnyomása	$0,1bar \leq p_{stat} \leq 1bar$
Maximális redukált robbanási túlnyomás	$0,1bar \leq p_{red,max} \leq 2bar$ ha $p_{red,max} > p_{stat}$
Maximális robbanási túlnyomás	$5bar \leq p_{max} \leq 12bar$
Maximális termék-specifikus robbanási konstans	$10barms^{-1} \leq K_{max} \leq 800barms^{-1}$

A lefűvató csatorna hatását a védett létesítmény maximális redukált túlnyomására a legjobban a következő összefüggés fejezi ki:

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

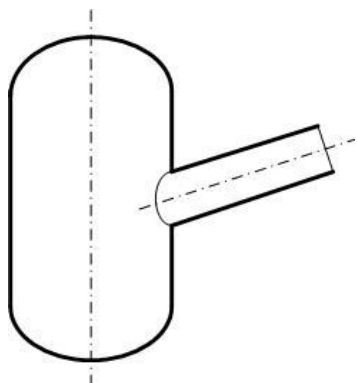
A fentebbi összefüggések az alábbi lefűvató csatorna kialakításokra érvényesek: A, B, C

A



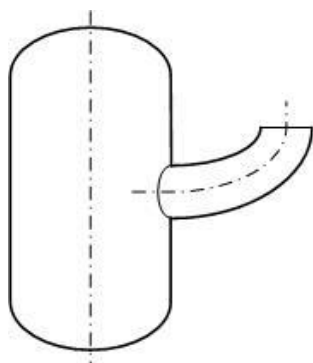
Egyenes lefűvató csatorna; a csatorna keresztmetszete megegyezik a lefűvató felület keresztmetszetével

B



Egyenes, a palásttal szöget bezáró lefűvató csatorna, amennyiben a bezárt szög kisebb vagy egyenlő, mint 20°

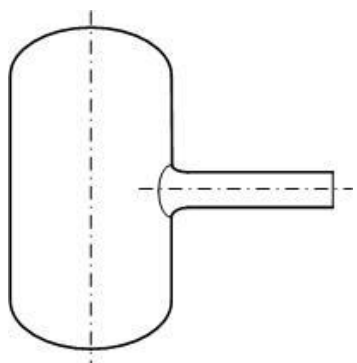
C



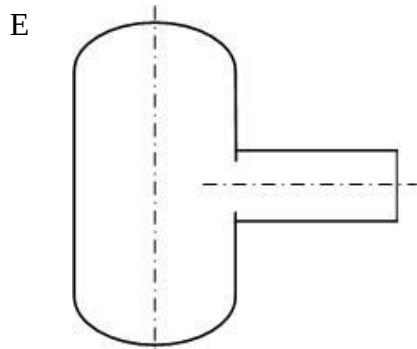
Enyhén görbült lefűvató csatorna

A fentebbi összefüggések az alábbi esetekben nem alkalmazhatóak: D, E, F, G

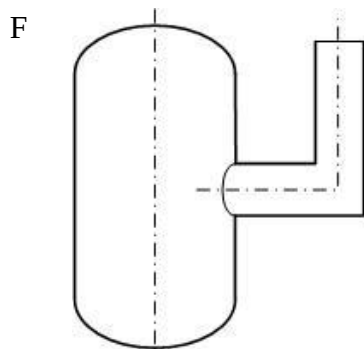
D



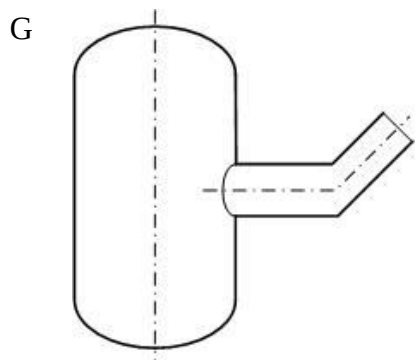
Egyenes lefűvató csatorna, amennyiben a csatorna keresztmetszete kisebb, mint a lefűvató keresztmetszet.



Egyenes lefúvató csatorna, amennyiben a csatorna keresztmetszete nagyobb, mint a lefúvató keresztmetszet



Lefúvató csatorna 90°-os csatornavéggel



45°-os törés a csatornában

A lefúvató csatornáknak kialakított 45° és 90°-os hajlatok nem tiltottak. Ezek alkalmazására vonatkozó ajánlatot a „Dust Explosion Prevention and Protection: A Practical Guide” című kiadványban találunk.

A lefúvatott egységek deformációja

Visszaható erők

A visszaható erők a robbanás elvezetése során lépnek fel, mialatt az anyag a lefúvató nyíláson át távozik. Ezek az erők deformálhatják a szerkezetet, vagy a legrosszabb esetben tönkre is tehetik azt.

A maximális visszaható erő:

$$F_{R_{\max}} = 119 \times A \times p_{red, \max}$$

Ahol

$F_{R\max}$	a visszaható erő [kN]
A	a lefúvató nyílás keresztmetszete [m ²]
$p_{red,\max}$	a maximális redukált robbanási túlnyomás [bar]

A teljes visszaható erő egy koncentrált erőnek tekinthető a biztosító elem geometriai középpontjában. A biztosító elemek telepítése a héj ellentétes oldalaira történik, egyenlő felületen, a keletkező reakcióerők kiegyenlítése érdekében. A tervezés során számolni kell a kiegyensúlyozatlanság miatt bekövetkező, nem egyszerre történő nyitással.

A reakcióerők fennállásának időtartama fontos tényező a tervezés során: a héj megtámasztására és megerősítésére is hatással van.

$$t_R = (10^{-4}) \times K_{St} \times V / A \times p_{red,\max}$$

Ahol

t_R	az erőimpulzus időtartama [s]
K_{St}	a por robbanási karakterisztikája [bar m s ⁻¹]
$p_{red,\max}$	a maximális redukált robbanási túlnyomás [bar]
A	a lefúvató felület keresztmetszete [m ²]

A további szabványok mind elméleti információkkal, mind ajánlásokban, mind jelölésrendszerben számos hasonlóságot mutatnak a magyar szabvánnyal.

A továbbiakban az amerikai szabványban megtalálható számításokat foglalom össze.

NFPA 68: Útmutató a tüzesetek elvezetéséhez

Általános összefoglaló

Maximális égési nyomás: $p_{\max}$

Nyomásnövekedés mértéke: dp/dt

Maximális nyomásnövekedés mértéke: $(dp/dt)_{\max}$

Égési index: K

A magyar szabványban definiáltakkal egyezően, itt is a por robbanási tulajdonságaiból és a zárt tartály térfogatából a köbös törvény alapján számítva:

$$K = \left(\frac{dp}{dt} \right)_{\max} V^{1/3} \text{ ahol } V \text{ a zárt edény térfogata, és a } K \text{ tényező}$$

K_G gázokra vonatkozóan;

K_{St} porokra vonatkozóan.

A K_{St} értékeket figyelembe véve a porokat három veszélyességi osztályba soroljuk: St 1, St 2, St 3. Ezek az osztályok adnak iránymutatást a robbanékonyság veszélyére vonatkozóan és a biztonsági elemek méretezésére vonatkozó követelményekkel kapcsolatban. Az St 0 osztályba tartozó porok nem hordozzák a porrobbanás veszélyét.

1. táblázat Veszélyességi osztályok és azok jellemzői [3] [6]

Veszélyességi osztály	K_{St} [bar m/s]	$P_{\max}$ [bar]	Karakterisztikák
St 0	0	-	Nem robbanóképes
St 1	$0 < K_{St} \leq 200$	10	Gyengén vagy mérsékelten robbanóképes
St 2	$200 < K_{St} \leq 300$	10	Erősen robbanóképes
St 3	$300 < K_{St}$	12	Nagyon erősen robbanóképes

A táblázatban szereplő értékek 1 m³ térfogatú zárt tartály esetén, 10kJ gyújtóforrás-energiával lettek megállapítva. A táblázat a „Dust explosion prevention and protection” című kiadványból és az amerikai szabványból lett összefésülve.

A robbanások elvezetésének alapjai

A robbanáselvezető egy nyílás a szerkezeten, amelyen keresztül az anyag szabadon tágulhat és kiáramolhat, ezzel lecsökkentve a megnövekvő nyomást.

A lefúvató felület számítása néhány olyan faktoron alapul, mint a szerkezet mérete és teherbírása, a porkeverék robbanási karakterisztikája, és maga a lefúvató elem típusa. A tervezési módszerek számos empirikus faktort vesznek figyelembe, amelyek már bekövetkezett lefúvatott robbanási esetek numerikus elemzésén és lefúvató tesztek segítségével lettek meghatározva.

Az amerikai tervezési szabványok nagy része megengedi a p_{red} értékét a szerkezet végső teherviselő-képességének 2/3-ára választani, gondoskodva arról, hogy a szerkezet az esetleges deformációt még elviseli; vagy a szerkezet nyúlási feszültségének 2/3-ára választva úgy, hogy a deformáció nem megengedett.

A szerkezetet megtámasztó szerelvényeknek elég erősnek kell ahhoz lenniük, hogy a robbanás elvezetése során fellépő reakcióerőknek is ellenálljanak. A reakcióerő számítására szolgáló képlet teszteredményekből származik. A következő összefüggés lefúvató csatorna nélküli szerkezetekre vonatkozik:

$$F_r = a(A_v)(P_{red})$$

Ahol

F_r a robbanás lefúvatasából származó maximális reakcióerő [kN]

$$a = 120$$

A_v lefúvató felület [m²]

P_{red} a lefúvatas során fellépő maximális túlnyomás [bar]

A teljes erőlkedés megegyezik azzal az erővel, amely a lefúvató elem geometriai középpontjában ébred. Tervezéskor a szerkezet kiegyensúlyozatlanságaival is számolni kell.

