



Evropský program školení školitelů pro zásahové jednotky

## **Přednáška 10**

### **Zvládání explozí vodíku**

### **ÚROVEŇ IV**

### **Důstojník specialista**

Informace uvedené v této přednášce jsou určeny pro úroveň **Důstojník specialista** a vyšší.

Toto téma je k dispozici také na úrovních I a III.

Tato přednáška je součástí balíčku školicích materiálů s materiály na úrovních I–IV: Hasič, velitel posádky, velitel zásahu a důstojník specialista. Viz úvod k přednášce týkající se kompetencí a očekávaných výsledků studia

Poznámka: tyto materiály jsou majetkem konsorcia HyResponder a měly by být podle toho uváděny, výstupy HyResponse byly použity coby základ



### Upozornění

Navzdory pečlivosti, která byla věnována přípravě tohoto dokumentu, platí následující odmítnutí odpovědnosti: informace v tomto dokumentu jsou poskytovány, jak stojí a leží, a jejich autoři neposkytují jakoukoli záruku, že tyto informace jsou vhodné pro jakýkoli konkrétní účel. Uživatel využívá tyto informace na vlastní nebezpečí a odpovědnost.

Dokument vyjadřuje pouze názory autorů. Společný podnik pro palivové články a vodík a Evropská unie nenesou žádnou odpovědnost za případné použití informací uvedených v tomto dokumentu.

### Poděkování

Projekt byl financován Společným podnikem pro palivové články a vodík 2 na základě grantové dohody č. 875089. Společný podnik získává podporu z programu Evropské unie pro výzkum a inovace Horizont 2020 a z Velké Británie, Francie, Rakouska, Belgie, Španělska, Německa, Itálie, Česka, Švýcarska a Norska.

## Souhrn

Tato přednáška se zabývá hlavními rysy „chemických“ explozí, tj. deflagrací a detonací, a „fyzikálních výbuchů“, tj. protržení nádrží. Pojednává o přetlácích, teplotách, rychlostech šíření plamene atd. u deflagrací a detonací. Obsahuje podrobný popis deflagrace vodíku se vzduchem v otevřené atmosféře, v uzavřené nádobě a v tunelu. Zabývá se také jevem DDT (přechod z deflagrace do detonace) a vzdáleností DDT. Pojednává též o hlavních aspektech ventilovaných deflagrací. Řeší též otázky související s detonací, coby nejhoršího možného průběhu. Jsou nastíněna možná preventivní a zmírňující opatření pro deflagrace, jevu DDT a detonace. Hodnocení účinků tlakové vlny na člověka a konstrukce se provádí pomocí nomogramů.

## Klíčová slova

Deflagrace, detonace, přechod z deflagrace do detonace, tlakové vlny, meze detonovatelnosti, velikost detonační buňky, rozsah detonovatelnosti

## Obsah

Souhrn.....	3
Klíčová slova .....	3
<b>1. Cílové publikum .....</b>	<b>6</b>
<b>1.1 Popis úlohy: Specialista .....</b>	<b>6</b>
<b>1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Specialista .....</b>	<b>6</b>
<b>1.3 Předchozí učení: Specialista .....</b>	<b>6</b>
2. Úvod a cíle.....	6
3. Užitečná terminologie .....	7
4. Výbuch plynu.....	7
5. Obecné vlastnosti deflagrace a detonace .....	9
6. Deflagrace a tlakové vlny .....	9
6.1 Deflagrace směsi vodíku se vzduchem ve volné atmosféře.....	10
6.2 Deflagrace v uzavřené nádobě .....	14
6.3 Deflagrace směsi vodíku se vzduchem v tunelu .....	18
6.4 Ventilované deflagrace.....	25
6.5 Lokalizované deflagrace směsí vodíku se vzduchem .....	30
6.5.1 Deflagrace v uzavřené nádobě .....	30
6.5.2 Ventilovaná deflagrace .....	31
7. Detonace a tlakové vlny .....	33
7.1 Přejít z deflagrace k detonaci.....	33
7.2 Náběhová vzdálenost k přechodu DDT .....	35
7.3 Meze detonovatelnosti a faktory ovlivňující rozsah detonovatelnosti .....	35
7.4 Velikost detonační buňky a struktura čela detonace .....	37
7.5 Kritický průměr potrubí pro spuštění detonace.....	40
7.6 Přímá iniciace detonací .....	40
7.7 Detonace 30% směsi vodíku se vzduchem .....	41
8. Účinky tlakových vln na člověka a budovy .....	43
8.1 Protržení samostatné nádrže při požáru .....	44
8.2 Protržení nádrže pod vozidlem při požáru .....	50
9. Vliv projektilů a úlomků.....	54
10. Možná opatření ke zmírnění následků výbuchů.....	54
10.1 Zmírnění dopadů přechodu DDT .....	55
10.2 Prevence přechodu DDT u palivových článků.....	55



Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

Poděkování .....56

Literatura a odkazy .....56

## 1. Cílové publikum

Informace uvedené v této přednášce jsou určeny pro úroveň Důstojník specialista a vyšší. Tato přednáška je k dispozici také na úrovni I: Hasič.

Níže je uveden popis úlohy, úrovně odborné způsobilosti a očekávané znalosti na úrovni důstojníka specialisty.

### 1.1 Popis úlohy: Specialista

Specialisté pomáhají veliteli zásahu radou, řízením a dohledem nad technickými operacemi, které zahrnují využití znalostí, dovedností nebo vybavení souvisejícího s konkrétním rizikem nebo činností při zásahu. Typické události se týkají nebezpečných materiálů, dopravních prostředků, klimatických jevů, narušení konstrukcí a logistiky záchranných prací.

### 1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Specialista

Vědecký, technický a empirický základ v dané oblasti s dovednostmi rozšířenými o zkušenosti, které umožňují aplikovat tyto informace a znalosti interpretovaným a užitečným způsobem tak, aby velitel zásahu a ostatní členové jednotek prvotního zásahu pod vedením specialisty mohli účinně a bezpečně reagovat na stav nouze.

### 1.3 Předchozí učení: Specialista

EQF 5 Komplexní, specializované, faktické a teoretické znalosti v oboru práce nebo studia a povědomí o mezích těchto znalostí. Ucelená řada kognitivních a praktických dovedností potřebných k rozvoji tvůrčích řešení abstraktních problémů. Výkon řízení a dohledu v kontextu pracovních nebo studijních činností, kde dochází k nepředvídatelným změnám; přezkum a rozvoj dovedností vlastních i ostatních spolupracovníků.

## 2. Úvod a cíle

Vodíkové hospodářství se stalo součástí našeho každodenního života. Vozidla na vodík již jezdí po našich silnicích. Případný výbuch vodíku může vyvolat vysoký tlak, a tím ohrozit životy a majetek. Jednou z oblastí zájmu je bezpečnost vodíkových aplikací v automobilovém průmyslu a související infrastruktury, včetně garáží, autoservisů, parkovišť a tunelů.

V předchozích přednáškách jsme se již zabývali specifickými vlastnostmi a nebezpečími, která souvisejí s různými způsoby použití technologie FCH. Tato přednáška se bude zabývat výbuchy způsobenými chemickou reakcí (tj. hořením) a „fyzikálními výbuchy“ (tj. bez hoření). Existují dva typy „spalovacích výbuchů“, tj. deflagrace a detonace. Existují i jiné typy „výbuchů“, např. „fyzikální výbuchy“ nádob při přetlaku nad stanovenou mez v důsledku přeplnění (přetlak nádoby), v důsledku neřízené reakce apod. Slovo „výbuch“ je spíše méně přesné a v této přednášce se mu budeme vyhýbat, kde a pokud to bude možné. Někdy může použití pojmu „výbuch“ vést k nedorozumění. Některé normy například nesprávně zavádějí tzv. „mez výbušnosti“ [1]. To se děje navzdory skutečnosti, že mezi „mezí hořlavosti“, která je relevantní pro deflagrace, a „mezí detonovatelnosti“ může být značný rozdíl [1]. Tato

## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

přednáška obeznámí členy zásahových jednotek s jevy souvisejícími s deflagrací a detonací, s jejich hlavními rysy a následky a s možnými způsoby prevence a zmírnění následků [1]. Podrobněji se bude věnovat nákladově nejefektivnější a nejpoužívanější technice zmírňování dopadů, jako je deflagrace s ventilací.

Na konci této přednášky bude člen zásahové jednotky / frekventant schopen:

- rozlišit mezi deflagrací a detonací,
- rozpoznat závažné následky deflagrace a detonace,
- uvést hlavní rysy deflagrace a detonace,
- rozlišit mezi deflagrací na volném prostranství a v uzavřených prostorách,
- vysvětlit jev přechodu z deflagrace do detonace (DDT),
- vyhodnotit účinek tlakové vlny způsobené roztržením skladovací nádrže (při požáru) na osoby a stavební konstrukce pomocí nomogramů,
- vysvětlit ventilaci deflagrace jako hlavní techniku zmírňování následků,
- rozpoznat účinky projektilů a úlomků ve výbuchu,
- uvést klíčovou prevenci a navrhnout možná opatření ke zmírnění následků výbuchu.

### 3. Užitečná terminologie

*Velikost článku* je parametr, který charakterizuje detonační citlivost směsi vodíku se vzduchem [2].

*Deflagrace* je jev, kde se v nezreagované směsi šíří zóna hoření rychlostí nižší než rychlost zvuku (podzvukově) do čerstvé, nespálené směsi [1].

*Detonace* je jev, kdy se v nezreagované směsi šíří zóna hoření nadzvukovou rychlostí [1].

*Rychlost plamene* je rychlost plamene vzhledem ke stanovišti stacionárního pozorovatele [2].

*Přetlak* je tlak v tlakové vlně, který je vyšší než atmosférický tlak nebo tlak uvnitř ochranné konstrukce, je vyšší než atmosférický tlak [3].

### 4. Výbuch plynu

Výbuch plynu je definován jako proces, při kterém dochází k rychlému nárůstu tlaku hoření oblaku plynu z předem vytvořené směsi, tj. paliva a vzduchu (oxidantu). K výbuchu plynu může dojít uvnitř technologického zařízení, skladovací nádrže nebo v potrubí, v budovách nebo v modulech na moři, v otevřeném technologickém prostoru nebo v uzavřených prostorách. Pokud hovoříme o výbuchu plynu jako o události, jedná se o obecnější termín. V takových případech bývá obvyklé do této události zahrnout děj před i po samotném výbuchu plynu.

## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

Při náhodném úniku hořlavého plynu nebo odpařující kapaliny do atmosféry mohou vznikat různé procesy. Pokud se oblak plynu, který vznikne při úniku, nachází mimo meze hořlavosti nebo pokud chybí zdroj zapálení, může se oblak plynu zředit a zmizet. K zapálení může dojít okamžitě, ale může se opozdit až o několik desítek minut. Vše závisí na okolnostech. V případě okamžitého vznícení (tj. dříve, než dojde ke smísení se vzduchem nebo oxidantem) dojde k požáru.

Nejnebezpečnější situace nastane, pokud se vytvoří velký hořlavý mrak premixovaného paliva se vzduchem (oxidantem) a dojde k jeho zapálení. Doba od úniku do zapálení se pohybuje od několika sekund až po desítky minut. Množství paliva se pohybuje od několika kilogramů až po několik tun.

Tlak vytvořený spalovací vlnou závisí na rychlosti šíření plamene a na tom, jak se tlak může rozšiřovat směrem od oblaku plynu (závisí na okolních podmínkách). Následky výbuchu plynu se pohybují od nulových škod až po úplné zničení. Růst tlaku způsobený výbuchem plynu může poškodit zdraví osob a způsobit materiální škody, případně vést k nehodám, jako jsou požáry a výbuch expandující páry vroucí kapaliny (BLEVE). Požáry jsou po výbuchu plynu velmi častým jevem.

Při zapálení oblaku se plamen může šířit hořlavými částmi oblaku dvěma různými způsoby. Těmito způsoby jsou *deflagrace* a *detonace*. Nejčastějším způsobem šíření plamene je deflagrace. Deflagrace se šíří podzvukovou rychlostí vzhledem k nespálenému plynu, typické rychlosti plamene (tj. vzhledem ke stacionárnímu pozorovateli) se pohybují v řádu 1–1 000 m s<sup>-1</sup>. Tlak výbuchu může v závislosti na rychlosti plamene dosahovat hodnot až několika bar. Detonační vlna je nadzvuková (vzhledem k rychlosti zvuku v nespáleném plynu před vlnou) spalovací vlna. Rázová a spalovací vlna jsou v tomto případě spojené. V oblaku paliva a vzduchu se detonační vlna šíří rychlostí 1 500–2 000 m/s a maximální tlak je obvykle 15–20 bar.

Při náhodném výbuchu oblaku směsi uhlovodíků se vzduchem (zapáleného slabým zdrojem, tj. jiskrou) začíná plamen obvykle jako pomalý laminární plamen o rychlosti řádově 3–4 m/s. Pokud je oblak skutečně neohraničený a nestojí mu v cestě překážky (tj. oblak nepohlucuje žádné zařízení ani jiné konstrukce), je nepravděpodobné, že by plamen zrychlil na rychlost vyšší než 20–25 m/s, a pokud oblak není ohraničený, bude přetlak zanedbatelný.

V budově nebo v námořním modulu s technologickým zařízením může plamen zrychlit až na několik set metrů za sekundu. Při hoření plynu se zvýší teplota a plyn se rozpíná až 8–9krát. Nespálený plyn je proto vytlačován před plamen a vzniká turbulentní proudění. Když se plamen rozšíří do turbulentního proudění, účinná rychlost hoření se zvýší a rychlost proudění a turbulence před plamenem se dále zvýší. Tento silný mechanismus pozitivní zpětné vazby způsobuje zrychlení plamene a vysoký tlak exploze a v některých případech přechod k detonaci. V uzavřeném prostoru, například v uzavřené nádobě, není vysoká rychlost plamene podmínkou vzniku tlaku. V uzavřené nádobě nedochází k žádnému nebo jen velmi malému

## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

odlehčení (tj. uvolnění) výbuchového tlaku, a proto i při pomalém procesu hoření vzniká tlak. Únik a zapálení vodíku v uzavřeném prostoru jsou podrobně popsány v přednášce 11 – Uzavřené prostory.