A lefúvatas időtartama:

$$t_f = b \left(\frac{P_{max}}{P_{red}} \right)^{0,5} \left(\frac{V}{A_v} \right)$$

Ahol

t_f a nyomásimpulzus időtartama a lefúvató nyitását követően [s]

$$b = 4,3 \times 10^{-3}$$

P_{max} a le nem fúvatott robbanás során előforduló maximális nyomás [bar]

P_{red} a lefúvatas során fellépő maximális nyomás [bar]

V a tartály térfogata [m³]

A_v a lefúvatas keresztmetszet (lefúvató csatorna nélkül) [m²]

Az egyenértékű statikus erő egy megtámasztott szerkezeten a robbanási nyomás elvezetése közben, ahol a DLF egy dinamikus töltési faktor:

$$F_s = a(DLF)(A_v)(P_{red})$$

Ahol

F_s egyenértékű statikus erő a megtámasztott szerkezeten [kN]

$$a = 120$$

$$DLF = 2$$

A_v lefúvató felület [m²]

P_{red} a lefúvatas során fellépő maximális túlnyomás [bar]

Porok és hibrid keverékek robbanásának elvezetése

A lefúvatas alacsony tehetetlenségű lefúvató szerkezetekkel, mint például hasadópanelelkel történik.

A szerkezet hosszúság-átmérő viszonya (L/D) alapvetően meghatározza a szükséges lefúvató keresztmetszetet. Nem kör alakú szerkezeteknél az átmérő értékére a következő összefüggést használjuk:

$$D = 2(A^* / \pi)^{1/2}$$

Ahol

A^* a szerkezet belsejének keresztmetszete annak hosszirányú tengelyére merőlegesen.

1. Ha az L/D értéke 2 vagy kevesebb, a szükséges lefúvató felület:

$$A_v = (8,535 \times 10^{-5}) (1 + 1,75 P_{stat}) K_{St} V^{0,75} \sqrt{\frac{(1 - \Pi)}{\Pi}}$$

Ahol

A_v lefúvató felület [m²]

P_{stat} a biztonsági elem statikus nyitási nyomása [bar]

K_{St} égési index [bar m/s]

V veszélyes térfogat [m³]

$$\Pi = P_{red} / P_{max}$$

P_{red} a robbanas elvezetése utáni redukált nyomás [bar]

P_{max} a robbanas maximális nyomása [bar]

Az összefüggés alkalmazási határai:

Szerkezet térfogata	$0,1m^3 \leq V \leq 10000m^3$
A lefúvató elem statikus aktiválási túlnyomása	$P_{stat} \leq 0,5bar$
Maximális robbanási túlnyomás	$5bar \leq p_{max} \leq 12bar$
Maximális termék-specifikus robbanási konstans	$10barms^{-1} \leq K_{St} \leq 800barms^{-1}$

2. Ha az L/D értéke 2 és 6 közé esik, a lefúvató felület értékét egy ΔA értékkel kell növelni, amely a következő összefüggés alapján számítható:

$$\Delta A = 1,56A_v \left[\frac{1}{P_{red}} - \frac{1}{P_{max}} \right]^{0,65} \log \left[\frac{L}{D} - 1 \right]$$

Ahol

L szerkezet hossza vagy magassága (leghosszabb dimenziója)

D a szerkezet egyenértékű átmérője

A P_{max} 12 bar-nál és K_{St} 800-nál magasabb értékeire nincsenek tesztekől származó adatok.

Lefúvató csatornák hatása

Négyszög alapterületű tartályok és homogén por-levegő keverékek légköri nyomásról induló robbanása esetén a lefúvató csatorna hatása a következőképpen határozható meg:

$$P_{red} / P'_{red} = 1 + 17,3 \left[A_v / V^{0,753} \right]^{1,6} L_D / D_v$$

Ahol

P'_{red} P_{red} látszólagos értéke a lefúvató csatorna alkalmazása mellett [bar]

A_v lefúvató felület [m^2], egyenlő a keresztmetszettel

V tartály térfogata [m^3]

L_D lefúvató csatorna hossza [m]

$D_v = 2(A_v / \Pi)^{1/2}$ lefúvató csatorna egyenértékű átmérője [m]

A csatorna hosszának (L_s) nem kis hatása van a redukált robbanási nyomás értékére:

$$L_s = 3,764 \times P_{red}'^{-0,3724}$$

Ez az összefüggés akkor érvényes, ha $0,1bar \leq P_{red}' \leq 2bar$, $P_{stat} = 0,1bar$.

A robbanás-elvezető és zárószerelvények nagyon sok típusa elérhető. Ezek közül számos típus kereskedelmi forgalomban is megtalálható, készen az azonnali beszerelésre. Más típusokat a felhasználónak kell a helyszínen legyártani.

VDI 3673: Porrobbanások nyomásterjedése

A következőkben a német szabványnak megfelelő számítási módszereket foglalom össze.

Általános összefoglaló

Lefúvató csatorna: csővezeték, amely a lefúvató elemtől (hasadópanel, robbanóajtó) indul, és feladata a nyomáshullám, a láng és az égéstermékek biztonságos elvezetése.

Egyenértékű átmérő: Annak a körnek az átmérője, amelynek a területe megegyezik bármely alak A^* területével.

$$D_E = 2\sqrt{\frac{A^*}{\pi}} \quad [m]$$

Aktivációs nyomások:

Statikus aktivációs nyomás (p_{stat}): Az a nyomás, amely aktiválja a hasadótárcsát vagy a robbanóajtót 0,1 bar/min nyomásemelkedés esetén.

Dinamikus aktivációs nyomás (p_{dyn}): Az a nyomás, amely aktiválja a hasadótárcsát vagy a robbanóajtót robbanás esetén. Ez általában nagyobb, mint a statikus aktivációs nyomás értéke. A dinamikus aktivációs nyomás hatásait leíró formulák kísérleti eredményeken alapulnak.

Tartály tervezési erőssége (Rohbbanás-ellenállás) (p)

Rohbbanásálló tartályok: Tartályok és az azokhoz kapcsolódó szerelvények és csővezetékek, amelyek az AD-szabványoknak megfelelően lettek megtervezve.

Robbanási sokkálló tartályok: Tartályok és az azokhoz kapcsolódó szerelvények és csővezetékek, amelyek a VDI 2263 szabvány 3. fejezetének megfelelően lettek megtervezve, tehát ellenállnak az előre feltételezhető robbanási nyomás értékének. A plasztikus alakváltozás megengedett.

Tartályok:

Köbös tartályok: A tartály L/D aránya kisebb, mint 2.

Hosszanti tartályok: $L/D \geq 2$

Silók: Függőleges szerelésű tartályok, melyeknél $L/D \geq 2$.

Nyomásemelkedés esetén használt elemek:

Hasadótárcsa: Olyan szerkezet, amely egy meghatározott aktivációs nyomáson nyit ki, és ezt a lefúvató felületet tartósan nyitva is tartja.

Robbanóajtó: Olyan szerkezet, melynek a lefúvató felülete a meghatározott aktivációs nyomáson nyit ki, majd a hatás megszűnése után visszazár.

Lefúvató felület (A) [m^2]: A nyomás elvezetésére szolgáló nyílás területe. Akár több részfelületből is állhat.

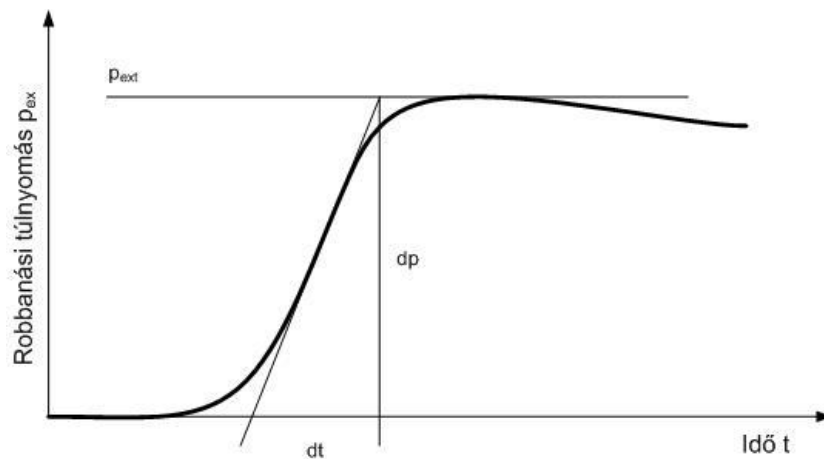
Lefúvató képesség (EF) [%]: A nyomáscsökkenés mértéke, a hasadópanel és az ugyanakkora méretű lefúvató felületet összehasonlítva.

Nyomáselvezetés: Védelmi eljárás, amely megvédi a tartályt a tervezési szilárdságán felüli hatásoktól úgy, hogy az el nem égett anyagokat és az égéstermékeket elvezeti egy adott nyitott felületen át.