### 5. Obecné vlastnosti deflagrace a detonace

Jak bylo uvedeno v předchozích odstavcích, deflagrace se v nespálené směsi šíří rychlostí nižší než rychlost zvuku (podzvuková rychlost), zatímco detonace rychlostí vyšší než rychlost zvuku (nadzvuková rychlost). Čelo deflagrace se šíří difuzí aktivních radikálů a tepla ze spalin do nespálené hořlavé směsi. Čelo detonace se od čela deflagrace zásadně liší. Jedná se o komplex spojeného čelního rázu a následné reakční zóny, jak poprvé navrhl Chapman v roce 1899 a Jouguet v letech 1905–1906 [1, 4, 5]. Detonace se šíří o 2–3 řády rychleji než deflagrace a na detonačním čele vzniká tlak 15–20krát vyšší, než je počáteční tlak.

Deflagrace na otevřeném prostranství by při absenci jakýchkoli překážek mohla vyvolat přetlak (tlak vyšší než atmosférický) přibližně 10 kPa. Deflagrace v krytech nebo uzavřených prostorech mohou způsobit i přetlak mnohem výraznější. Při deflagraci roste tlak v uzavřeném prostoru prakticky rovnoměrně. Deflagraci v uzavřeném prostoru lze zmírnit *ventilací*, která představuje nejméně nákladnou a nejrozšířenější techniku zmírňování následků výbuchu.

Detonace představuje spojení rázové vlny a čela plamene, které se šíří nadzvukovou rychlostí. Rychlost detonační vlny závisí na stechiometrii směsi vodíku se vzduchem a pohybuje se v rozmezí 1 600 až 2 000 m/s. Také hodnoty přetlaku jsou mnohem vyšší: přibližně 1 500 kPa. Přínos techniky ventilace se omezuje na detonace, protože tlak dorazí na libovolné místo a ovlivní systém nebo konstrukční prvky současně s detonační vlnou, tj. není čas na výrazné „uvolnění“ tlaku. Vliv ventilace na detonaci spočívá především ve zmírnění příčných vln, což napomáhá snížení tlaku.

Nejhorším možným scénářem vodíkové havárie je detonace. Rozsah detonovatelnosti vodíku ve vzduchu se pohybuje od 11 do 59 % obj. [6], což je užší rozsah a spadá do rozmezí hořlavosti 4–75 % obj. Je třeba poznamenat, že mezní hodnoty detonovatelnosti nejsou základními charakteristikami směsi, protože silně závisí na velikosti experimentálního zařízení použitého k měření. Těmito mechanismy se budeme zabývat v dalších částech této přednášky.

### 6. Deflagrace a tlakové vlny

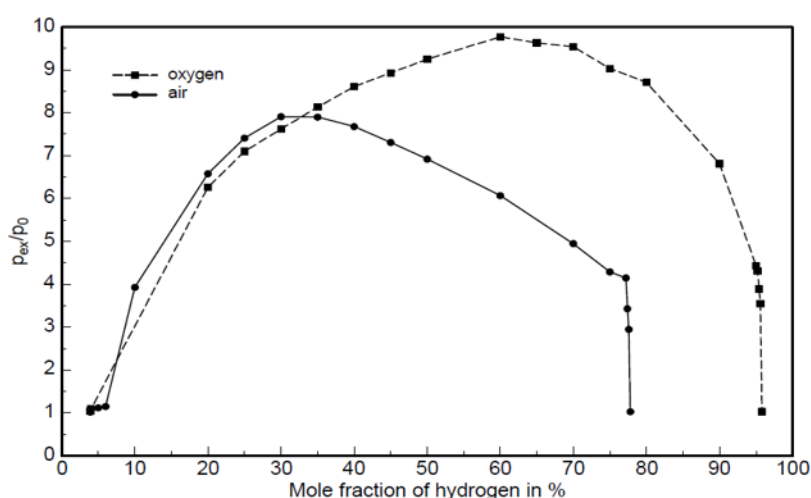
Závažnost deflagrace mohou ovlivnit následující faktory:

- Složení směsi vodíku s oxidantem (viz obrázek 1). Směsi vodíku se vzduchem v blízkosti maximální rychlosti hoření jsou náchylnější k urychlení plamene, což vede k vyššímu přetlaku.

## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

- Stejnorodost směsi vodíku s oxidantem. Nesourodé směsi se vyznačují závažnějšími důsledky než stejnorodé směsi se shodnou počáteční hmotností vodíku.
- Úroveň uzavření (tj. stěny a strop).
- Stupeň přetížení (vliv překážek). Přetížení zvyšuje turbulence, zlepšuje míchání a zrychluje spalování.

Bezrozměrný deflagrační tlak pro směsi vodíku se vzduchem a vodíku s kyslíkem je znázorněn na obrázku 1 [7] jako funkce molárního podílu vodíku (objemového zlomku) ve směsi s oxidantem (kyslíkem nebo vzduchem). Maximální deflagrační tlak stechiometrické směsi vodíku s kyslíkem v uzavřené nádobě je přibližně o 20 % vyšší než maximální tlak výbuchu stechiometrické směsi vodíku se vzduchem.



Obrázek 1. Deflagrační tlak směsi vodíku se vzduchem a vodíku s kyslíkem v uzavřené nádobě při NTP [7].

### 6.1 Deflagrace směsi vodíku se vzduchem ve volné atmosféře

Sérii experimentů s deflagracemi takřka stechiometrických směsí vodíku se vzduchem v polokulových objemech v neohraničených prostorech provedli Pfortner a Schneider [8] ve Fraunhoferově institutu pro paliva a výbušné materiály. Experimentální podmínky a maximální pozorovaná rychlost plamene ( $W_{\max}^{\text{exp}}$ ) ve vybraných zkouškách jsou uvedeny v tabulce 1. Hlavním cílem těchto experimentů bylo prozkoumat závislost rychlosti šíření plamene na velikosti oblaku směsi vodíku se vzduchem. Směsi byly zapáleny na úrovni podlahy uvnitř pláště z tenké polyethylenové (PE) fólie, aby se vyloučil vliv odražených tlakových vln. K vyhoření oblaku dochází přibližně při dvou počátečních průměrech, které se přibližně rovnají třetí odmocnině koeficientu roztažnosti produktů.

**Tabulka 1. Experimentální podmínky a výsledky různých testů provedených Pfortnerem a Schneiderem [8].**

## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

Test č.	Průměr polokoule $D_b$ , m	Objem polokoule $V$ , $m^3$	Koncentrace vodíku $C$ , % obj.	Počáteční teplota $T_i$ , K	Počáteční tlak $p_i$ , kPa	$S_{ui}^{exp}$ m/s	$W_{max}^{exp}$ m/s
GHT 26	3,06	7,5	29,2	281	99,06	2,32	43
GHT 11	10,00	262	31,0	281	100,66	2,50	60
GHT 34*	20,00	2094	29,7	283	98,93	2,39	84

\* - experimenty s drátěnou sítí ve tvaru kosočtverce nad polokulovitým balónem (při testu GHT 34 byla drátěná síť ve tvaru kosočtverce umístěna nad balón a připevněna k podlaze v 16 bodech, aby vyrovnala vztlakovou sílu přibližně 7 500 N).  $S_{ui}^{exp}$  je počáteční rychlost hoření;  $W_{max}^{exp}$  je maximální rychlost plamene.

Po vyhoření se špičkový deflagrační přetlak rozpadá v podobě tlakové vlny s kladnou a zápornou fází. Doba trvání kladné a záporné fáze je u dané velikosti balónu nezávislá na vzdálenosti. Amplituda záporné tlakové špičky byla obvykle o něco vyšší než amplituda kladné tlakové fáze a záporná fáze měla kratší trvání. Pfortner a Schneider [8] pro kulové zvukové vlny citovali teoretický výsledek odvozený Landauem [26], že v jakékoli vzdálenosti by integrál přetlaku v čase měl být roven nule.

Zpracování vizuálních snímků šíření plamene ukázalo kontinuální nárůst rychlosti šíření plamene až do maximální hodnoty, které bylo dosaženo ve vzdálenosti mezi počátečním poloměrem oblaku  $R_{hsph}$  a  $1,5 R_{hsph}$ . Pro původně klidovou stechiometrickou směs vodíku se vzduchem byla tato horní mez odhadnuta na 125 m/s při špičkovém přetlaku 13 kPa [8]. Experimentální výsledky ukazují, že rychlost šíření plamene se s rostoucí velikostí oblaku blíží horní hranici.

Při zkoušce GHT 34 odpovídající 29,7 % obj. vodíku ve směsi se vzduchem v polokouli o průměru 20 m byla maximální rychlost šíření plamene 84 m/s, přičemž počáteční rychlost hoření byla v [8] odhadnuta na 2,39 m/s (koeficient expanze zplodin hoření byl vypočten na 7,26 při hustotě hořlavé směsi  $0,8775 \text{ kg/m}^3$  a rychlosti zvuku 397,3 m/s). Chyby měření rychlosti byly vyhodnoceny jako  $\pm 5 \%$  bez zohlednění určitých asymetrií v šíření plamene.

Aby byl plamen směsi vodíku se vzduchem viditelný na denním světle, byl na konci plnění balónu rozptýlen jemně mletý prach chloridu sodného (NaCl), který vytvořil žlutě zbarvený plamen. Bylo použito 10 až 12 piezorezistivních snímačů tlaku Kistler (rozsah 100 kPa, vlastní frekvence 14 kHz). Ty byly namontovány v ocelové skříni o hmotnosti 20 kg tak, aby se jejich povrchové plochy citlivé na tlak nacházely v jedné rovině s povrchem podlahy, a pokryty 2 mm silnou vrstvou silikonového maziva na membráně, aby se předešlo jejich ovlivnění teplotou a tepelným zářením. Senzor umístěný ve vzdálenosti 5 m od zdroje zapálení byl navíc chráněn laminovanou plastovou deskou přišroubovanou k ocelovému plášti, která byla uprostřed vybavena otvorem s průměrem 4 mm. Při zkoušce GHT 34 byl další snímač tlaku

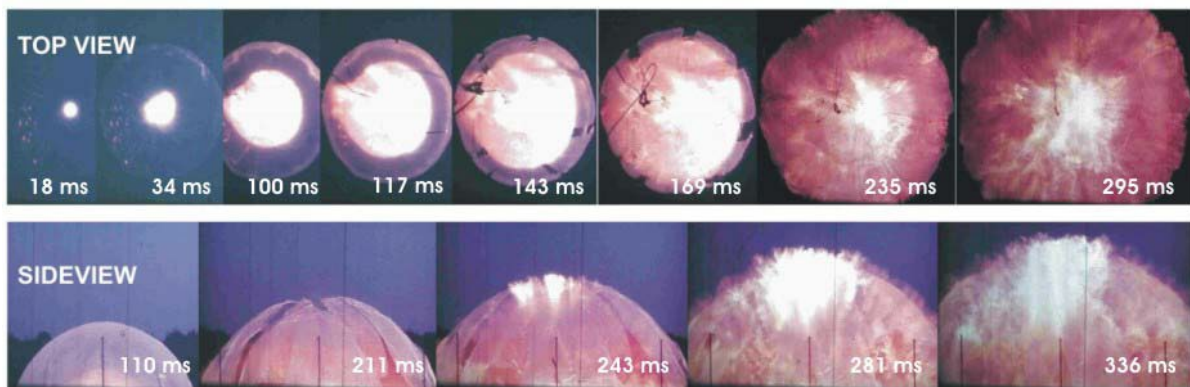


## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

instalován v pravém úhlu k ose s hlavními snímači a namontován na svislou dřevěnou stěnu  $1 \times 1 \text{ m}^2$  (měření čelem k ose).

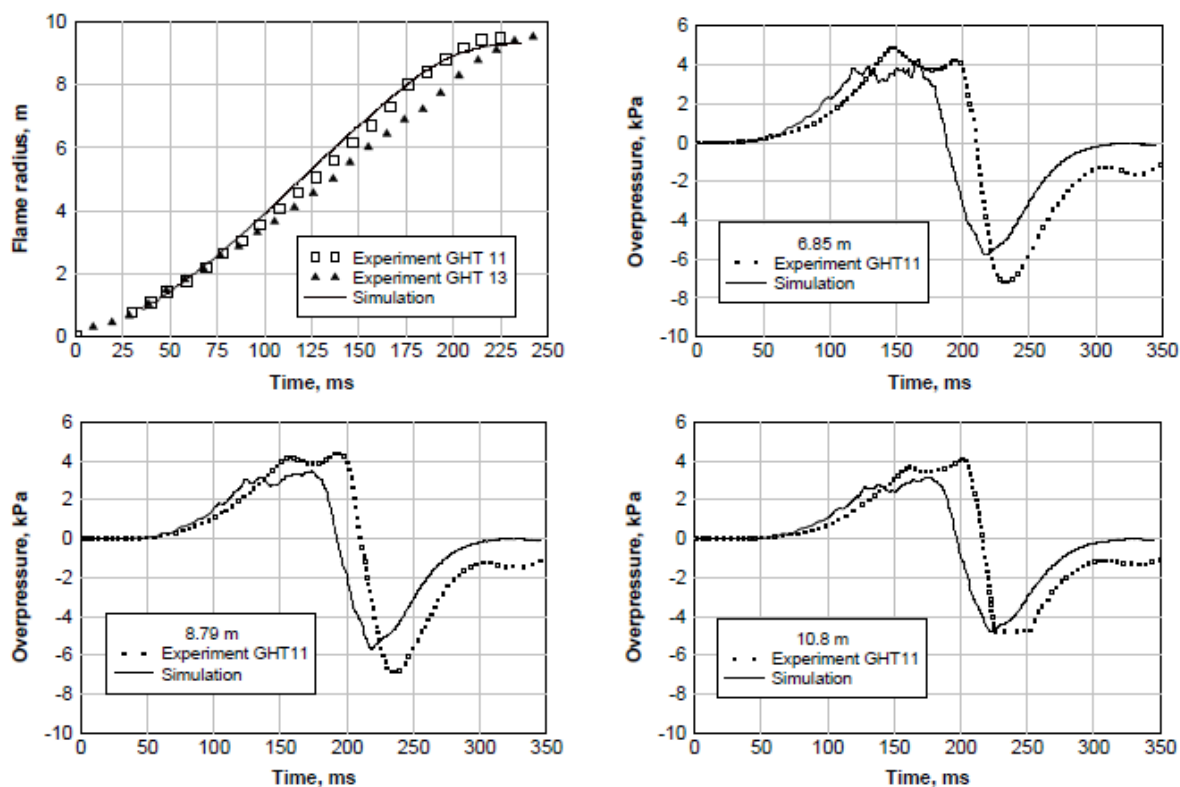
Deflagrační tlak byl měřen ve vzdálenostech 2,0, 3,5, 5,0, 6,5, 8,0, 18, 25, 35, 60 a 80 m od iniciačního bodu. Směs byla zapálena pyrotechnickou náloží s celkovou zápalnou energií 150 J. Přechnodné tlaky snímačů uvnitř zplodin hoření se po fázi podtlaku nevrátily na nulu, s výjimkou snímače instalovaného ve výšce 5 m. To lze přičíst skutečnosti, že snímače byly během výbuchu termalizovány na vysoké teploty. Protože nezůstaly na teplotě, na kterou byly kalibrovány, nebyly již zkalibrovány a nevrátily se na výchozí úroveň. Tato skutečnost svědčí o tom, že ochranná opatření, která experimentátoři přijali k izolaci těchto snímačů, byla pro takto velký test nedostatečná. Kromě toho je to také důvod, proč piezorezistivní senzory nejsou vhodné pro rozsáhlé venkovní experimenty. Tenzometrické snímače jsou naopak mnohem stabilnější a spolehlivější.

Obrázek 2 ukazuje, že plamen se šířil takřka v polokulovitém tvaru. Plášť balónu se nejprve mírně roztáhl směrem ven, až praskl, když plamen dosáhl přibližně poloviny původního poloměru balónu  $0,5R_0$ .



Obrázek 2. Snímky z testu GHT 34 na polokouli o průměru 20 m [1, 8, 9].





**Obrázek 3. Srovnání experimentu (GHT 11) a simulace pro polokulový balón o průměru 10,0 m: poloměr náběžné hrany čela plamene (vlevo nahoře); dynamika tlaku v různých vzdálenostech od zdroje zapálení – 6,85 m (vpravo nahoře), 8,79 m (vlevo dole), 10,8 m (vpravo dole) [10].**

Přetlak při výbuchu přibližně 6 kPa byl při zkoušce GHT 34 prakticky shodný v rámci vzdáleností oblaku. Po šíření plamene následovala prudká přetlaková špička  $\Delta p_F$  o hodnotě přibližně 10 kPa v tlakových přechodech. Mohlo se jednat o vliv vysoké teploty, vliv dynamiky plynu, nebo lze předpokládat, že při průchodu plamene okolo snímače tlaku došlo k zapálení plynu v prostoru mezi laminovanou plastovou deskou s otvorem o průměru 4 mm a snímačem, takže došlo k částečně omezenému výbuchu, který způsobil tlakovou špičku  $\Delta p_F$  podobnou vzniku tlakové špičky ve ventilované nádobě (výše zmíněné laminované plastové desky s otvorem o průměru 4 mm lze považovat za stěnu nádoby s ventilačním otvorem).

Srovnání experimentu a simulací pro deflagraci směsi vodíku se vzduchem (test GHT 11) v polokouli o průměru 10,0 m provedli Molkov a kol. v roce 2007 [10]. Dynamika tlaku zaznamenaná ve vzdálenosti 6,85, 8,79 a 10,8 m od zdroje zapálení je uvedena na obrázku 3.

Deflagrace plynů v otevřené atmosféře vytvářejí výstupní tlakové vlny. Akustickou teorii lze použít na tlakové vlny vytvářené deflagrací. Tlak v tlakové vlně lze odhadnout podle následujícího vzorce [11]:

$$\frac{p(t, R_w) - p_i}{p_i} = \frac{\gamma(E_i - 1)}{[1 + r_b(t)/c_0 t] E_i c_0^2} \frac{r_b(t)}{R_w} \left[ 2w^2 + r_b(t) \frac{dw}{dt} \right] \quad (1)$$

## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

kde  $r_b(t)$  je poloměr plamene v okamžiku  $t$ ,  $m$ ;  $R_w$  je vzdálenost, ve které se odhaduje tlak  $p$ ,  $m$ ;  $c_0$  je rychlost zvuku,  $m/s$ ;  $w$  je rychlost šíření čela plamene,  $m/s$ . Z tohoto vzorce vyplývá, že špička tlakové vlny závisí jak na rychlosti šíření plamene, tak na jeho zrychlení, zejména při velkých poloměrech. Zpomalení čela plamene má za následek pokles tlaku v tlakové vlně. Tento vzorec také říká, že tlaková vlna klesá nepřímě úměrně vzdálenosti od zdroje zapálení [1].

### 6.2 Deflagrace v uzavřené nádobě

Vodíková bezpečnostní projekční činnost vyžaduje předpověď tlakového zatížení pro realistické scénáře, které vždy zahrnují vznik a následné hoření nestejnorodé hořlavé směsi [1]. Model simulace velkých vírů (Large Eddy Simulations, LES) byl vyvinut pro reprodukci dynamiky chudého rovnoměrného a nerovnoměrného (postupného) spalování premixované směsi vodíku se vzduchem. Tento model byl validován na základě rozsáhlého experimentu ve válcové nádobě (výška 5,7 m a průměr 1,5 m) [12, 13].

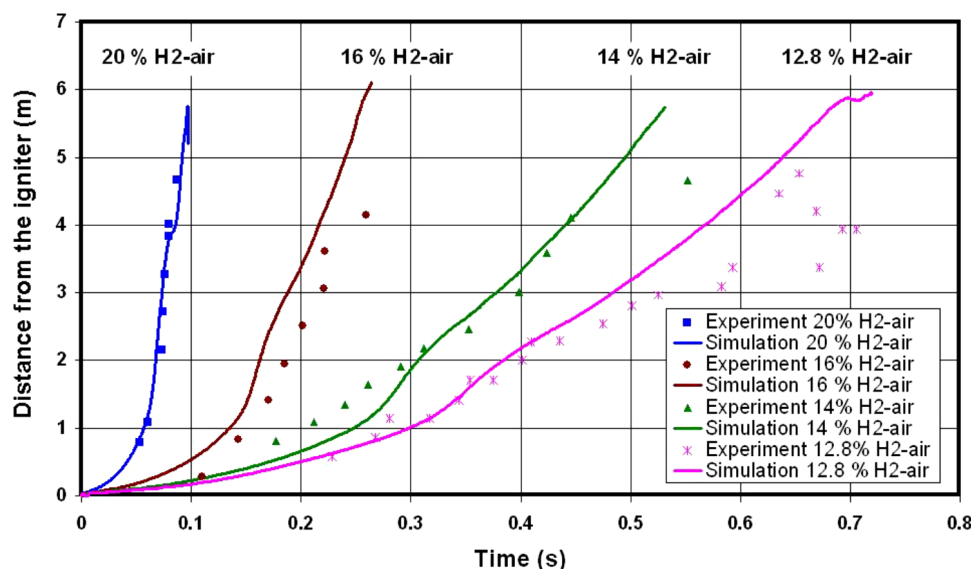
Přehled experimentálního uspořádání je uveden v následující části. Experimenty byly prováděny v hermeticky uzavřené válcové nádobě s výškou 5,7 m a vnitřním průměrem 1,5 m. Všechny experimenty byly prováděny se suchou směsí vodíku se vzduchem při teplotě  $25 \pm 3$  °C. Zdroj zapálení byl umístěn 15 cm pod horní hranou nádoby. Na obou stranách podél osy nádoby bylo rozmístěno několik termočlánků s tenkým drátem ( $75 \mu m$ ), které zjišťovaly polohu plamene v nádobě. Termočlánky byly od sebe vzdáleny 0,55 m, vertikálně, v rovině procházející osou. V různých intervalech podél osy válce bylo instalováno několik piezoelektrických snímačů.

K homogenizaci a zajištění stejnorodosti směsi vodíku se vzduchem byly použity tři ventilátory. Pro stejnorodé směsi vodíku se vzduchem obsahující 12,8, 14, 16 a 20 % obj. vodíku jsou k dispozici pouze údaje o šíření plamene podél osy válce [14]. Aby se vytvořil gradient koncentrace, byly vodík a vzduch před vstupem do horní části válce nejprve předem smíchány v malé komoře a poté byl vodík průběžně přiváděn zvyšováním koncentrace vodíku v nádobě. Rychlost růstu koncentrace vodíku byla předem stanovena pro každou zkoušku samostatně, aby se vytvořil požadovaný gradient. Po vytvoření gradientu koncentrace byly měřeny koncentrace vodíku na vertikálních místech odběru vzorků [15]. U nesourodé směsi s průměrnou koncentrací 12,6 % obj. je rozložení vodíku podél osy nádoby uvedeno v dokumentu [15]: 27 obj. % v horní části nádoby a pokles na 2,5 obj. % ve spodní části. Dynamika tlaku a šíření plamene ve směsi vodíku se vzduchem s gradientem 12,6 % obj. byla porovnána s dynamikou a šířením plamene v dobře promíchané, stejnorodé směsi s 12,8 % obj. obsahující stejné množství vodíku [15].

Vliv koncentrace vodíku a gradientu koncentrace na dynamiku deflagrace je znázorněn na obrázku 4, na kterém je porovnána experimentální dynamika šíření plamene od bodu zapálení směrem dolů podél osy nádoby [15] společně s výsledky simulace [13]. Je patrné, že

## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

1,6násobné zvýšení koncentrace vodíku (z 12,8 % obj. na 20 % obj.) vede k 7násobné rychlosti šíření plamene.



Obrázek 4. Experimentální a simulovaná dynamika šíření plamene podél osy nádoby u směsi vodíku se vzduchem s podílem 20, 16, 14 a 12,8 % obj. vodíku [13].

Nestability hoření, včetně preferenčně difuzně-tepelných a hydrodynamických, způsobují nepravidelnosti laminárního plamene, které vyvolávají vznik *buněčné struktury plamene* a následně jeho *vrásnění* [16–21].

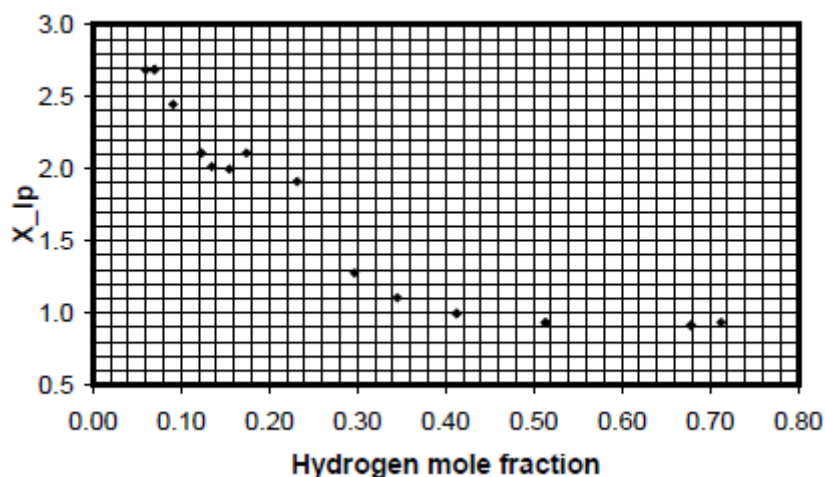
*Selektivní difuze* je jedním z jevů, které destabilizují ploché laminární čelo plamene, což je výrazné u chudých směsí vodíku se vzduchem, a tím výrazně ovlivňují dynamiku deflagrace chudých směsí. V důsledku selektivní difuze se vystupující (konvexní) vrásky do nespálené směsi šíří vyšší rychlostí než konkávní vrásky v důsledku redistribuce vodíku v blízkosti těchto vrásek. V důsledku vyšší difuzivity vodíku totiž jeho koncentrace v konvexních vráskách roste a v konkávních klesá. To vede ke zvýšení amplitudy vrásek. Tento mechanismus vede ke zvýšení rychlosti spalování, což z pohledu vnějšího pozorovatele vede ke zvýšení rychlosti hoření. Čím nižší je koncentrace vodíku, tím je tento mechanismus výraznější, což vede ke snadnějšímu urychlení a vzniku turbulencí v původně laminárních plamenech (ačkoli rychlost turbulentního hoření chudší směsi bude za shodných podmínek vždy nižší).

Selektivní difuzní účinek závisí na zakřivení vrásky, tj. je reciproční vůči poloměru [1]. Existuje zakřivení vrásky, při němž je vliv selektivní difuze na rychlost spalování hmoty maximální. Protože skutečný plamen má spektrum vrásek s různým zakřivením, plamen bude veden těmi vráskami, které mají toto optimum z hlediska maximálního zakřivení hoření. Tyto vrásky jsou zodpovědné za šíření náběžné hrany čela plamene a nazývají se „*čelní body*“. Zvýšení rychlosti plamene vede k rozvoji buněčné struktury ve spojení s tvorbou čelních plamínekových struktur, tj. čelních bodů [18, 19, 22]. Kuzněcov a Sabelnikov [22] uvedli, že rychlost turbulentního plamene je řízena rychlostí hoření těchto plamíneků na čelních bodech,

## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

kde se složení směsi lokálně mění v důsledku rozdílné difuzivity paliva a oxidantu, tj. *preferenční difuze*.

Pro zohlednění preferenčních difuzních efektů u zakřivených vodíkových plamenů byla v modelu LES použita koncepce čelního bodu [13]. Obrázek 5 ukazuje zvýšení rychlosti hoření v důsledku jevu čelního bodu pomocí jevu vedoucího bodu,  $\chi_{lp}$ . Tímto mechanismem jsou ovlivněny všechny chudé směsi. Například u směsi vodíku se vzduchem s koncentrací vodíku 10 % obj. je třeba laminární rychlost hoření vynásobit koeficientem 2,4.