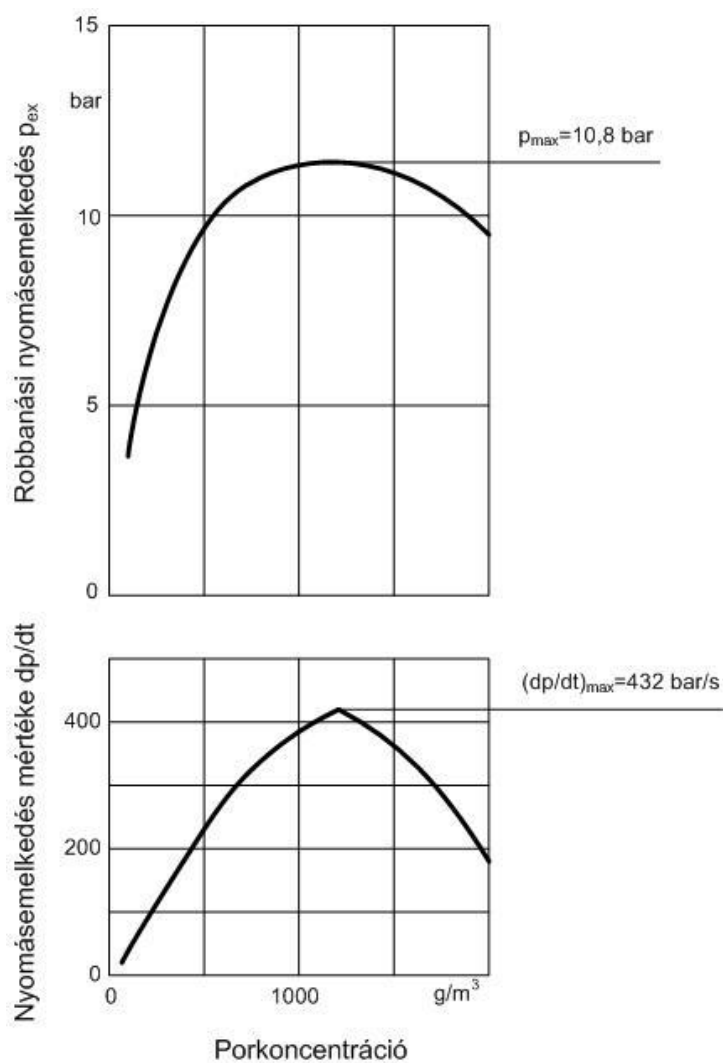
Robbanás-karakterisztika: Minden robbanási karakterisztika előre jól meghatározott, szabványosított eljárás során lett felvéve, és meghatározva a következők:

Robbanási nyomás (p_{ex}) [bar]: A zárt tartályban fellépő nyomás a robbanás után, adott por-levegő arány esetén.

Nyomásemelkedés mértéke (dp/dt) [bar/s]: A zárt tartályban adott koncentráció esetén a nyomás-idő diagram inflexiós pontjában a görbe meredeksége.



2. ábra A robbanási nyomásemelkedés mértékének értelmezése a maximális robbanási túlnyomás és az idő függvényében



3. ábra A maximális robbanási nyomásemelkedés értelmezése egy kiválasztott porra, $1m^3$ térfogatú zárt tartály esetén

Maximális robbanási nyomás ($p_{\max}$) [bar]: A robbanás során a zárt tartályban fellépő maximális nyomás értéke, miközben a por-levegő keverék koncentrációja egyenletesen változik.

Maximális nyomásemelkedés $(dp/dt)_{\max}$ [bar/s]: A nyomásemelkedés maximális értéke zárt tartályban, miközben a por-levegő keverék koncentrációja egyenletesen változik.

K_{St} értéke [bar m/s]: Por és teszt-specifikus karakterisztika a harmadfokú törvényből származtatva. Egyenlő a maximális túlnyomás-emelkedéssel 1 m³-es tartály esetén.

$$\text{Harmadfokú törvény: } (dp/dt)_{\max} \cdot V^{1/3} = \text{const} = K_{St}$$

Hibrid keverékek: Olyan keverékek, amelyek egyszerre tartalmazznak gyúlékony porokat, éghető gázokat vagy gőzöket és levegőt.

Csúcsnyomás maximum értéke ($p_{\max,a}$) [mbar]: Külső maximális nyomás csúcserőhatás a lefúvató nyílás közelében RS távolságra.

Külső robbanási nyomás csúcserőhatás (p_r) [mbar]: A csúcsnyomás külső maximumértéke $r \geq RS$ távolságra a lefúvató felülettől.

Redukált robbanási nyomás (p_{red}) [bar]: Adott koncentrációjú por-levegő keverék esetén a lefúvatott tartályban létrejövő nyomás.

Redukált nyomásemelkedés $(dp/dt)_{\text{red}}$ [bar/s]: Az emelkedő nyomás-idő diagramon az inflexiós pontban az érintő meredeksége adott koncentráció esetén lefúvatott tartályban.

Maximális redukált robbanási nyomás ($p_{\text{red,max}}$) [bar]: Lefúvatott tartályban, folyamatosan változó koncentrációjú por-levegő keverék robbanása során fellépő maximális nyomás értéke.

Redukált nyomásemelkedés maximális értéke $(dp/dt)_{\text{red,max}}$ [bar/s]: Lefúvatott tartályban történő por-levegő robbanása során folyamatosan változó elegy esetén a túlnyomás-emelkedés maximális értéke.

Visszaható erő (FR) [kN]: A nyomáselvezetés következtében fellépő erőhatás, mely a lefúvatás irányával ellentétesen épül fel.

A német szabvány szintén értelmezi a korábbiakban már megemlített veszélyességi osztályokat, azonos módon a magyar és amerikai szabványokkal.

Nyomáslefúvató szerkezetek méretezése

A szükséges lefúvató felület méretezéséhez szükségesek a következő robbanási paraméterek, amelyek a robbanásfolyamatát jellemzik egy zárt, köbös tartályban ($H/D < 2$):

- maximális robbanási nyomás $p_{\max}$

- a por specifikus karakterisztikája K_{St}

Ezek a tartály méretétől függetlenek, és egy elfogadott szabványosított eljárás alapján lettek meghatározva.

Köbös tartályok

A következő összefüggések az St 1 és St 2-es veszélyességi osztályokba sorolható homogén porokra alkalmazhatók, ha a maximális robbanási nyomás $p_{max} \leq 10\text{bar}$, és St 3-as veszélyességi osztály esetén $p_{max} \leq 12\text{bar}$. A por homogén eloszlásban van jelen a V térfogatú tartályban, melyben a műveleti nyomás nem haladja meg a 0,2 bar-t.

Olyan lefúvató felületek méretezésénél, ahol a tartály nem tartalmaz belső elemeket, a teljes üres térfogattal számolunk. Olyan tartály esetén, amelyben akadályok vannak (szűrők, táskák, stb.), a szűrőelemeken kívüli térfogatot vesszük figyelembe azonban meg kell bizonyosodnunk róla, hogy ezek a belső elemek nem akadályozzák a lefúvató folyamatot.

A következő empirikus összefüggés szolgál a hasadótárca szükséges A lefúvató felületének számítására.

$$A = \left[3,264 \cdot 10^{-5} \cdot p_{max} \cdot K_{St} \cdot p_{red,max}^{-0,569} + 0,27(p_{stat} - 0,1)p_{red,max}^{-0,5} \right] \cdot V^{0,753}$$

Ahol

$p_{red,max}$ feltételezett maximális robbanási nyomás [bar]

p_{stat} statikus aktivációs nyomás [bar]

V tartály térfogata [m^3]

p_{max} hasadótárca statikus aktivációs nyomása [bar]

K_{St} porspecifikus paraméter

Az összefüggés akkor érvényes, ha:

Szerkezet térfogata	$0,1\text{m}^3 \leq V \leq 10000\text{m}^3$
Hasadótárca statikus aktiválási túlnyomása	$0,1\text{bar} \leq p_{stat} \leq 1\text{bar}$
Maximális redukált robbanási túlnyomás	$0,1\text{bar} \leq p_{red,max} \leq 2\text{bar}$
Maximális robbanási túlnyomás	$5\text{bar} \leq p_{max} \leq 10\text{bar}$ amennyiben
	$10\text{barms}^{-1} \leq K_{St} \leq 300\text{barms}^{-1}$

Maximális robbanási túlnyomás

$$5\text{bar} \leq p_{\max} \leq 12\text{bar} \text{ amennyiben}$$

$$300\text{barms}^{-1} \leq K_{St} \leq 800\text{barms}^{-1}$$

Visszaható erők figyelembe vétele

A nyomáselvezetés alatt egy visszaható erő generálódik az el nem égett keverék és az égéstermékek kiáramlása során a lefűvónyílásból. A maximális visszaható erőt a következőképpen számítjuk:

$$F_{R,\max} = \alpha \cdot A \cdot p_{red,\max}$$

Ahol α a dinamikus tényező. Amennyiben ezt 119-re választjuk, az összes gyakorlati alkalmazásra kielégítő eredményt ad.

Ahhoz, hogy egy időfaktort is figyelembe vegyünk, a reakcióerőt egy olyan állandó erővé konvertáljuk, amely ugyanarra a felületre nézve ugyanannyi ideig hat.

$$F_R = 0,52 \cdot 119 \cdot A \cdot p_{red,\max}$$

A reakcióerő hatása azonos méretű, ellentétes oldalon elhelyezett lefűvató felületekkel kiküszöbölhető.

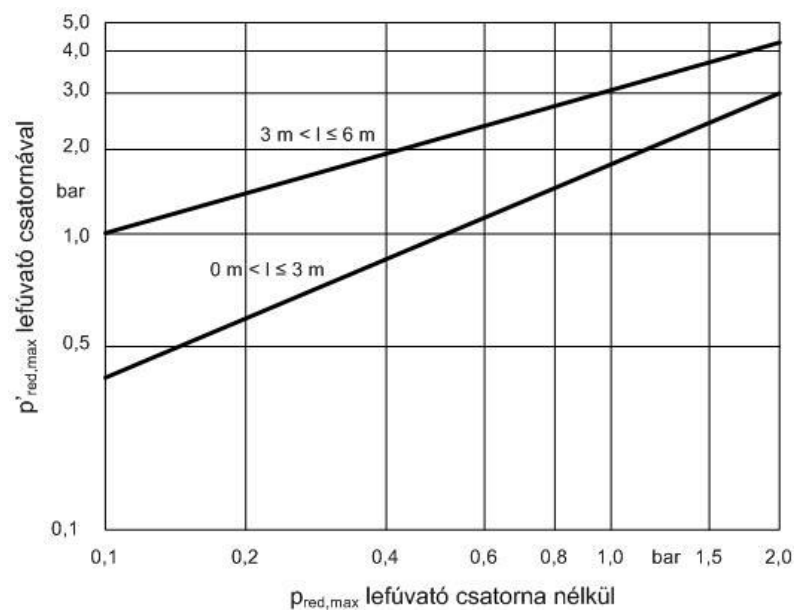
Lefűvató csatornák hatása robbanáselvezetés során

Lefűvató csatorna alkalmazásával az aktiváció után a csatorna megtelik a robbanóképes eleggyel, mielőtt a lángok elérhetnék a védett tartályt. Azonban a lefűvató csatornában történő másodlagos robbanás gátolja a lefűvató folyamatot. Ez megnöveli a maximális redukált robbanási nyomást a tartályban. A maximális redukált robbanási nyomás hatását hasadótárcsa alkalmazásával, lefűvató csatorna nélkül számítjuk.

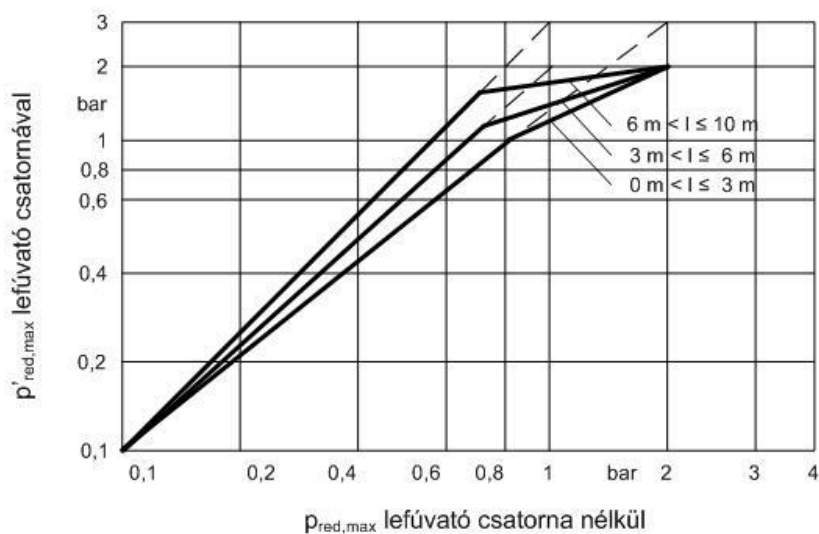
Hasadótárcsák és lefűvató elemek

A következő ábra mutatja az elvezető csatorna nyomásnövelő hatását egy köbös tartályban. A tartály hasadótárcsát tartalmaz, mint lefűvató elemet, és homogén por-levegő keverékkel van töltve.

A grafikon azt mutatja, hogy a maximális redukált robbanási túlnyomás kisebbre adódik a rövidebb lefűvató csatorna esetén.



4. ábra A lefúvató csatorna hatása a redukált maximális túlnyomásra tartályokban, hasadótárcsa alkalmazása mellett



5. ábra A lefúvató csatorna hatása a redukált maximális túlnyomásra köbös tartályokban, hasadótárcsa alkalmazása mellett

Lefúvató csatorna hossza: $0m < l \leq 3m$

$$p = p'_{red,max} = 1,84 p_{red,max}^{0,654}$$

Lefúvató csatorna hossza: $3m < l \leq 6m$

$$p = p'_{red,max} = 3,00 p_{red,max}^{0,4776}$$

Amennyiben a tervezési nyomás adott, és az A lefúvató felületet szükséges megnövelni, a maximális redukált nyomás a következőképpen alakul szabad lefúvadás esetén:

Lefúvató csatorna hossza: $0m < l \leq 3m$

$$p_{red,max} = 0,3936 p_{red,max}^{1,529}$$

Lefúvató csatorna hossza: $3m < l \leq 6m$

$$p_{red,max} = 0,1002 p_{red,max}^{2,0938}$$

Lefúvató csatornák tervezése

Elsődleges követelmény, hogy a lefúvató csatornák legyenek olyan rövidek és annyira egyenesek, amennyire csak lehetséges. Szükséges, hogy ugyanazzal a keresztmetszettel rendelkezzenek, mint a lefúvató felület, és ugyanazzal a tervezési nyomással, mint a védett tartály. Hosszuk maximum 3 méter, névleges nyomásuk PN 6 vagy PN 10. A hengeres lefúvató csatornák szilárdsági szempontból kedvezőbbek.

Amennyiben egy vizsgálóajtó található a lefúvató szerkezet közelében, akkor annak a borításának ugyanazzal a szilárdsággal kell rendelkeznie, mint a lefúvató csatornának.

Por robbanási tulajdonságainak meghatározása

Mint ahogy azt a szabványokban összefoglaltan láhattuk, ahhoz hogy egy berendezés biztosításához szükséges lefúvatósi keresztmetszetet meghatározhassuk, szükséges az abban felhalmozódó por robbanási tulajdonságainak pontos ismerete. A por robbanási tulajdonságait robbantókamrás kísérletekkel határozzuk meg. A minta, amelynek robbanási tulajdonságait a következőkben meghatározom, a jövőbeli robbanásvizsgálatok során is felhasználásra kerül.

Ahhoz, hogy a vizsgálat elvégezhető legyen, a mintának néhány kritériumnak meg kell felelnie. El kell végezni a minta nedvességtartalmának mérését valamint az uralkodó részecskeméret meghatározásához a mintát szitaanalízisnek kell alávetni.

A por nedvességtartalmának meghatározásához Shimadzu MOC-120 (SN: D451005747) típusú gyorsnedvesség-meghatározó műszert alkalmaztam. A mérés során a mintát 120°C-ra melegítve folyamatosan rögzíteni kell annak tömegváltozását. A mérést addig kell folytatni, amíg a nedvességtartalom-változás 0,05% alá nem esik.

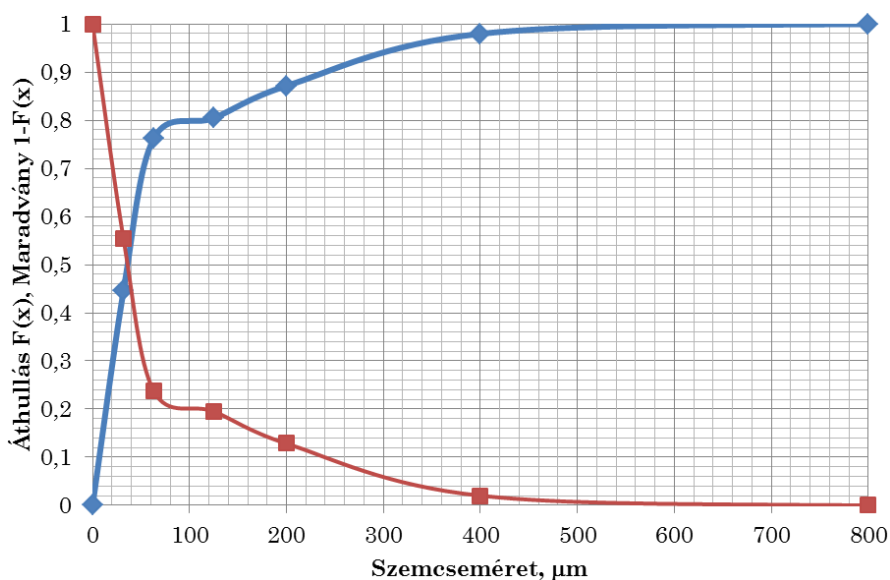
Az általam vizsgált minta kezdeti nedvességtartalma 10% feletti volt, így szükségessé vált annak szárítása. Végül 80 órás 60°C-on történő szárítás után a nedvességtartalom 9,15%-ra csökkent, és így alkalmassá vált a porrobbanás-vizsgálathoz.

Az eredeti, „nedves” poron elvégzett szitaanalízis eredményét az alábbi táblázat mutatja.

2. táblázat Szitaanalízis eredményei nedves poron

Szitafrakció, μm		frakció tömeg, g
0	32	66,77
32	63	47,09
63	125	6,41
125	200	9,97
200	400	16,19
400	800	3,01
800	1800	0
1800	max	0

Ez alapján elkészítjük a szitaáthullás- és maradványgörbéket.