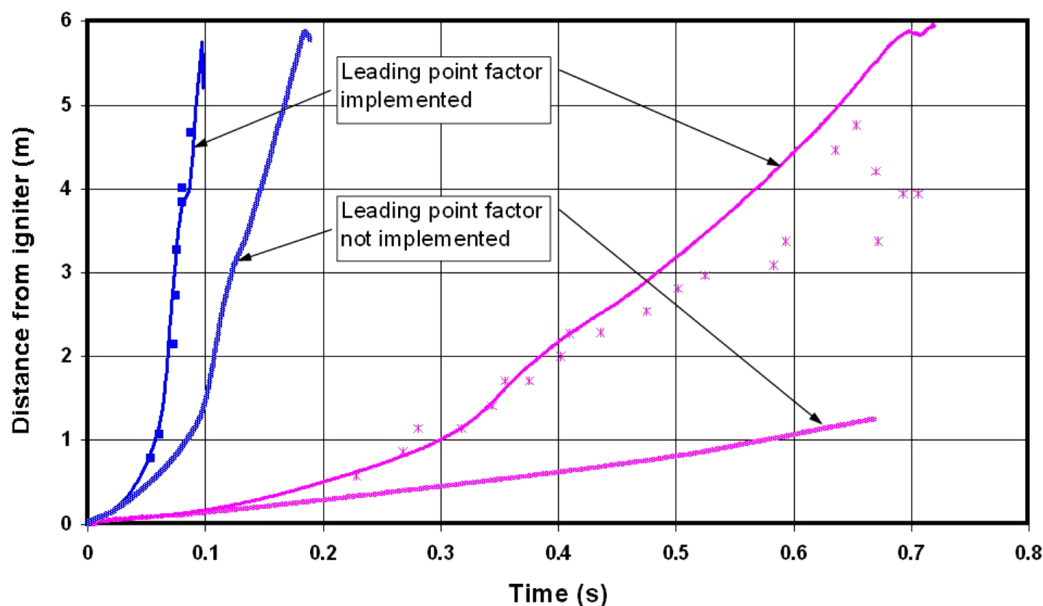


Obrázek 5. Faktor vrásnění v čelním bodě v závislosti na molárním podílu vodíku [13].

Preferenční difuzní efekt spojený se zakřivením plamene je výrazný u chudých směsí vodíku se vzduchem a musí být zohledněn v modelu spalování premixovaných směsí, aby bylo možné předpovědět dynamiku deflagrace a nárůst tlaku.

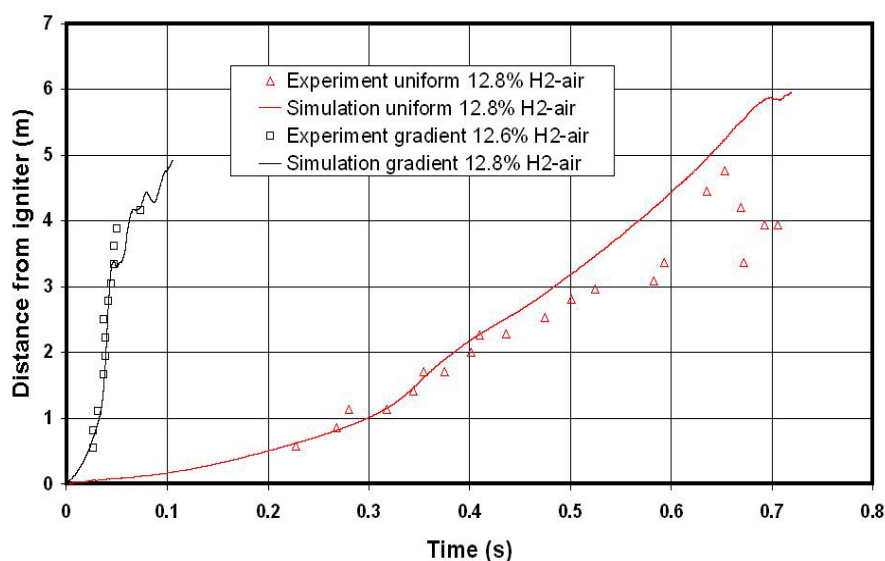
Vliv mechanismu čelních bodů na předpověď dynamiky deflagrace v chudých směsích vodíku se vzduchem je znázorněn na obrázku 6 pomocí simulace [13] stejného deflagračního experimentu v uzavřené nádobě [15]. Vidíme, že předpokládaná vzdálenost od zapalovače v různých časech je větší, pokud se zohlední vliv mechanismu čelních bodů, a výsledky simulace vykazují lepší shodu s experimentálními údaji. Bez zavedení faktoru čelních bodů do modelu rychlosti turbulentního hoření je šíření plamene ve srovnání s experimentálními daty výrazně podhodnoceno. Pro 20% obj. směsi vodíku se vzduchem je rychlost šíření plamene 44 m/s ve vzdálenosti 1 m od zdroje zapálení a 162 m/s ve vzdálenosti 3 m s turbulentní rychlostí hoření korigovanou faktorem čelního bodu a bez korekce je pouze 22 m/s ve vzdálenosti 1 m a 50 m/s ve vzdálenosti 3 m. V případě stejnorodé směsi vodíku se vzduchem v koncentraci 12,8 % obj. činí rychlost plamene 7,7 m/s ve výšce 1 m s korekcí a pouze 2,95 m/s bez korekce [1].

## Přednáška 10: Zvládnání explozí vodíku



Obrázek 6. Experimentální a simulované šíření plamene s korekcí čelním bodem a bez ní u stejnorodé směsi vodíku se vzduchem v koncentracích vodíku 12,8 % obj. a 20 % obj.

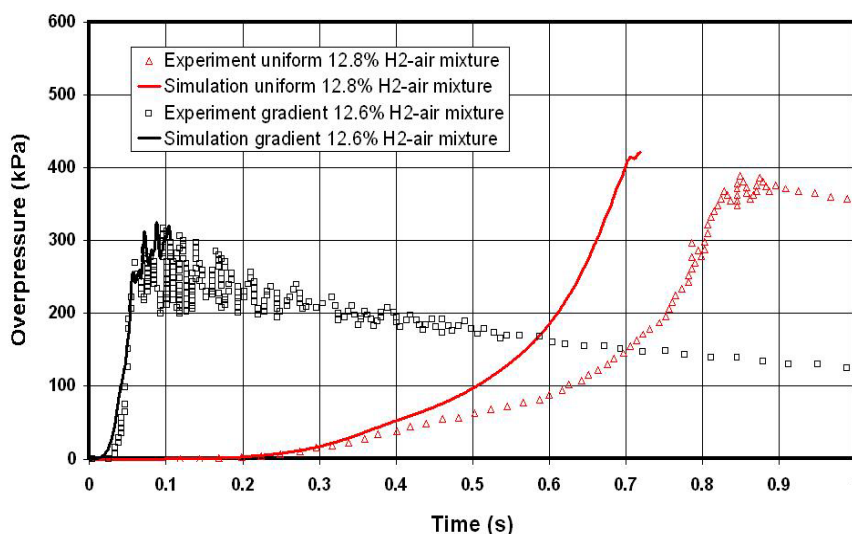
Obrázek 7 porovnává dynamiku šíření plamene pro rovnoměrnou (12,8 % obj.) a gradientní (průměrně 12,6 % obj.) směs vodíku se vzduchem. V případě scénáře s prakticky stejným množstvím uvolněného vodíku se plamen ve směsi s koncentračním gradientem šíří mnohem rychleji. To lze vysvětlit vyšší koncentrací vodíku v místě zdroje zapálení, tj. 27 % obj. vodíku, což se blíží stechiometrickému složení. Lze odhadnout, že u gradientní směsi vodíku se vzduchem dosahuje rychlost plamene 57 m/s ve vzdálenosti 1 m od zdroje zapálení a 209 m/s ve vzdálenosti 3 m od zdroje zapálení. U homogenní směsi vodíku se vzduchem v koncentraci 12,8 % obj. dosahuje rychlost plamene ve stejných místech pouze 7,7 m/s, resp. 9 m/s [1].



Obrázek 7. Experimentální a simulované šíření plamene v homogenní směsi vodíku se vzduchem při koncentraci 12,8 % a v gradientní směsi vodíku se vzduchem při koncentraci 12,6 % obj. (průměr).

## Přednáška 10: Zvládnání explozí vodíku

Srovnání experimentální a simulované dynamiky tlaku pro homogenní směs vodíku se vzduchem v koncentraci 12,8 % obj. a pro gradientní směs vodíku se vzduchem v koncentraci 12,6 % obj. je uvedeno na obrázku 8. Nárůst tlaku je ve směsi s gradientem koncentrace vodíku mnohem strmější než v případě homogenní směsi vodíku se vzduchem v koncentraci 12,8 % obj. To je v souladu s rychlostí plamene pozorovanou u deflagrací s horním zapálením jak v experimentální studii, kterou provedli Whitehouse a kol. [15], tak v simulacích [13]: směsi s gradientem koncentrace vodíku mají mnohem kratší časy do dosažení špičkového přetlaku než homogenní směsi se stejným množstvím vodíku, protože v bodu zapálení je koncentrace vodíku vyšší [1].



Obrázek 8. Experimentální a simulovaná dynamika tlaku v homogenní směsi vodíku se vzduchem při koncentraci 12,8 % a v nestejněměrné směsi vodíku se vzduchem (při průměrné koncentraci 12,6 % obj.).

Simulovaný tlak nestejněměrné směsi se tedy blíží tlaku naměřenému v experimentu. Naopak u homogenní směsi se simulovaný tlak vyvíjí rychleji než experimentální tlakové přechody. To lze vysvětlit tím, že při simulacích nedochází k tepelným ztrátám z horkých zplodin hoření do stěn. Tepelné ztráty musí v čase narůstat [1].

### 6.3 Deflagrace směsi vodíku se vzduchem v tunelu

Typické množství vodíku uloženého v osobním automobilu je asi 6 kg a v autobusu až 40 kg. Jedním z možných scénářů nehody je únik několika kilogramů vodíku z vozidla na vodíkový pohon při nehodě v tunelu, následně zapálení, a tedy deflagrace.

Rozsáhlé experimenty s deflagrací směsi vodíku se vzduchem v tunelu v měřítku 1/5 skutečného měřítká provedli Groethe a kol. [23] a později provedli simulace též Molkov a kol. [24]. Experimentátoři předložili zprávu o tlaku a impulzu (tj. časovém integrálu tlaku) generovaném takovými deflagracemi, zatímco simulace umožnily analyzovat jevy, které nebyly v experimentální studii uvedeny, např. výrazné zvýšení maximálního přetlaku při výbuchu v blízkosti překážek v důsledku odrazu tlakové vlny od překážky v pozdějších fázích

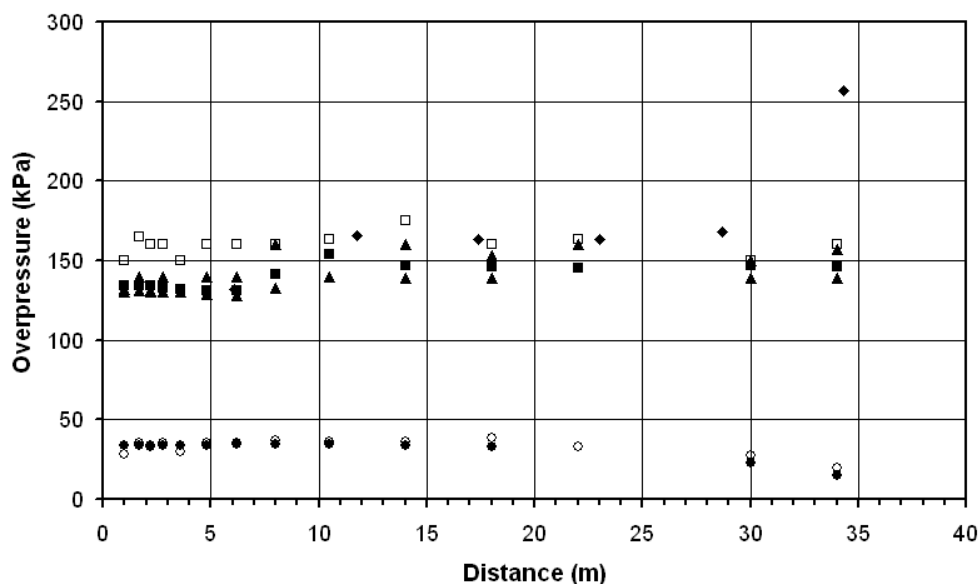


## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

události. Druhý z případů má praktické bezpečnostní důsledky: nedávná numerická studie přechodu deflagrace v detonaci (DDT) v malé uzavřené trubce obsahující směs vodíku se vzduchem, kterou provedli Gamezo a kol. [25], ukázala, že odraz rozvíjejícího se rázu od opakovaných překážek je příčinou přechodu rázu v detonaci [25].

Experimentální scénář je popsán takto. Tunel ve zmenšeném měřítku měl délku 78,5 m, výšku 1,84 m a plochu průřezu ve tvaru podkovy 3,74 m<sup>2</sup>. Uprostřed nezakrytého tunelu byly připraveny homogenní směsi vodíku se vzduchem obsahující 20 % a 30 % vodíku o celkovém objemu 37,4 m<sup>3</sup> (oblak o délce 10 m) a zapáleny ve středu tunelu na úrovni podlahy. Množství vodíku v takřka stechiometrickém (30 % obj.) oblaku vodíku se vzduchem činilo 1 kg. Další experiment s překážkami byl proveden pouze se směsí vodíku se vzduchem v koncentraci 30 % obj. Jako překážky byly použity makety vozidel o rozměrech  $D \times \check{S} \times V = 940 \times 362 \times 343$  mm. Vzdálenost mezi vozidly se rovnala délce „vozidla“. Poměr blokování (BR) pro tento typ překážky byl 0,03.

Porovnání maximálních experimentálních a simulovaných přetlaků v tunelu je u všech tří experimentů uvedeno na obrázku 9. Přetlak na boční překážce je k dispozici pouze u numerických simulací. Ve všech případech byla zjištěna dobrá shoda, přičemž hodnoty maximálního přetlaku byly při simulacích předpovězeny jen nepatrně podhodnoceně. Tento výsledek je pro validaci modelu LES velmi pozitivní vzhledem k tomu, že model byl „kalibrován“ na velmi odlišné podmínky deflagrace v otevřeném prostoru.



Obrázek 9. Hodnoty maximálního deflagračního přetlaku v tunelu (vzdálenost je uvedena od středu tunelu): 20 % obj. směsi vodíku se vzduchem (○ – experiment; ● – simulace); 30 % obj. směsi vodíku se vzduchem, tunel bez překážek (Δ – experiment; ▲ – simulace); 30 % obj. směsi vodíku se vzduchem, tunel s překážkami (□ – experiment; ■ – simulace, strop; ◆ – simulace, překážka).

## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

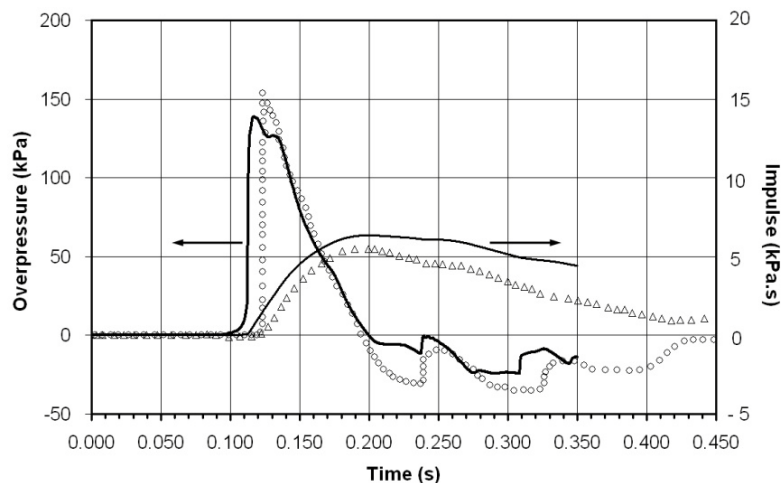
Analýza LES pro případy bez překážek a s překážkami uvnitř tunelu prokázala výrazně vyšší přetlak generovaný deflagrací na povrchu překážek (symbol  $\blacklozenge$  na obrázku 9) ve srovnání s přetlakem naměřeným na úrovni stropu (symbol  $\blacksquare$  na obrázku 9). Ve shodě s experimentálními údaji jsou maximální hodnoty simulovaného přetlaku nad úrovní překážky prakticky stejné jako experimentálně naměřené pro případy s překážkami i bez nich. S rostoucí vzdáleností od zdroje zapálení se však zvyšuje rozdíl mezi statickým přetlakem na boční překážce a statickým přetlakem na stropě. To svědčí o tom, že počáteční tlaková vlna ze spalování vytváří ráz, který se odráží od nepružného povrchu „vozidla“, a zvyšuje tak statický tlak v oblasti stagnace [1].

Tlak v odraženém rázu,  $p_3$ , lze odhadnout z hodnot počátečního tlaku,  $p_1$ , a dopadajícího rázu,  $p_2$ , podle následujícího vzorce [26]:

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{(3\gamma - 1)p_2 - (\gamma - 1)p_1}{(\gamma - 1)p_2 + (\gamma - 1)p_1} \quad (2)$$

Pro poměr měrného tepla  $\gamma=1,4$ ,  $p_1=1$  bar a  $p_2=2,5$  bar činí poměr cca  $p_3/p_2=2,2$ . Protože formování rázu ještě není dokončeno a odraz není přesně normální, je simulovaný poměr nižší než teoretický poměr a pohybuje se pouze okolo  $p_3/p_2=1,5$ .

Simulovaná struktura rázové vlny ve vzdálenosti 34 m od zdroje zapálení reprodukovala přechodné tlaky a impulsy, které se dosti blížily hodnotám naměřeným při experimentech (obr. 10). Simulovaná doba přiblížení rázu se prakticky shoduje s experimentální hodnotou. Poněkud rychlejší časy přiblížení simulovaných tlakových vln lze pozorovat na obrázku 10. To lze vysvětlit vyšší rychlostí zvuku ve zplodinách spalování v simulacích. Model totiž nezahrnuje tepelné ztráty ze zplodin. Tím by se snížila teplota, a tedy i rychlost zvuku [1].



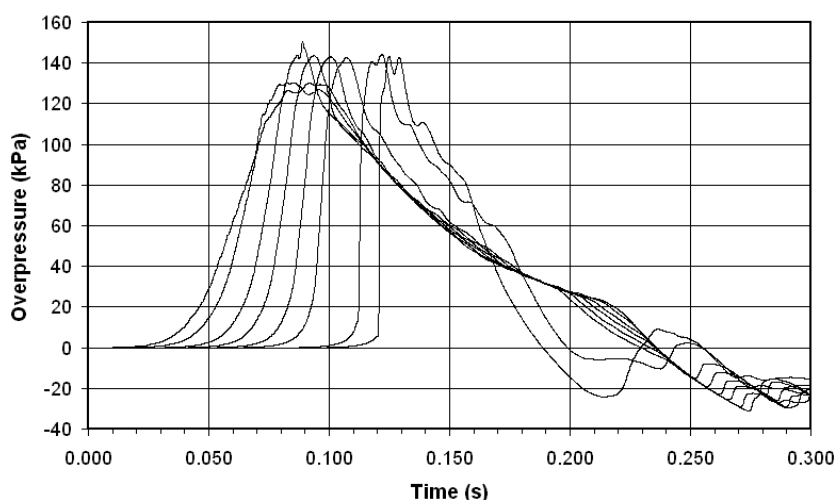
Obrázek 10. Srovnání experimentální a simulované dynamiky tlaku a impulsů ve vzdálenosti 34 m od zdroje zapálení: experimentální dynamika tlaku (kruhy) a impuls (trojúhelníky), simulovaná dynamika tlaku a impuls (plné čáry) [1].

Obrázek 11 ukazuje simulovanou dynamiku tlaku v různých vzdálenostech od zdroje zapálení v tunelu. Je patrný vznik rázové vlny se strmou náběžnou hranou z počáteční tlakové vlny šikmého tvaru během postupu deflagrace. Maximální přetlak je v celém tunelu prakticky



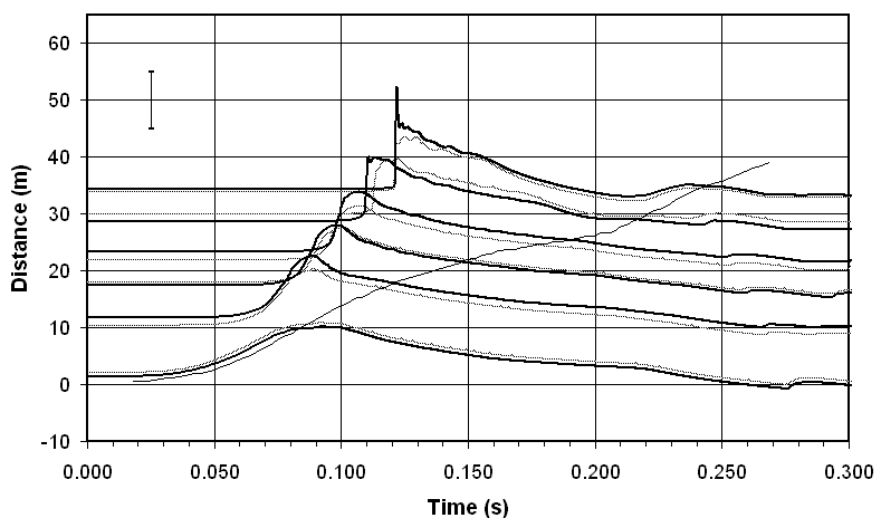
## Přednáška 10: Zvládnání explozí vodíku

stejný. S ohledem na úroveň přetlaku pozorovanou při experimentech a reprodukovanou v simulacích lze v případě uvažovaného scénáře očekávat vážné škody na životech a majetku v celé délce tunelu, protože rázová vlna nemá tendenci slábnout společně se vzdáleností [1].



Obrázek 11. Vznik rázové vlny při šíření tlakové vlny v tunelu (úroveň stropu). Simulované tlakové přechodové jevy ve vzdálenostech 2,8, 6,2, 10,5, 14, 18, 22, 30 a 34 m od zdroje zapálení [1].

Rozdíl v dynamice přetlaku na úrovni stropu a přetlaku na boční překážky v tunelu je znázorněn na obrázku 12. Na konci tunelu vzniká ráz. Tlakové přechodové jevy mají podobnou dynamiku v různých místech podél průřezu tunelu. Výjimku představuje část křivky tlaku a času v blízkosti maximálního přetlaku, která je ovlivněna absencí (strop) nebo přítomností (strana překážky) odrazu tlakové vlny. O šíření plamene uvnitř tunelu nejsou k dispozici žádné experimentální údaje. V simulacích jsou zřetelné fáze zrychlování a zpomalování náběžné hrany čela plamene (obrázek 12). Čelo plamene dosáhne konce pravé části tunelu asi 270 ms po zapálení [1].



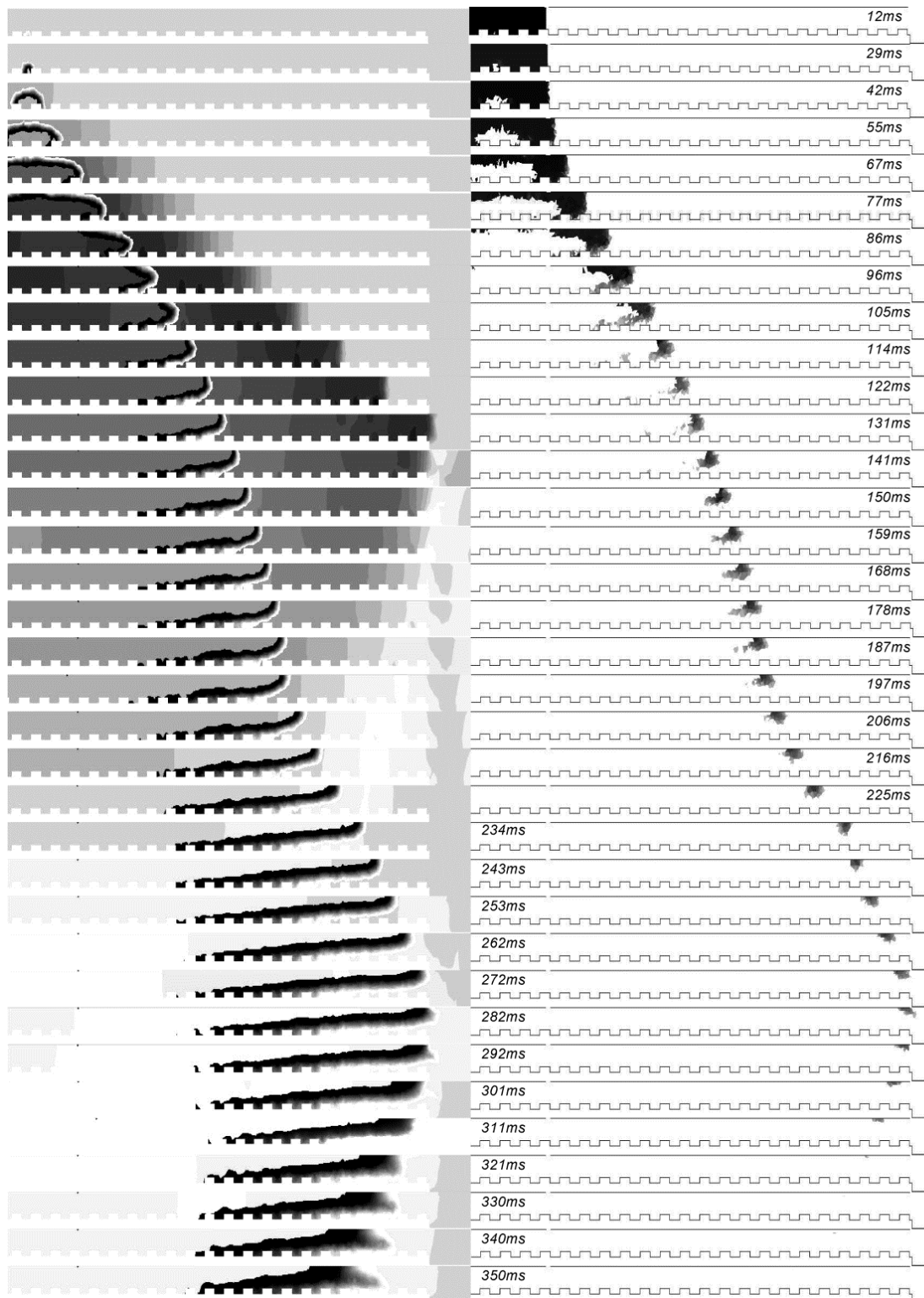
## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

Obrázek 12. Simulovaná dynamika statického přetlaku (přerušované šedé čáry – přetlaky na stropě; plné čáry – přetlaky na bocích překážek; rozmístění výpočetních tlakoměrů lze odečíst z osy Y) a dynamika šíření plamene (poloha plamene na ose tunelu v čase) [1].

Pro hlubší pochopení dynamiky deflagrace v tunelu byly analyzovány výsledky simulace. Tato analýza je uvedena na obrázku 13 (vlevo) spolu s údaji o koncentraci vodíku ve vzduchu (vpravo).

Výpočtová vizualizace přetlakového pole v tunelu, překrytého místy turbulentního čela plamene, pro řadu následných okamžiků je znázorněna na obrázku 13 (vlevo). To potvrzuje zrychlení plamene v počáteční fázi, poté zpomalení a opětovné zrychlení až téměř do okamžiku, kdy čelo plamene opustí tunel přibližně 270 ms po zapálení. Zřetelně je vidět vznik rázu v čase. Lze identifikovat oblasti s vysokým tlakem na boční překážku. Ráz opustí tunel po uplynutí přibližně 131 ms. V tomto okamžiku plamen prošel pouze polovinou tunelu. Na obrázku 13 (vlevo) je vidět rarefakční vlna (odražená záporná tlaková vlna), která se šíří uvnitř tunelu, poté co rázová vlna opustila tunel. Tato vlna a z ní plynoucí proudění jsou zodpovědné za druhé zrychlení plamene.

## Přednáška 10: Zvládnání explozí vodíku



Obrázek 13. Vlevo: tlakové a rarefakční vlny, čelo plamene ( $t < 270$  ms) a zplodiny ( $t > 270$  ms). Vpravo: šíření hořlavé směsi vodíku se vzduchem v tunelu (černá barva odpovídá 30 % obj. vodíku ve vzduchu, šedá barva odpovídá 4 % obj. vodíku). Doba po zapálení se vztahuje k oběma sloupcům [1].