6. ábra Szitaáthullás- és maradványgörbék

Az adott mintára jellemző szemcseméretnek a mediánértéket tekintjük, amely az áthullás- és maradványgörbék sajátosságai miatt a két görbe metszéspontjában található. Erre

a mintára vonatkoztatva ez a $38\mu\text{m}$ -es szemcseméret volt. Mivel szabvány szerint csak $63\mu\text{m}$ -es alatti szemcseméret-mediánú mintával végezhető el a robbanás-vizsgálat, ezért ez az anyaghalmoz megfelel.

A fentebbi ismeretek birtokában már elvégezhetőek a robbantási vizsgálatok. A kísérleteket a Vegyipari Gépek Tanszékének laboratóriumában végeztem el, az alábbi képen látható robbantókamra segítségével:



7. ábra Robbantókamra a Vegyipari Gépek Tanszékén

A kamrában $0,6\text{ bar}$ -os vákuumot létrehozva, a kívánt mennyiségű port beporlasztjuk (így a kamrában uralkodó nyomás 1 bar lesz), majd egy 10 J energiájú gyújtópatronnal meggyújtjuk. Ekkor, ha a por mennyisége az alsó és felső robbanási határok közt mozog, megtörténik a robbanás. Egyéb esetben csak égésről beszélhetünk. A robbanási karakterisztika felvételéhez több méréssorozatot is el kell végezni. Az egyes pormennyiségekhez tartozó robbanási karakterisztikákból minden esetben meghatározható az adott kísérlethez tartozó maximális robbanási túlnyomás, valamint a nyomásemelkedés sebességének maximális értéke. Amennyiben diagramon ábrázoljuk a különböző pormennyiségek függvényében a hozzájuk tartozó maximális nyomásemelkedés értékeit, a kapott görbe maximumából a köbös törvény alapján számíthatjuk a porra jellemző K_{st} értéket. Az egyes adatok kiértékelését egy célszoftver segíti.

Három mérésorozatot végeztünk, sorozatonként 8 méréssel. A mérésorozatok elvégzése után a következő eredményeket kaptuk:

Maximális robbanási túlnyomás: $p_{\max}=9,4 \text{ bar} \pm 10\%$

Maximális nyomásemelkedés: $(dp/dt)_{\max}=614 \text{ bar/s} \pm 12\%$

A mintára jellemző konstans: $K_{st}=167 \text{ mbar/s} \pm 12\%$

Azoknál a porkoncentrációknál, amelyeknél az egyes sorozatok közti eredmények eltérőek lettek, az egyes eredmények átlagát vettük figyelembe. Az alábbi táblázatban az egymástól eltérő eredmények láthatók.

3. táblázat Robbantási teszteredmények

Teszt	Sorozat	Koncentráció [g/m ³]	$p_{\max}$ [bar]	dp/dt [bar/s]	t_{eff} [ms]
2	1	60	0,0	0	60
3	1	125	4,4	154	60
4	1	250	6,3	287	60
5	1	500	8,7	579	60
6	1	750	9,0	568	60
7	1	1000	9,0	546	60
8	1	1250	8,3	579	60
9	1	1500	7,6	441	60
10	2	500	9,0	581	60
11	2	750	9,5	653	60
12	2	1000	9,1	620	60
13	2	1250	8,7	575	60
14	3	500	8,8	511	60
15	3	750	9,6	554	60
16	3	1000	9,7	645	60
17	3	1250	9,3	586	60

Ahhoz, hogy nyilvánvalóvá váljon, hogy a porrobbanás valós probléma, álljon példaként egy ipari feladat megoldása. A szerkezet védelméhez szükséges hasadófelület-számításokat a magyar, német, és amerikai szabványoknak megfelelően is elvégeztem.

A vizsgált port egy közel 3 m^3 térfogatú hengeres edényben tároljuk. Az edény méretei:

Magasság: $L = 2,5 \text{ m}$

Átmérő: $D = 1,3 \text{ m}$

Magasság-átmérő viszony: $L/D = 1,92$

Térfogat: $V = 3,32 \text{ m}^3$

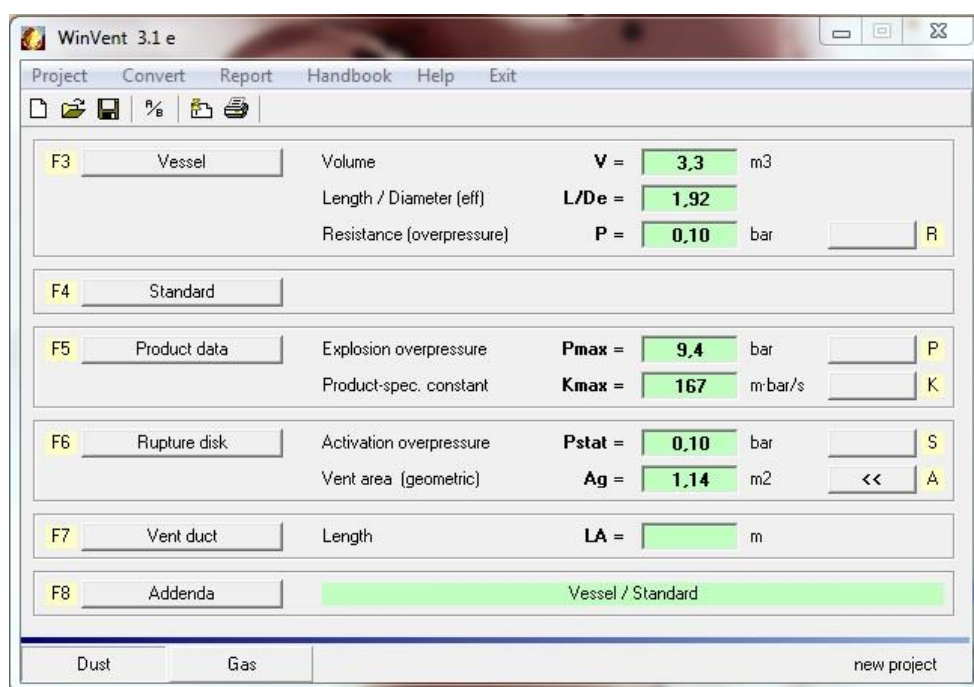
A tartály $p = 0,1 \text{ bar}$ -os nyomásnövekedést visel el.

A hasadópanelek kívánt nyitási nyomása legyen szintén $0,1 \text{ bar}$.

A továbbiakban az egyes szabványok szerint számítottam ki a szükséges lefúvató felületek és az elvezető csatornák méretét.

A magyar és a német szabványok szerinti számításokat Microsoft Excel 2010. típusú szoftverrel oldottam meg. A magyar szabvány szerinti számítások eredménye **$1,14 \text{ m}^2$** lett. A német szabvány szerint elvégezve a méretezést, a szükséges lefúvató keresztmetszetre **$0,47 \text{ m}^2$** adódott.

Az amerikai szabvány számításait a kifejezetten erre a problémára megalkotott WinVent 3.1e szoftver segítségével végeztem el. A szoftver fő ablakában kiválasztva hogy por- vagy gáztöltet robban, és a megfelelő adatokat megadva, megkapjuk a hiányzó paramétert (ez esetben a lefúvató felület szükséges nagyságát). A szoftver természetesen minden számítást a hivatalos szabványnak megfelelően végez el.



8. ábra WinVent 3.1e használat közben

Az így kapott szükséges lefúvató keresztmetszet szintén **1,14 m²**-re adódott.

Látható, hogy a három különböző szabvány szerint elvégzett számítások eredményei közül kettő azonosra adódott, míg egy különbözik. Ennek oka, hogy a különböző iránymutatások nem azonos mértékben „szigorúak”, azaz más-más biztonsági tényezővel és beépített ráhagyásokkal lettek megalkotva. Tapasztalat, hogy a német szabvány fogalmazza meg a legszigorúbb előírásokat, az amerikai és a magyar csak ezután következnek.

További kérdéseket vet fel a robbanás lefúvatására szolgáló elvezető csatorna hatása a maximális robbanási túlnyomás értékére; valamint a csatorna alakjára és esetleges görbületeire vonatkozó szabványi korlátozások érvényességi köre. Az egyes előírások eltérően rendelkeznek a lefúvató csatorna méreteiről és hajlási szögéről. Az egyezések és a különbségek feltárásában legelőször számítógéppel elvégzett numerikus szimulációk, majd a későbbiekben valós kísérleti adatok lesznek segítségemre.

Numerikus modellek

A numerikus szimulációkat az SC/TETRA nevű, véges térfogat módszert alkalmazó szoftverrel végzem el. Ezen módszer lényege az, hogy a későbbiekben felsorolt alapösszefüggések rendszerének megoldását integrális alakra történő egyszerűsítéssel keresi meg úgy, hogy azokat a vizsgált geometria egyes részeire vagy ellenőrző térfogatára alkalmazza. A szoftver a teljes vizsgált geometriát különböző módokon hálózza be annak érdekében, hogy az egyes elemekre egyenként oldja meg az integrális alakokat. Ami az egyik elemen kapott számítási eredmény (például hőmérséklet-változás, elmozdulás, stb.) egy másik, vele érintkező elemen kezdeti- és/vagy peremfeltétel is lesz a számítás következő részében. Ez adja a számítás viszonylagos pontosságát rövid időintervallumok esetében. (Hosszabb időintervallumoknál a felhasznált differenciálegyenletekben előforduló változók – megfelelő mennyiségű peremfeltétel hiányában – téves eredményeket hozhatnak.) Az előzőekből kitűnik, hogy a számítás pontosságát nagyban befolyásolja a megalkotott háló elemeinek mérete és a háló finomsága, ezzel pedig szoros összefüggésben van a számítások lefutásának ideje. Tehát minél több elemből áll a háló, és ezek minél kisebbek, annál valósághűbb számítási eredményeket kapunk, viszont a számítási idő annál hosszabb lesz.