Obrázek 13 (vpravo) ukazuje pohyb hořlavé směsi vodíku se vzduchem v rozsahu koncentrací vzhledem k poloze plamene; od počáteční koncentrace 30 % obj. až po dolní mez hořlavosti 4

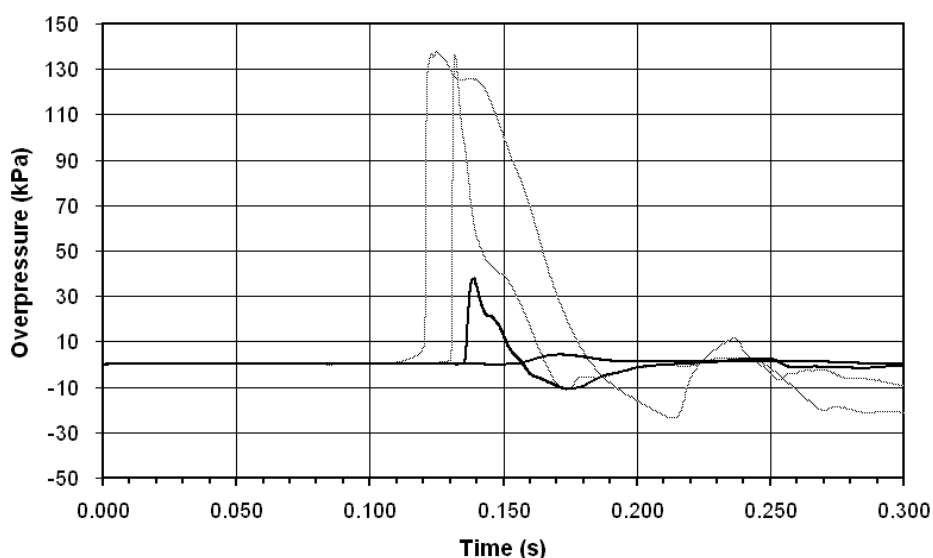
## Přednáška 10: Zvládnání explozí vodíku

% obj. vodíku ve vzduchu. Je patrné ředění původně rovnoměrné téměř stechiometrické směsi vodíku se vzduchem v koncentraci 30 % obj. (černá barva na obrázku 13 vpravo) vzduchem na kontaktní ploše v závislosti na čase. Přibližně při 140 ms dochází k podstatnému snížení objemu přítomné hořlavé směsi. Hořlavý mrak se v tuto chvíli nachází nad úrovní překážek. Pomalé hoření směsi vodíku se vzduchem v koncentracích blízkých dolní mezi hořlavosti pokračuje až do  $t=350$  ms. Po 140 ms již spalování nemá významný vliv na dynamiku proudění, naopak proudění vyvolané tlakovými vlnami je zodpovědné za druhé „zrychlení“ plamene a za zpětný pohyb plamene zpět do středu tunelu po 290 ms.

Z analýzy obrázku 13 (vlevo a vpravo) vyplývá, že přibližně 140 ms po zapálení probíhá v horní části tunelu nad překážkami hoření premixované směsi a vzniká silná vrstva směsi zplodin se vzduchem. To může pomoci při vyhodnocování tepelného nebezpečí uvnitř tunelu.

Z obrázku 12 je patrné, že zpomalování plamene začíná přibližně po 80–90 ms. Zpomalení plamene může mít dvě hlavní příčiny. První z nich je zmenšení celkové přechodové plochy čela plamene a druhou je snížení laminární rychlosti hoření v plamíncích. Přibližně v 85 ms plamen dosáhl stropu a plocha plamene se začala zmenšovat.

Přechodové tlakové jevy na dvou místech na konci tunelu a na dvou místech těsně za tunelem jsou znázorněny na obrázku 14. Tlak klesá poměrně rychle a dosahuje hodnoty přibližně 5 kPa ve vzdálenosti přibližně 1 průměru vně tunelu.



Obrázek 14. Simulovaná dynamika tlaku: tečkované (šedé) křivky – přetlak uvnitř tunelu u stropu ve vzdálenosti 34 m a 39 m od zdroje zapálení (uvnitř tunelu, 5,25 m, resp. 0,25 m od konce tunelu); plné křivky – 40 m a 42 m od zdroje zapálení (vně tunelu, 0,75 m, resp. 2,75 m) ve vzdálenosti 1,2 m, resp. 1,5 m od úrovně podlahy [1].

Deflagrace vodíku se vzduchem v uzavřených prostorách představují závažnější nebezpečí a související rizika než deflagrace ve volné atmosféře. Přetlaky zaznamenané při takřka stechiometrické deflagraci 1 kg vodíku se vzduchem v tunelu se pohybují v rozmezí 150–175 kPa [23]. To je podstatně více než přetlaky v řádu pouhých 6–10 kPa, které byly

## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

zaznamenány při stechiometrické deflagraci vodíku se vzduchem při podstatně větším množství vodíku o hmotnosti 55,5 kg ve volné atmosféře [8]. Jakmile se tlaková vlna v tunelu vytvoří, šíří se bez rozptylu a má stejný přetlak v celém tunelu. Tím se opět liší od deflagrace v otevřené atmosféře, kde přetlak klesá úměrně převrácené hodnotě vzdálenosti.

Simulace potvrdily experimentální pozorování, že překážky s blokovacím poměrem 0,03 podle testované konfigurace nemají významný vliv na maximální tlak výbuchu v tunelu mimo bezprostřední okolí překážek. Experiment i numerické simulace vykazují nepatrné rozdíly v maximálním tlaku v celé délce tunelu. Na základě analýzy LES se ukázalo, že přetlak na boční překážce může výrazně vzrůst v důsledku odrazu rázové vlny, která se v tunelu vytvoří během deflagrace.

### 6.4 Ventilované deflagrace

Spalování hořlavé směsi (tj. deflagrace) v uzavřeném prostoru (např. nádrž, místnost, sklad atd.) způsobí přetlak, který může vést k poškození a zničení zařízení a budov. Nejpoužívanější a nákladově nejefektivnější strategií pro zmírnění deflagrace v uzavřených prostorách je zajištění průduchů pro ventilaci spálených a nespálených směsí a snížení přetlaku. Bez ventilace činí maximální tlak vznikající při deflagraci zpravidla 6 až 10násobek počátečního absolutního tlaku.

Při této technice se do zařízení záměrně začlení slabá místa (ventilační otvory), která se otevřou na počátku výbuchu, čímž se odvětrají zplodiny hoření a sníží se tlak výbuchu vznikající uvnitř zařízení. K zavření ventilačních otvorů se používá řada metod, například tenké membrány, průtržné kotouče, lehké kryty držené na místě pomocí magnetických úchytů a pružinová dvířka. Otevírací tlak krytů a velikost ventilačních otvorů jsou zvoleny tak, aby tlak výbuchu byl nižší než tlak, který by poškodil zařízení. Může však být přijatelné připustit určité poškození zařízení za předpokladu, že nedojde k poškození přilehlého prostoru nebo poranění osob v blízkosti výbuchu. Výbuch by měl být ventilován do bezpečných zón, aby nedošlo k poranění osob či k materiálním škodám. Normy BS EN 14797:2006 „Zařízení pro odlehčení výbuchu“, BS EN 14994:2007 „Ochranné systémy pro odlehčení výbuchu plynu“ [29] a NFPA 68 „Norma o ochraně proti výbuchu metodou odlehčení deflagrace“ [27] poskytují pokyny pro navrhování systémů pro odlehčení výbuchu a dostupné metody pro dimenzování příslušných otvorů. Ačkoli ventilace představuje nejrozšířenější techniku pro zmírnění následku výbuchu v uzavřeném prostoru, neexistuje žádná mezinárodní referenční norma týkající se systému ochrany proti výbuchu, zejména ve vodíkových aplikacích. Evropská norma EN 14994 stanoví základní konstrukční požadavky pro výběr ochranného systému proti výbuchu plynu, ale nevztahuje se na výbuch vodíku. Norma NFPA 68 (USA) je jedinou národní normou, která se zabývá inerciálními kryty ventilačních otvorů ve vodíkových aplikacích.

Norma NFPA 68 doporučuje pro výpočet ventilační plochy, která zajistí snížení přetlaku na cílovou hodnotu, následující rovnici:

Přednáška 10: Zvládnání explozí vodíku

$$F = \left\{ [(0.127) \cdot \log(K_G) - (0.0567)] \cdot P_{red}^{-0.582} \right\} \cdot V^{2/3} + \left[ (0.175) \cdot P_{red}^{-0.572} \cdot (P_{stat} - 1) \right] \cdot V^{2/3} \quad (3)$$

ke  $F$  je ventilační plocha v  $m^2$ ;  $K_G$  je index deflagrace v  $bar \cdot m/s$ ;  $P_{red}$  e snížený tlak v bar na tlakoměru;  $V$  je objem uzavřeného prostoru v  $m^3$ ;  $P_{stat}$  je statický aktivační tlak ventilace v bar na tlakoměru. Obecně platí, že vzorec pro dimenzování ventilace (3) používaný v normě NFPA 68 (vydání z roku 2007) a její evropské verzi EN 14994 se na vodík nevztahuje. Podle „konsensu“ se pro vodík používá hodnota  $K_G$  rovnající se  $550 \text{ bar} \cdot m/s$ .

Tabulka 2. Srovnání experimentů a předpovědí pomocí techniky dimenzování ventilace [28] a rovnice použité v normě NFPA 68 [27].

Test	H <sub>2</sub> , vol. %	V <sub>i</sub> , m <sup>3</sup>	F <sub>i</sub> , m <sup>2</sup>	Vent Area, F (m <sup>2</sup> )				Reduced pressure, P <sub>red</sub>				Use of NFPA <sup>c</sup>		
				VST	% <sup>a</sup>	NFPA	% <sup>a</sup>	Exp <sup>b</sup>	VST <sup>c</sup>	% <sup>a</sup>	NFPA		% <sup>a</sup>	Exp <sup>b</sup>
K10-15-C	10	6.85	0.0177	0.0780	342	0.362	1948	0.0177	3.67	126	260.00	15900	1.625	(+)
K10-15-R	10	6.85	0.0177	0.1070	506	0.448	2435	0.0177	3.67	224	260.00	22807	1.135	(+)
K10-15-N	10	6.85	0.0177	0.0890	405	0.391	2116	0.0177	3.67	158	260.00	18171	1.423	(+)
K10-25-C	10	6.85	0.0191	0.1188	142	0.514	947	0.0491	4.47	396	46.90	5111	0.900	(+)
K10-25-R	10	6.85	0.0191	0.1693	245	0.746	1420	0.0491	4.47	829	46.90	9657	0.481	(+)
K10-25-N	10	6.85	0.0191	0.1555	217	0.682	1291	0.0491	4.47	701	46.90	8305	0.558	(+)
K10-45-C	10	6.85	0.1590	0.2214	39	0.986	521	0.1590	0.54	79	6.49	2063	0.300	(+)
K10-45-R	10	6.85	0.1590	0.3500	120	1.584	897	0.1590	0.54	298	6.49	4707	0.135	(+)
K10-45-N	10	6.85	0.1590	0.4843	205	2.212	1292	0.1590	0.54	598	6.49	8340	0.077	(+)
K15-15-C	15	6.85	0.0177	0.0753	326	0.223	1163	0.0177	5.34	46	260.00	6985	3.670	(-)
K15-25-C	15	6.85	0.0191	0.1002	104	0.238	384	0.0491	4.20	27	46.90	1321	3.300	(-)
K15-45-C	15	6.85	0.1590	0.2378	50	0.311	95	0.1590	2.68	27	6.49	209	2.100	(-)
K15-45-R	15	6.85	0.1590	0.4534	185	0.454	185	0.1590	2.68	141	6.49	485	1.110	(+)
K15-45-N	15	6.85	0.1590	0.4139	160	0.422	165	0.1590	2.68	113	6.49	417	1.255	(+)
K20-15-C	20	6.85	0.0177	0.0536	203	0.185	947	0.0177	6.14	22	260.00	5069	5.030	(-)
K20-25-C	20	6.85	0.0191	0.0819	67	0.196	300	0.0491	5.13	13	46.90	931	4.550	(-)
K20-45-C	20	6.85	0.1590	0.1643	3	0.222	40	0.1590	3.74	1	6.49	75	3.700	(-)
P1-C	29.6	0.95	0.20	0.2132	7	0.110	-45	0.2000	1.35	8	0.45	-64	1.250	(+)
P2-C	29.6	0.95	0.30	0.4176	39	0.233	-22	0.3000	0.74	85	0.26	-35	0.400	(+)
SRI-30F	30	37.4	7.48	11.95	60	1.112	-85	7.48	1.72	33	0.05	-96	1.300	(-)
SRI-20F	20	37.4	7.48	11.82	58	2.434	-67	7.48	0.78	122	0.05	-85	0.280	(-)
SRI-15F	15	37.4	7.48	7.48	0	3.127	-58	7.48	0.23	0	0.05	-77	0.220	(-)

Poznámky: Ve sloupci „Test“: C – centrální zapálení, R – zadní zapálení do ventilace, N – zapálení v blízkosti ventilace, F – zapálení u podlahy. VST je zkratka pro techniku dimenzování ventilace (z angl. „vent sizing technique“).

<sup>a</sup> – odchylka předpovědi od příslušné experimentální hodnoty vypočtená dle vzorce:  $100 \times (A_{pred} - A_{exp}) / A_{exp}$ , kde  $A$  je snížený tlak nebo plocha ventilace.

<sup>b</sup> – experimentální data.

<sup>c</sup> – použitelnost normy NFPA 68 (2007) pro předpověď konkrétního experimentu: znaménko (+) v posledním sloupci znamená, že rovnice (3) je použitelná, znaménko (-) se týká experimentálních podmínek mimo stanovený rozsah použitelnosti rovnice (3).

Tabulka 2 obsahuje příklady porovnání výsledků získaných dle normy NFPA 68 (3) a alternativní techniky dimenzování ventilace vyvinuté na univerzitě v Ulsteru [28]. V tabulce je uveden objem experimentální nádoby, ventilační plocha a objemové % vodíku v hořlavém složení. Norma NFPA 68 (3) a technika univerzity v Ulsteru použily odlišné přístupy – pro velikost ventilace zaměřenou na experimentální přetlak a pro experimentální přetlak s



## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

dodržení experimentální velikosti ventilace. Výsledky obou řešení jsou uvedeny v tabulce 3 spolu s odchylkou od experimentální hodnoty vyjádřenou v procentech. Podrobnosti o experimentech a technice dimenzování ventilačních otvorů dle univerzity v Ulsteru jsou uvedeny v dokumentu [28].