Mindezek mellett a felhasznált numerikus modell típusa is nagyban befolyásolja a kapott eredményeket. Általában a különböző szoftverek lehetőséget adnak az ezek közül történő választásra. [8]

Általános esetben az egyes feladatok megoldásánál a következő alapösszefüggéseket használjuk fel [9]:

1. Tömegmegmaradás törvénye:

Összenyomhatatlan folyadékokra

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

Összenyomható folyadékokra

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho u_i = 0$$

2. Impulzus-megmaradás törvénye

Összenyomhatatlan folyadékokra

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho g_i \beta (T - T_0)$$

Összenyomható folyadékokra

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i$$

3. Kontinuitási egyenlet:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0$$

4. Energia-megmaradás törvénye:

Összenyomhatatlan folyadékokra

$$\frac{\partial \rho c_p T}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho c_p T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} K \frac{\partial T}{\partial x_j} + \dot{q}$$

Összenyomható folyadékokra

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho H}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial u_j p}{\partial x_j} + \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} K \frac{\partial T}{\partial x_j} + \dot{q}$$

5. Diffúziós egyenletek:

Összenyomhatatlan és összenyomható folyadékokra

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \rho D_m \frac{\partial C}{\partial x_j} + \rho d$$

6. Gázállapot-egyenletek

Összenyomhatatlan folyadékokra $\rho = \text{áll}$

Összenyomható folyadékokra $p = \rho RT$

Az előbbi egyenletekben előforduló jelölések:

x_i koordináták [m]

u_i az x_i irányban vett áramlási sebesség [m/s]

t idő [s]

ρ sűrűség [kg/m³]

p folyadéknomás [Pa]

μ viszkozitás [Pas]

σ_{ij} feszültségtenzor

H fajlagos entalpia [J/kg]

g_i gravitáció [m/s²]

β térfogati hőtágulási együttható [1/K]

T vizsgált közeg hőmérséklete [K]

T_0 a folyadék vonatkoztatási hőmérséklete [K]

c_p állandó nyomáson vett fajhő [J/kgK]

K hővezetési tényező [W/mK] (más szakirodalmakban λ -val jelölve)

$\dot{q}$ hőforrás-tag [W/m³]

k turbulens kinetikus energia [m²/s²]

ε turbulens disszipációs energia [m²/s³]

C a diffúziófajták koncentrációja [-]

D_m diffúziós tényező [m²/s]

$\dot{a}$ a diffúzió forrástagja [1/s]

R gázállandó [J/kgK]

A következőkben a két leginkább magyarázatra szoruló alapösszefüggést fejtem ki bővebben.

Navier-Stokes egyenlet

A Navier-Stokes egyenlet a Newton-féle súrlódási törvényből és a Newton-féle dinamikai alaptörvényből indul ki, az egydimenziós problémát háromdimenziós közelítéssel próbálván megoldani. (A közelítés a folyadéksűrűség állandóságát feltételezi.)

A viszkózus folyadék turbulens áramlása esetén érvényes a mozgásjellemzők pillanatértékeivel értelmezett általános mozgásegyenlet:

$$\frac{\partial \mathbf{v}_T}{\partial t} + (\mathbf{v}_T \cdot \nabla) \mathbf{v}_T = \mathbf{g} + \frac{1}{\rho} \operatorname{div} \mathbf{F}_T$$

ahol a $\mathbf{g}$ vektor a térfogati erőket jelenti. A konzervatív erőter esetén – amely potenciális és stacionárius ($\mathbf{g} = -\nabla U$ és $\partial U / \partial t = 0$) – a viszkózus folyadék turbulens mozgása esetén érvényes a pillanatértékkel felírt

$$\frac{\partial \mathbf{v}_T}{\partial t} + (\mathbf{v}_T \cdot \nabla) \mathbf{v}_T = -\operatorname{grad} U + \frac{1}{\rho} \operatorname{div}(-p_T \mathbf{I} + \boldsymbol{\sigma}_T)$$

Navier-Stokes féle mozgásegyenlet, ahol U az erőter potenciálja. Míg Navier összenyomhatatlan, addig Stokes az összenyomható közegekre vezette le ezt az összefüggést.

A Navier-Stokes-féle mozgásegyenlet numerikus úton történő megoldása lamináris (kis Reynolds-számú) áramlások esetén nehézségek árán, de megoldható. A gyakorlatban előforduló turbulens áramlások numerikus számítása sokkal nehezebb feladat. Számos módszert dolgoztak ki ezen áramlások vizsgálatára.

A k - ε összefüggés

A turbulens áramlások pillanatnyi sebességterét két sebességtér összegeként fogjuk fel. Az egyik egy $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$ átlagos sebességtér, a másik egy $\mathbf{v}'(\mathbf{r}, t)$ ingadozási sebességtér. Ez utóbbiban a sebességingadozás eredményeképpen a deformációval szembeni ellenállás megnő, ami látszólagos viszkozitás-emelkedéssel jár (ezt nevezzük örvényviszkozitásnak). A sebességgel analóg módon a pillanatnyi turbulens feszültségtér és nyomástér is két részre bontható.

Kolmogorov bevezette a k ún. turbulens kinetikus energia fogalmát, és felfogása szerint ennek transzportja minden turbulens áramlásban jelen van a nagyobb örvényektől a kisebb örvények felé haladva. A turbulens áramlásban az egymással érintkező folyadékrészecskék között folyamatos impulzuscseré valósul meg és a kialakuló örvények a folyadék energiájának jelentős részét felemésztik. Kolmogorov számára indokolt volt a hossz-, az idő- és a sebességléptékek bevezetése kapcsán az $\varepsilon = -dk/dt$ turbulens kinetikus energiadisszipáció mennyiségének definiálása is, ami azt a sebességet fejezi ki, amellyel a nagyobb örvények a kisebb örvények irányában leadják az energiájukat.

Launder és Spalding kidolgozták a napjainkban széleskörben elterjedt k - ε turbulencia-modellt, amelyben a turbulens áramlást leíró mozgásegyenletek kiegészülnek a turbulens áramlás kinetikus energia (k) és a turbulens kinetikus energiadisszipáció (ε) transzportját leíró differenciálegyenletekkel.

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$$

$$\varepsilon = \nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}$$

Az ezek kapcsolatára vonatkozó összefüggések k - ε összefüggések néven váltak ismertté, és általában a következő egyenletekkel kerülnek kifejezésre:

Összenyomhatatlan folyadéokra

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_s + G_T - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_s + G_T) (1 + C_3 R_f) - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}$$

$$G_s = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$$

$$G_T = g_i \beta \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

$$R_f = - \frac{G_T}{G_s + G_T}$$

Összenyomható folyadékokra

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_s - G_{s1} - G_{s2} - G_{s3} - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_s - G_{s1} - G_{s2} - G_{s3} - \varepsilon) - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}$$

$$G_s = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$$

$$G_{s1} = \frac{2}{3} \rho k D$$

$$G_{s1} = \frac{2}{3} \mu_t D^2$$

$$G_{s3} = \frac{\mu_t}{\sigma_t \rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \frac{\partial P}{\partial x_i}$$

$$D = \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$$

A fentebbi összefüggésekben (bár ez nincs külön feltüntetve) az u_i , T , ρ , P időátlagolt értékek. A k , az ε és az örvényviszkozitás dimenzióanalízise közben fennáll a következő összefüggés:

$$\mu_t = c_t \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Az empirikus konstansokat az alábbi táblázat tartalmazza:

σ_k	σ_ε	C_1	C_2	C_3	C_t	σ_t
1	1,3	1,44	1,92	0,0	0,09	0,9

A k - ε modell a Boussinesq-féle örvényviszkozitási hipotézisen alapuló két-egyenlet modell, mert az örvényviszkozitást a k és az ε mennyiségek segítségével definiálják.

Időátlagolt Navier-Stokes egyenlet (RANS)

A nemzetközi szakirodalomban ez a módszer „Reynolds Averaged Navier-Stokes” néven terjedt el. Ez a modell az úgynevezett feszültségtranszport-modellek közé tartozik.

Reynolds nyomán a turbulens áramlást leíró alapegyenletek időátlagát kellően nagy időintervallumban képezzük. Az időátlagolás következtében a mozgásegyenletekben az ismeretlen turbulens ingadozási komponensek szorzatainak időátlagai jelennek meg, amelyek a Reynolds-féle látszólagos feszülstégtenzor elemeit alkotják. A fellépő új ismeretlenek száma minden esetben meghaladja a megoldandó differenciálegyenletek számát, ezért ezeket az

ismeretlen turbulens ingadozási komponenseket modellezni kell. A modellezés során az ismeretlen mennyiségeket tapasztalati formulákkal helyettesítik vagy ezen ismeretlen turbulens ingadozásokra nézve újabb differenciálegyenleteket vezetnek be. A feszültség transzport modellek a Reynolds átlagolt Navier-Stokes (RANS) egyenletek megoldásán alapulnak, és a Reynolds-féle látszólagos feszültségek minél pontosabb meghatározására törekszenek.

A Reynolds-féle feszültségtenzor szimmetriájából adódóan háromdimenziós turbulens áramlások esetén hat, kétdimenziós esetben három transzportegyenletet kell megoldani a kontinuitási és a mozgásegyenleteken túl. A megoldandó egyenletek mellett szükséges legalább egy járulékos egyenlet bevezetése is, amely a legtöbb esetben az ε turbulens kinetikus energia disszipációjára vonatkozik, hogy az adott turbulens áramlási feladatban szereplő egyik lépték meghatározható legyen. A modellegyenletekben ugyan nem szerepel a k turbulens kinetikus energia, de az esetek döntő többségében mégis szükséges kiszámítani, hogy az adott feladat peremfeltétel-rendszere zárt legyen. Az additív egyenletek konstansait kísérleti úton vagy direkt numerikus szimuláció segítségével határozzák meg, illetve finomítják.

A Reynolds-feszültségegyenlet modell előnye, hogy jól alkalmazható egyszerűbb és összetettebb turbulens áramlási feladatok esetén is, valamint az átlagjellemzők kiszámítása mellett a Reynolds-féle feszültségek meghatározását is lehetővé teszi.

A Reynolds feszültség egyenlet modell hátránya, hogy a megjelenő járulékos parciális differenciálegyenletek (transzportegyenletek) miatt rendkívül számításigényes.

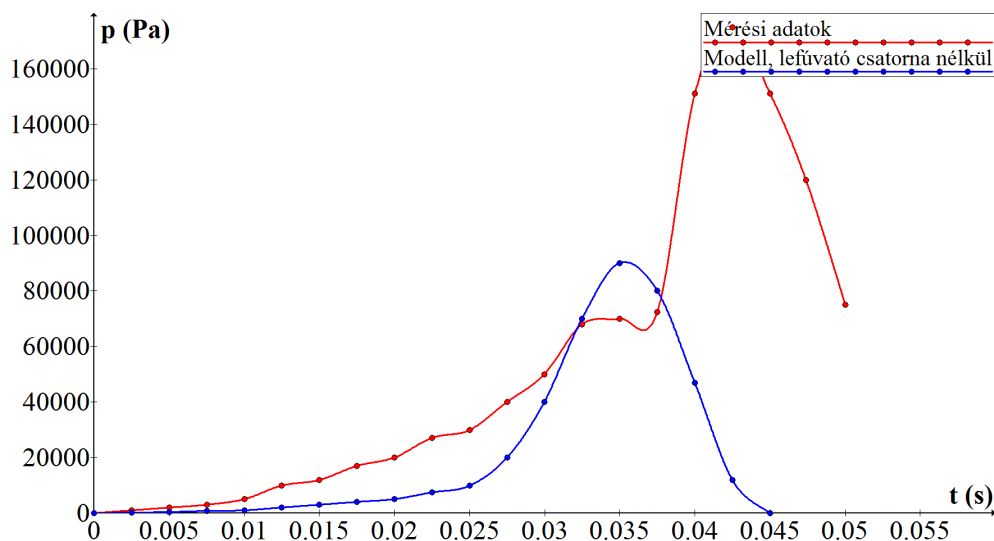
Az örvényviszkózitási modellek a Boussinesq-féle örvényviszkózitási hipotézisen alapulnak és a Reynolds átlagolt Navier-Stokes (RANS) egyenlet modellek közé sorolhatók. [10][11][12]

A fentebbi rövid leírásokat összevetve a leginkább kedvezőnek tűnő szimulációs modell a RANS, ezen belül a k - ε modell. Számítási idő és gépigény tekintetében ez a modell sokkal kedvezőbb, mint a direkt numerikus szimuláció. Viszont az e szempontból legkedvezőbb nagy örvények szimulációja sem igazán megfelelő, hiszen ez a modell a falközeli számítások során ütközik problémákba.

Modellezés

A numerikus szimulációk elvégzéséhez alapul egy, a korábbiakban megjelent forrást [13] vettem alapul. A felhasznált cikkben a szerzők magát a robbanási jelenséget egy kezdeti égési folyamattal írták le a vizsgált edényben, amelynek során az égő gáz kitágul, és a lefűvató csatornán keresztül távozik a tartályból. A forrásban modellezésre kerültek az edényben fellépő nyomásértékek lefűvató csatornával és anélkül, valamint kísérleteket is végeztek lefűvató csatorna alkalmazása mellett is. Vizsgálataim során a kísérletek során felvett mérési eredményeket alkalmaztam a számítógépes szimulációk peremfeltételeként. A forrásban leírt modellezési kiindulási adatokat vettem támpontként a saját numerikus modelleimhez. Amennyiben a numerikus szimulációk során közel azonos eredmények adódnak a forrás kísérleti eredményeivel, az általam alkalmazott numerikus modell helyes, és a továbbiakban más lefűvató csatorna geometriájú esetekhez is alkalmazható.

Az alábbi ábrán látható a forrásban található kísérleti eredmények diagramja.



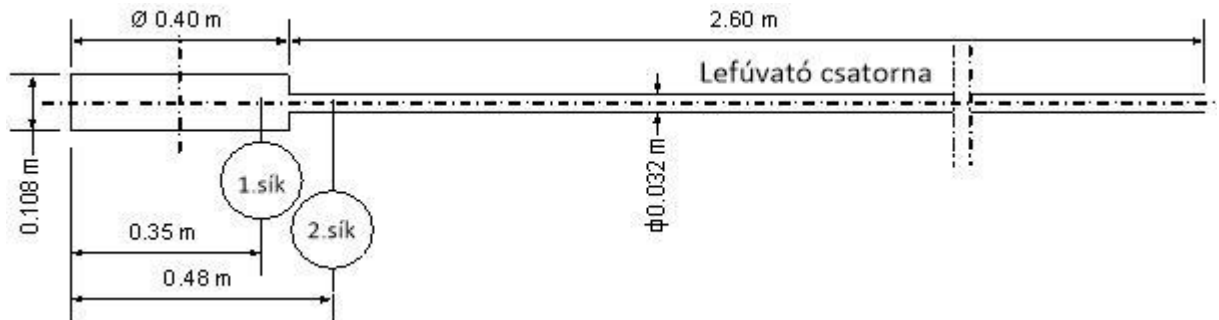
9. ábra Mérési adatok lefűvató csatornával, és modell adatok lefűvató csatorna nélkül

[13]

A forrásban 2 dimenziós tengelyszimmetrikus modellt vizsgáltak a szerzők, időben változó Reynolds-átlagolt Navier-Stokes egyenletet felhasználva. A turbulens áramlás leírásához k- ϵ modellt alkalmaztak. A háló mérete 10^{-3} , 10^{-2} mm nagyságrendű volt. A tartály-

csatorna csatlakozásnál adódtak a legkisebb elemek, mivel itt az áramláskép hirtelen változik meg. A szimuláció során a szerzők Courant-szám alapján számították az időléptéket.

Az ábrán az eredeti forrásban megtalálható geometria látható. A négyzet keresztmetszetű lefűvató csatorna oldalhossza 0,032 m volt.



10. ábra Lefűvató csatorna geometriája az eredeti forrásban [13]

A numerikus szimulációkat az SC/TETRA nevű, véges térfogat módszert alkalmazó szoftverrel végeztem el. Legelső lépésként a kívánt geometriát kell megrajzolni valamilyen CAD-rendszerű szoftverben, vagy magában az SC/TETRA szoftver SCTPrime nevű részében. A modellt a Solid Edge ST1 nevű 3 dimenziós tervezőrendszerben készítettem el.

Vizsgálataim során az eredeti geometriát kismértékben átalakítottam a könnyebb kezelhetőség érdekében. A két modell méretei azonosak, ám a tartályt az 1. keresztmetszettől kezdve rajzoltam meg, hogy a peremfeltétel könnyebben előírható legyen erre a síkra. A tartály eltávolított részében vizsgálatokat nem végeztem, és az eredményeket a kutatás ezen fázisában nem befolyásolja. A módosított geometria az ábrán látható módon néz ki:



11. ábra Az eredeti [13], valamint a módosított geometria

Magát a robbanást, mint egyfázisú rendszerben végbemenő folyamatot modelleztem. A közeg összenyomható és instacionér módon áramlik. A modellezés során fix, kis értékű (10^{-5})

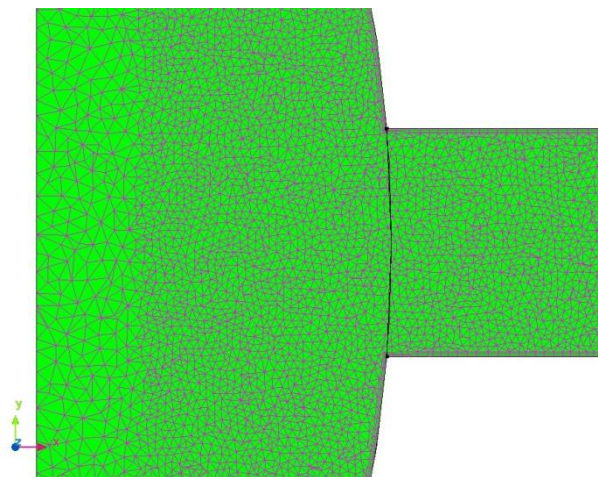
⁵ s nagyságrendű) időléptéket alkalmaztam. A szimulációk során az időátlagolt Navier-Stokes egyenletet felhasználó modellek közé tartozó k-ε turbulencia-modellt használtam.

Számításaim során az áramló közeget összenyomható levegőnek felételeztem, az analízist időben változó módon végeztem el.