Korelace pro dimenzování ventilačních otvorů dle univerzity v Ulsteru byly použity na výbuch v tunelu takto: objem homogenní směsi vodíku se vzduchem představuje „objem uzavřeného prostoru“, přičemž „plocha ventilace uzavřeného prostoru“ se rovná dvojnásobku plochy průřezu tunelu. Další podrobnosti o porovnání experimentálních údajů a předpovědí pomocí technologie dimenzování ventilace a rovnice (3) s  $K_G=550$  bar·m/sec jsou uvedeny v dokumentu [28].

Z tabulky 2 je patrné, že norma NFPA 68 [27], a tedy i norma EN 14994 [29], v některých případech výrazně nadhodnocuje plochu ventilačních otvorů a redukovaný tlak (někdy až o 6 985 %) a v jiných případech je podhodnocuje, čímž není konzervativní ve srovnání s korelacemi pro dimenzování ventilačních otvorů, které se prokazatelně v zásadě blíží experimentálním předpovědím.

Postup pro výpočet plochy ventilačních otvorů pro prázdný uzavřený prostor zcela zaplněný klidovou směsí vodíku se vzduchem nebo uzavřený prostor s nevýznamným vlivem překážek je následující:

1. Vypočítejte bezrozměrný redukovaný přetlak při výbuchu  $\pi_{red}=P_{red}/P_i$
2. Určete bezrozměrný statický aktivační tlak  $\pi_v=(P_{stat} + P_i)/P_i$
3. Vypočítejte bezrozměrný tlakový komplex pomocí údajů z kroků 1 a 2,  $\pi_{red}/\pi_v^{2,5}$
4. Vypočítejte hodnotu turbulentního Bradleyho čísla  $Br_t$  pomocí jedné z následujících dvou rovnic v závislosti na hodnotě výše uvedeného bezrozměrného tlakového komplexu  $\pi_{red}/\pi_v^{2,5}$ :

$$\text{Jestliže } \pi_{red}/\pi_v^{2,5} \leq 1, \text{ použijte rovnici: } \pi_{red}/\pi_v^{2,5} = 5.65 \cdot Br_t^{-2.5} \quad (4)$$

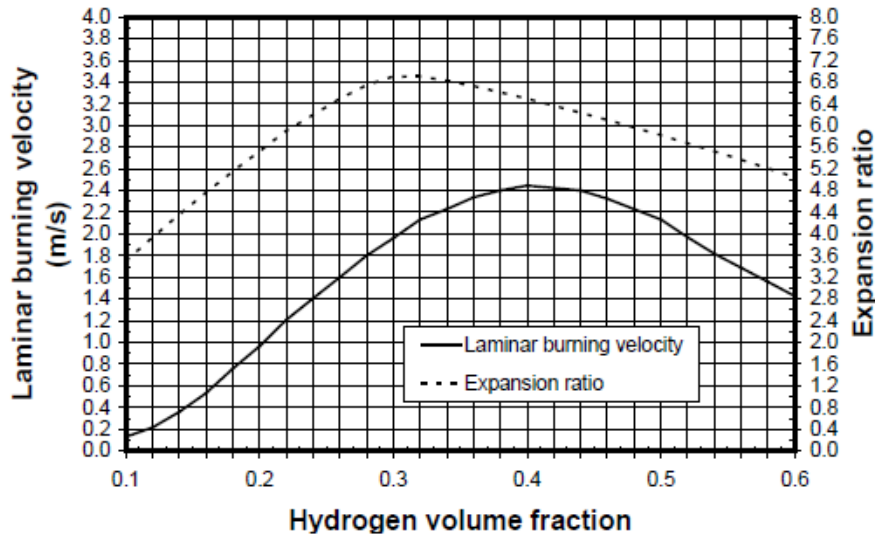
$$\text{Jestliže } \pi_{red}/\pi_v^{2,5} \geq 1, \text{ použijte rovnici: } \pi_{red}/\pi_v^{2,5} = 7.9 - 5.8 \cdot Br_t^{-2.5} \quad (5)$$

5. Pomocí níže uvedeného obrázku 15 určete příslušné hodnoty laminární rychlosti hoření a expanzního poměru pro vhodnou směs vodíku se vzduchem (podle objemového podílu vodíku ve vzduchu). Například pro stechiometrickou směs vodíku se vzduchem při NTP lze pro účely dimenzování ventilace použít následující hodnoty:  $E_i = 6,88$ ,  $S_{u0}=1,96$  m/s [30, 31]. Vliv počáteční teploty na laminární rychlost hoření lze extrapolovat ze vzorce (6):

$$S_{ui} = S_{u0} \cdot (T/298)^{m_0} \quad (6)$$

Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

kde  $S_{u0}$  je laminární rychlost hoření při teplotě 298 K (obrázek 15),  $T$  je počáteční teplota,  $m_0$  je teplotní index, který lze u takřka stechiometrických směsí vodíku se vzduchem považovat za  $m_0=1,7$  [32].



Obrázek 15. Laminární rychlost hoření a expanzní poměr pro směsi vodíku se vzduchem při počátečním tlaku 1 bar a teplotě 298 K.

6. Určete plochu ventilace numerickým řešením následující rovnice:

$$\frac{Br_t \cdot \sqrt[3]{36\pi_0} \cdot V^{2/3}}{c_{ui} \cdot \sqrt{E_i/\gamma_u}} = \frac{A(1 + \pi_v)^{0.4} \cdot \left[ 1 + 0.5 \left( \frac{A}{V^{2/3}} \cdot \frac{c_{ui}}{S_{ui}(E_i - 1)} \right)^{0.8} \right]^{-0.4}}{(1 + e \cdot V^g)^{0.4} \cdot S_{ui} \cdot (E_i - 1)} \quad (7)$$

kde empirické koeficienty  $e=2$  a  $g=0,94$  a další parametry jsou:

$A$  je ventilační plocha zařízení pro ventilaci výbuchu v  $m^2$ ;

$Br_t$  je turbulentní Bradleyho číslo;

$c_{ui}$  je rychlost zvuku za počátečních podmínek (m/s);  $c_{ui}=(\gamma_u RT_{ui}/M_{ui})^{0,5}$

$E_i$  je expanzní poměr zplodin,  $E_i=M_{ui}T_{bi}/M_{bi}T_{ui}$

$M$  je molekulová hmotnost v kg/mol

$p_i$  je počáteční absolutní tlak v bar abs

$p_{red}$  je redukovaný přetlak v bar

$p_{stat}$  je statický aktivační tlak v bar

$R$  je univerzální plynová konstanta,  $R=8,31$  J/K/mol

$S_{ui}$  je rychlost hoření za počátečních podmínek v m/s

$V$  je objem uzavřeného prostoru v  $m^3$



## Přednáška 10: Zvládnání explozí vodíku

$\gamma_u$  je poměr hodnot měrného tepla u nespálené směsi

$\pi_{red}$  je bezrozměrný maximální přetlak při výbuchu (redukovaný tlak)

$$\pi_{red} = p_{red}/p_i$$

$\pi_v$  je bezrozměrný statický aktivační tlak,  $\pi_v = (p_{stat} + p_i)/p_i$

$$\pi_0 = 3,14.$$

Korelace byly kalibrovány na základě experimentálních dat pro deflagrace směsí vodíku se vzduchem v následujícím rozsahu podmínek:

$$L/D \leq 5,43;$$

$$V \leq 37,4 \text{ m}^3;$$

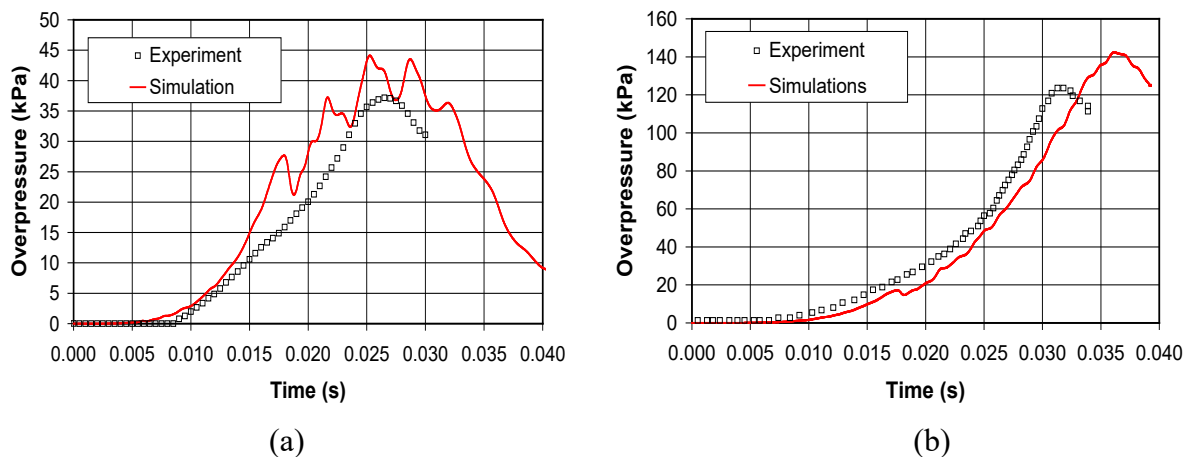
$$0,005 < A/V^{2/3} < 0,34;$$

$$0 \text{ kPa} \leq p_{stat} \leq 13,5 \text{ kPa};$$

$$p_i = 1 \text{ bar abs.}$$

$$0,3 \leq \pi_{red} \leq 5.$$

Výše uvedená metoda dimenzování ventilace umožňuje odhadnout vliv počátečního tlaku a teploty plynné výbušné atmosféry v chráněném uzavřeném prostoru. V 90 % případů se ukázalo, že tato metodika poskytuje kvalitnější předpovědi než norma NFPA 68 [27].



Obrázek 16. Srovnání experimentálních a simulovaných hodnot přetlaku u deflagrací ventilovaných přes ventilační otvor s těmito parametry: (a) průměr 0,62 m, (b) průměr 0,50 m.

Předpovědní schopnost metodiky dimenzování ventilačních otvorů je demonstrována na experimentálních datech pro deflagrace směsí vodíku se vzduchem (řada „P“ v tabulce 2). Paskan a kol. [33] prováděli experimenty ve válcové nádobě s objemem 0,95 m<sup>3</sup>, průměrem 0,97 m a délkou 1,50 m. V zadní části nádoby byla umístěna příruba k montáži průtržné membrány. Směs vodíku se vzduchem byla zapálena uprostřed nádoby. Experimenty se stechiometrickou (29,6 % obj.) směsí vodíku se vzduchem byly provedeny se dvěma různými plochami ventilačních otvorů s rozměry 0,3 m<sup>2</sup> (průměr 0,62 m) a 0,2 m<sup>2</sup> (průměr 0,50 m).

## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

Počáteční tlak v nádobě byl 101,8 kPa a teplota 281 K. Experimentální dynamika tlaku je uvedena na obrázku 16 v porovnání s výsledky numerické simulace.

Výpočetní prostředky pro posouzení přetlaku a dimenzování ventilačních otvorů budou podrobněji probrány v přednášce 11 – Uzavřené prostory.

### 6.5 Lokalizované deflagrace směsi vodíku se vzduchem

Zapálení hořlavé směsi vodíku se vzduchem ve střední části uzavřeného prostoru nebo u zadní stěny vede obvykle k vyššímu maximálnímu deflagračnímu přetlaku ve srovnání se zapálením v blízkosti ventilačního otvoru. Opožděné zapálení vodíkových proudů a úniky vytvářející lokální vysoce turbulentní mrak směsi vodíku se vzduchem mohou vést ke značnému přetlaku v okolí zapálení i navzdory poměrně nízké průměrné koncentraci v nádobě (např. ~1 % obj.). Ventilovaná deflagrace stratifikované směsi vodíku se vzduchem může vést k výrazně vyššímu přetlaku v porovnání s rovnoměrným rozložením vodíku ve vzduchu při stejném množství (tj. uskladněnou hmotností) vodíku. Přetížení (tj. vysoký poměr blokování) uvnitř uzavřeného prostoru urychluje plamen a způsobuje vyšší hodnoty deflagračního přetlaku. Deflagrační přetlak se snižuje s rostoucí ventilační plochou. Čím větší je ventilační plocha, tím vyšší koncentraci hořlavé směsi lze tolerovat, aniž by došlo ke zničení pláště uzavřeného prostoru. Účinnost ventilace deflagrace není ovlivněna orientací ventilačního otvoru (horizontální nebo vertikální). Jeden ventilační otvor s větší plochou nebo více ventilačních otvorů potlačí zrychlení plamene a vyšší deflagrační přetlaky.

K výpočtu složitých geometrických tvarů, vyššího počtu ventilačních otvorů a parametrů, které nelze popsat klasickými analytickými technologickými nástroji, lze použít výpočetní dynamiku tekutin (CFD). Modely CFD jsou schopny reprodukovat hlavní experimentálně pozorované rysy dynamiky deflagrace. Je třeba dbát na to, aby modely CFD byly validovány na stejný rozsah parametrů, ve kterém se používají: koncentrace vodíku, velikost prostoru, přetížení, rozměry ventilačních otvorů atd.

#### 6.5.1 Deflagrace v uzavřené nádobě

*Omezení zásob vodíku* představuje jednu z bezpečnostních strategií k použití vodíku uvnitř budov. K předpovědi maximální hmotnosti vodíku, který se smí uvolnit do uzavřeného prostoru, aniž by v případě jeho hoření došlo k destruktivnímu přetlaku, lze využít termodynamický model. Model předpokládá, že lokalizovaná směs vodíku se vzduchem částečně vyplňuje uzavřený prostor a hoří v hermeticky uzavřeném plášti.

Horní hranici množství skladovaného vodíku lze stanovit pomocí přetlaku 10 kPa jako kritéria pro menší poškození (např. rozbití oken apod.). Model pro zjištění maximálního objemu skladovaného vodíku pro použití ve špatně ventilovaných uzavřených prostorech nebo v uzavřených prostorech bez zvláštní ventilace byl vyvinut a ověřen v rámci pracovního balíčku 5: Všeobecně přijímané pokyny pro instalaci a použití palivových článků v interiéru při projektu HyIndoor [34]. Touto problematikou se budeme zabývat v přednášce 11 – Uzavřené prostory.