Egyik peremfeltételként a felhasznált forrásban megjelenő mérési adatokat adtam meg. (9. ábra) Ezek a túlnyomás értékek az idő függvényében, a tartály kiválasztott síkjában.

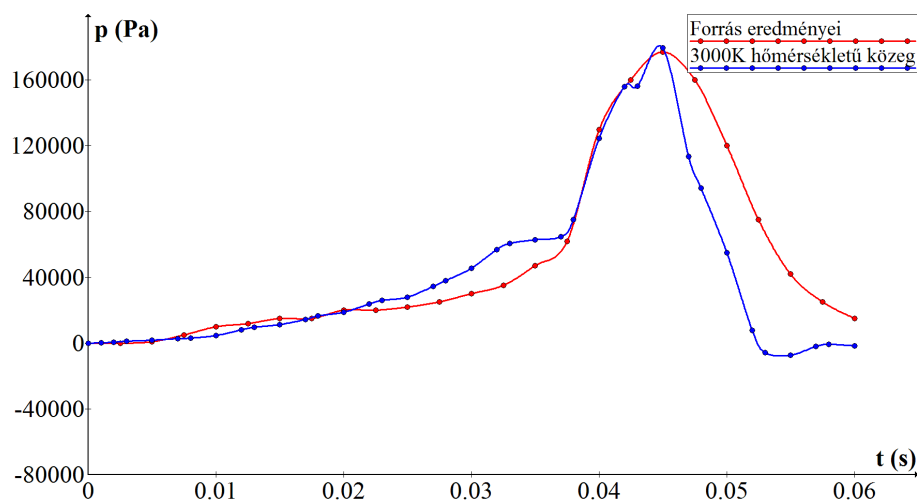
Az általam használt szoftver sajátos módon készíti el a vizsgált geometria hálóját. Első lépésben úgynevezett „octant”-okból felépíti az előhálót, majd az előhálón végzi el a szükséges sűrítéseket. Azokon a helyeken, ahol a geometria hirtelen változik, bonyolultabb lesz, ott a program automatikus hálósűrítést alkalmaz, ami azt jelenti, hogy kisebb kockákból építi fel a geometriát az adott helyen. Persze ha a felhasználó úgy ítéli meg, ott saját értéket adhat meg a háló osztására vonatkozólag.

A tényleges háló (nem struktúrált, tetraéder elemekből felépített) elkészítése ezután történik meg. A fal menti áramlások leírására prizmatikus réteget alkalmaztam. A gyakorlatnak megfelelően az általam választott feladat esetén átlagosan három rétegszám már megfelelő fal menti áramlást eredményez. Körülbelül 5 millió elemet használtam a hálóban. A háló mérete 10^{-3} és 10^{-4} mm nagyságrendű volt.



12. ábra Hálósűrítés a geometria hirtelen változásának helyén

A szimulációk elvégzése után kiértékeljük az eredményeket. Az eredeti forrásban közölt, 2. keresztmetszetben (a 1. síktól való távolsága 0,13 m) a következő eredményeket kaptam:



13. ábra Szimulációs eredmények, összevetve az forrásban közölt mérési eredményekkel

[13]

Ezeket diagramon összevetve jól látható, hogy az általam elvégzett numerikus szimulációs eredmények jól közelítik a forrásban közölt mérési eredményeket, azonban helyenként igen nagy eltérések is adódnak az egyes értékpárok között. Az eredmények diagramja három nagyobb szakaszra osztható:

A 0,02 – 0,04 s intervallumon belül lévő differenciák oka lehet, hogy amíg a forrás készítői magát a robbanást is szimulálták, addig a kutatás kezdeti stádiuma és az óriási gépigény miatt erre egyelőre nem volt lehetőség. Valószínűsíthető, hogy a forrás eredményei ebből kifolyólag sokkal pontosabbak.

Az eredményekben 0,04 s-nál bekövetkező hirtelen ugrást a következőképpen magyarázhatjuk: a vizsgált rendszer Helmholtz-oszcillátorként működik, tehát a gázzal telt térben a hirtelen nyomásnövekedés hatására a gázoszlop rugalmasan viselkedik: komprimálódik majd kitágul, mindezt egy oszcillációs folyamatban. A jelenség hasonló ahhoz, amit akkor tapasztalunk, ha egy üres üveg száján befújjuk a levegőt.

A görbék maximuma utáni csökkenő szakaszon szintén jelentős eltéréseket találunk a két görbe közt. Ez az utánégés jelenségével magyarázható, mely a saját modellemben nem található meg, viszont a forrás modelljében igen. Tulajdonképpen az utánégés azt jelenti, hogy a robbanás során az elégett gázok hirtelen felkavarják a még el nem égett anyagot, amely ennek hatására meggyullad egy másodlagos robbanást hozva létre.

Összefoglalás, további távlatok

Az iparban számos területen előforduló robbanóképes porok felhalmozódása komoly veszélyeket rejt magában. A felgyülemlett porok esetleges robbanásának kivédésére számos módszer jelent megoldást. A hasadópaneles védelem jó alternatívát nyújt a szerkezetek védelmére. A szerkezeten kívüli üzemszerek és a dolgozók testi épségének megóvása indokolja a lefúvató csatornák használatát.

Legelső lépésként áttekintettem a témához kapcsolódó szakirodalmakat és feldolgoztam a hazai és külföldi szabványokat.

Ezt követően laboratóriumi mérések segítségével határoztam meg az adott porminta robbanási tulajdonságait. A mérések elvégzéséhez szükség volt a minta egyéb tulajdonságainak megállapítására is, mint a vizsgált por nedvességtartalmának és a szemcseméret-eloszlásának vizsgálata. Előbbit gyorsnedvesség-meghatározással végeztem, utóbbit pedig szitaanalízissel. A bevizsgált por robbanási karakterisztikáját robbantókamrás kísérletsorozattal határoztam meg. Az így adódó eredményeket egy tartályban történő robbanás elleni védelem meghatározásánál alkalmaztam. Hazánkban mérvadó a magyar szabvány szerint kiszámított szükséges hasadópanel-felület, de az amerikai és német szabványok szerinti értékek jó összehasonlítási alapot adnak e mellé.

A témakör alapjaival való megismerkedés után rátérhetek a valós problémára: a szerkezetre illesztett lefúvató csatornának milyen hatása van a maximális robbanási túlnyomás értékére? Az egyes szabványos csatornaalakok hogyan befolyásolják a lefúvató során ható erők nagyságát, és a kialakuló nyomáshullámokat?

Látható, hogy az általam kapott szimulációs eredmények megközelítőleg visszaadják a valóságra jellemző görbét, azonban a modell még számos ponton finomításra szorul. További terveim közt szerepel egy sokkal pontosabb modell megalkotása. Ennek egyik sarkalatos pontja magának a kezdeti robbanásnak a pontos szimulációja, melybe beletartozik a turbulens lángterjedési sebesség valamint a megfelelő hőmérsékletprofil pontos leírása is. Ezen felül a Helmholtz-oszcillációt is fontos beépíteni a modellbe, hiszen a cél a valóság még pontosabb leírása.

Amennyiben sikerül megalkotni a megfelelő modellt, és a szimulációs eredményeket kellő számú kísérlettel alátámasztani, az adott modellre vonatkozó szimulációkat validáltnak tekinthetjük, és további mérések alátámasztására vagy helyettesítésére is felhasználhatóak lesznek a jövőben. A problémakörhöz kapcsolódó kísérleteket a Miskolci Egyetem Vegyipari Gépek Tanszékének laboratóriumában fogom elvégezni.

Források

- [1] RANGA JÁNOS – Porrobbanások
- [2] ANGELA S. BLAIR – Journal of loss prevention in the process industries
- [3] JOHN BARTON – Dust explosion prevention and protection – a practical guide
- [4] ROLF K. ECKHOFF – Dust explosions in the process industries
- [5] MSZ EN 14491: Szellőzőnyílásos porrobbanás-védelmi rendszerek
- [6] NFPA 68: Útmutató a tűzesetek elvezetéséhez
- [7] VDI 3673: Porrobbanások nyomásterjedése
- [8] MIKÁCSÓ VIKTÓRIA – T-idomban történő áramlás hőátadási tényezőjének alakulása különböző numerikus számítási módok és szoftveres szimulációs modellek függvényében (OTDK dolgozat, 2012.)
- [9] SOFTWARE CRADLE CO., LTD. –SC/Tetra Version 8 User's Guide, Thermofluid Analysis System with Unstructured Mesh Generator, Basics of CFD Analysis, 2009.
- [10] JANIGA GÁBOR – Kétdimenziós turbulens nyíróáramlások számítása sík, valamint enyhén görbült falakkal határolt csatornákkal, PhD. értekezés, Miskolc, 2002.
- [11] KÖNÖZSY LÁSZLÓ – Kétdimenziós nyíróáramlások számítása a turbulens örvénydiffúzió differenciálegyenletének megoldásával, PhD. értekezés, Miskolc, 2002.
- [12] DR. KALMÁR LÁSZLÓ – DR. BARANYI LÁSZLÓ – DR. KÖNÖZSY LÁSZLÓ – Hő- és áramlástan folyamatok numerikus modellezése
- [13] G. FERRARA, A. DI BENEDETTO, E. SALZANO, G. RUSSO – CFD analysis of gas explosions vented through relief pipes (Journal of Hazardous Materials, A137 (2006.) 654-665.)