## Přednáška 10: Zvládnání explozí vodíku

Nejnižší zásoby vodíku, které zajišťovaly přetlak 10 kPa, byly získány u objemového (vol.) podílu vodíku ve směsi  $\varphi=0,04$  (tj. LFL) a objemový podíl směsi v uzavřeném prostoru  $\Phi=0,0786$ , což dává celkový objemový zlomek  $H_2$  v uzavřeném prostoru  $x_{\text{vodík}}=\Phi\cdot\varphi=3,14\cdot 10^{-3}$  (podrobnosti lze nalézt v práci Makarova a kol. [39]), což je méně, než se obvykle považuje za bezpečnostní mez LFL=0,04. Tento objemový podíl odpovídá *0,261 g vodíku na 1 m<sup>3</sup>* objemu uzavřeného prostoru. Pamatujte, že i tak může dojít k lokálnímu poškození konstrukce, pokud se uvnitř místnosti/pláště vytvoří vrstva s vyšší koncentrací vodíku a dojde k detonaci, například v místech s velkým přetížením [35].

Realističtější scénář nehody představuje deflagrace nehomogenní směsi vodíku se vzduchem v uzavřeném prostoru, kde se koncentrace vodíku mění zejména ve vertikálním směru [36, 37]. Je prokázáno, že deflagrace směsi s rozvrstvenou koncentrací vodíku mohou být nebezpečnější než deflagrace homogenní směsi se stejným množstvím uvolněného vodíku [38]. Termodynamický model byl vyvinut na univerzitě v Ulsteru pro výpočet maximálního přetlaku při lokální deflagraci směsi v uzavřeném prostoru [39]. Model slouží k odvození maximálního množství skladovaného vodíku, které může uniknout a shořet v uzavřeném prostoru o pevnosti 10 kPa (tato hodnota je typická většinu stavebních konstrukcí). Tato horní bezpečnostní mez odpovídá 7,9 % uzavřeného prostoru, který je naplněn 4 % vodíku. Očekává se, že množství vodíku nad touto hodnotou způsobí poškození konstrukcí o pevnosti 10 kPa, zatímco množství vodíku pod touto hodnotou mohou, ale nemusí způsobit poškození (pokud by došlo k lokálně vysokým přetlakům v důsledku zrychlení plamene v přetížené oblasti, mohlo by přesto dojít k poškození). Bylo zjištěno, že chyby předpovědního modelu pro uzavřený prostor v porovnání s experimentálními měřeními Stampse a kol. [40] se pohybují v rozmezí 3–13 %.

### 6.5.2 Ventilovaná deflagrace

Pokud jsou skladované zásoby větší než stanovená mezní hodnota 0,261 g  $H_2/m^3$ , je třeba zvážit použití jiných technik zmírňování dopadů (přirozená/vynucená ventilace k vyloučení tvorby hořlavé směsi, ventilace deflagrací atd.). Očekává se, že ventilace při deflagraci části objemu nebo vrstvené směsi by měla být snazší než ventilace výbuchu celého objemu, a to z důvodu menšího množství vodíku. Při stejném množství vodíku mohou deflagrace nerovnoměrně vrstvených směsí vytvářet přetlak vyšší než při deflagraci homogenních směsí. Maximální přetlak silně závisí na části směsi s největší rychlostí hoření (tj. nejvyšší koncentrací vodíku v případě chudých směsí). V rámci projektu HyIndoor byla také popsána a ověřena metoda výpočtu ventilační plochy pro prevenci vzniku destruktivního přetlaku v případě lokální deflagrace směsi [34]. Této metodě se budeme věnovat v následující přednášce.

Model a korelace pro ventilaci deflagrace lokalizovaných směsí plynů, včetně nehomogenních směsí, byly poprvé vyvinuty na univerzitě v Ulsteru [39]. Model ventilované lokální deflagrace byl poprvé navržen v roce 1996 [41]. Jeho hlavní derivační kroky jsou založeny na modelu ventilované deflagrace homogenní hořlavé směsi, která zaujímá celý objem uzavřeného prostoru [42]. Model je postaven na rovnici zachování objemu v uzavřeném prostoru zapsané v bezrozměrném tvaru pro spálenou a nespálenou směs (poslední zahrnuje hořlavou směs i

## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

nereagující vzduch). Výsledky simulace byly ověřeny na základě experimentálních údajů o deflagracích směsi vodíku se vzduchem, které jsou k dispozici v literatuře, a experimentů s rozvrstveným rozdělením plynu provedených v technologickém ústavu Karlsruhe Institute of Technology (KIT) v Německu a na úřadu Health and Safety Executive (HSE) ve Spojeném království. Rovnice pro bezrozměrný přetlak v lokalizované, ventilované deflagraci hořlavé směsi je vyjádřena takto:

$$\Delta\pi = \left( Br_t^{-1} \sqrt{\frac{E_i}{2}} \right) \cdot \min \left\{ 1.0; \left[ E_i^{2/3} \left( \frac{1 + \left(\frac{1}{\varphi} - 1\right) \frac{M_{air}}{M_f}}{1 + \left(\frac{1}{\Phi_\varphi} - 1\right) \frac{M_{air}}{M_f}} \right)^{2/3} \right]^2 \right\} \quad (8)$$

kde  $\Delta\pi$  je bezrozměrný přetlak,  $Br_t$  je turbulentní Bradleyho číslo,  $E_i$  je součinitel expanze zplodin hoření,  $\Phi$  je objemový podíl lokalizované hořlavé směsi paliva se vzduchem v uzavřeném prostoru,  $\varphi$  je objemový podíl paliva v lokalizované směsi paliva se vzduchem,  $M$  je molekulová hmotnost, indexy *air* a *f* představují vzduch a palivo. Podrobnosti jsou k dispozici v dokumentu [39].

Obrázek 17 ukazuje, že odvozená korelace reprodukovala dostupný soubor 25 experimentů ve dvou různých uzavřených prostorech s přiměřenou technickou přesností pro tak složitý jev, jakým je ventilovaná deflagrace lokalizované nehomogenní a homogenní směsi. Pro nejlepší shodu a konzervativní korelaci je parametr pro škálování přetlaku dán jako:

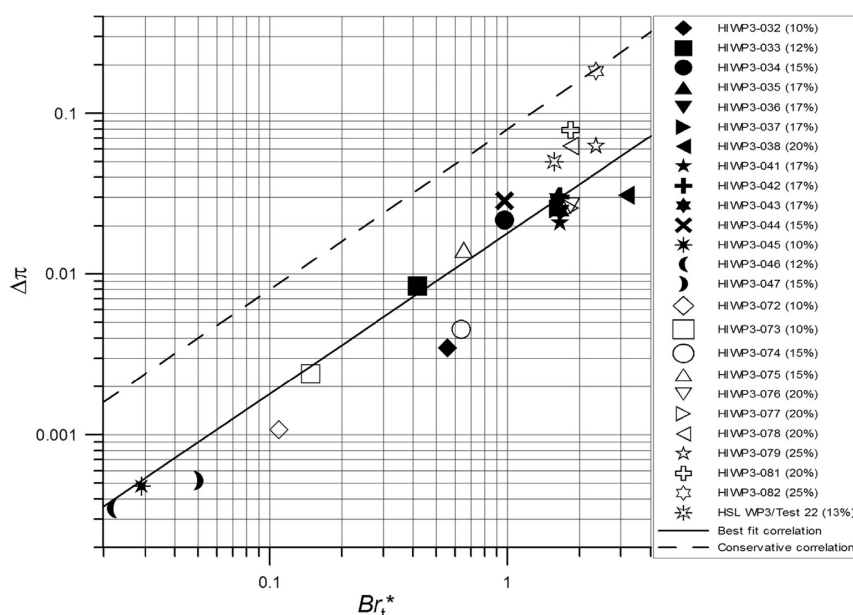
$$\Delta\pi = A \cdot Br_t^{-B} \left( \sqrt{\frac{E_i}{2}} \cdot \min \left\{ 1.0; \left[ E_i^{2/3} \left( \frac{1 + \left(\frac{1}{\varphi} - 1\right) \frac{M_{air}}{M_f}}{1 + \left(\frac{1}{\Phi_\varphi} - 1\right) \frac{M_{air}}{M_f}} \right)^{2/3} \right]^2 \right\} \right)^2 \quad (9)$$

kde parametry  $A$  a  $B$  jsou předem definované koeficienty.

Model a korelace pro ventilaci deflagrace lokalizovaných směsí plynů, včetně nehomogenních směsí, poprvé představila univerzita v Ulsteru. Model umožňuje dimenzovat ventilační otvory pro nízkopevnostní zařízení a budovy s cílem zmírnit nepříznivé následky lokálních deflagrací na osoby a majetek. Teorie ukazuje, že pouze malý zlomek nehomogenní směsi s nejvyšší rychlostí hoření určuje maximální přetlak lokalizované ventilované deflagrace. Vyvinutá korelace nejlepší shody reprodukuje experimentální data s nejvyšší přesností, pokud se za rozsah rychlosti hoření považuje 95–100 % maximální rychlosti hoření. Konzervativní korelace se doporučuje pro bezpečnostní konstrukce vodíkových systémů a infrastruktury. Jsou odvozeny koeficienty jak pro korelaci nejlepší shody ( $A=0,018$ ,  $B=0,92$ ), tak pro konzervativní korelaci ( $A=0,080$ ,  $B=0,92$ ). Kromě toho by širší rozsah experimentálních podmínek, pokud jde o velikost uzavřeného prostoru, plochu ventilace, podíl hořlavé homogenní směsi v objemu uzavřeného prostoru, podíl hořlavé nehomogenní směsi a podíl vodíku ve směsi, pomohl dále

## Přednáška 10: Zvládnání explozí vodíku

rozšířit oblast platnosti korelace pro lokalizovanou ventilovanou deflagraci, která zde byla teoreticky odvozena.



Obrázek 17. Srovnání experimentálního přetlaku, výsledků nejlepší shody a konzervativních korelací (vyplněný symbol – nehomogenní směsi, otevřené symboly – homogenní směsi) [39]

## 7. Detonace a tlakové vlny

U ventilovaných deflagrací se může být úroveň přetlaku nacházet kdekoli mezi přetlakem při deflagraci v otevřené atmosféře a deflagraci v uzavřené nádobě. Při deflagraci v uzavřené nádobě je poměr maximálního tlaku k počátečnímu tlaku podstatně vyšší a u stechiometrické směsi při NTP činí 8,15 [43]. *Detonace* je nejhorším případem náhodného spalování vodíku: charakteristický přetlak na detonačním čele stechiometrické směsi vodíku se vzduchem je dokonce vyšší než u deflagrace v uzavřené nádobě – 1,56 MPa a šíří se rychleji než rychlost zvuku – 1 968 m/s [43]. Detonační vlna je komplexem prvotní rázové a spalovací vlny a její popis je uveden v dokumentu [44]. Tloušťkou detonačního čela se rozumí vzdálenost od prvotního rázu ke konci reakční zóny, kde je dosaženo Chapman-Jouguetovy podmínky (zvukové roviny), a obvykle se pohybuje v řádu 0,1 cm.

### 7.1 Přechod z deflagrace k detonaci

Vodík je náchylný k přechodu z deflagrace k detonaci (DDT). Přechod DDT se může vyskytovat v různých prostředích, včetně potrubí, uzavřených prostorů atd. Za urychlením čela plamene na rychlost blízkou rychlosti zvuku v nespálené směsi stojí různé mechanismy, mimo jiné turbulence v nespálené směsi, turbulence generovaná samotným čelem plamene a různé nestability [1]. Poté dochází ke skoku od zvukové rychlosti šíření plamene k detonační rychlosti, která je přibližně dvojnásobkem rychlosti zvuku, alespoň u takřka stechiometrické

## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

směsi vodíku se vzduchem [1]. Jev DDT stále představuje jedno z velmi náročných témat výzkumu spalování.

Experimentálně zjištěná náběhová vzdálenost (vzdálenost od bodu vznícení k místu DDT) ve stechiometrické směsi vodíku se vzduchem v potrubí má typický poměr délky k průměru 15–40. Přítomnost překážek v potrubí může náběhovou vzdálenost DDT výrazně zkrátit. Předpokládá se, že k iniciaci detonace během přechodu DDT dochází v tzv. „horkých místech“, která se potenciálně mohou nacházet uvnitř turbulentního plamene nebo před ním, např. v ohnisku silného rázového odrazu. Zvláštnosti mechanismů přechodu DDT nemají vliv na parametry ustálené detonační vlny, která po něm následuje [1].

Velmi důležitá jsou bezpečnostní opatření k prevenci případného vzniku přechodu DDT. Zatímco deflagrace klidného stechiometrického oblaku směsi vodíku se vzduchem v otevřené atmosféře vyvolá tlakovou vlnu o tlaku pouhých 0,01 MPa (pod úrovní poranění ušního bubínku), detonaci téže směsi by doprovázel výbuch o více než dva řády vyššího tlaku, tj. okolo 1,5 MPa (dalece převyšující smrtelnou hodnotu přetlaku 0,08–0,10 MPa) [1].

Přechod DDT byl pozorován při zmírňování deflagrace v uzavřeném prostoru technikou ventilace. Ventilace deflagrace směsi vodíku se vzduchem v koncentraci 30 % obj. vodíku v prostoru podobném místnosti s vnitřní kamerou a původně uzavřenými ventilačními panely vedlo v experimentech Dorofeeva a kol. z Kurčatovova institutu v Rusku k přechodu DDT s přetlakem až 3,5 MPa. Přechod DDT vznikl pouhých několik milisekund po zničení ventilačních panelů. Potvrdil se vznik výtoku a následný lokalizovaný výbuch uvnitř krytu v blízkosti panelu. Nebyl pozorován žádný vliv velikosti zápalného proudu na počátek detonace. Objemová velikost trysky rovněž neměla žádný vliv, což svědčí o lokálním charakteru počátku detonace. Dorofeev a kol. [45] se domnívají, že počátek detonace nesouvisí přímo se zapálením trysky, ale je specificky spojen s náhlým zahájením ventilace. Ventilací lze skutečně vyvolat jehlovitou strukturu čela plamene s rozvinutým spalovacím povrchem, jak ve svých experimentech pozorovali Tsuruda a Hirano [46]. Nestability na čele plamene, zejména Rayleigh-Taylorova nestabilita, a rarefakční vlny šířící se do prostoru po destrukci ventilačního panelu posilují směšování nespálené směsi se spalinami, což může usnadnit vznik „horkých míst“. V částečně zreagovaných směsích tak může vzniknout indukční časový gradient, čímž se vytvoří podmínky pro přechod DDT. Nelze vyloučit ani možnost iniciace přechodu DDT při odrazu tlakové vlny generované tryskovým spalováním (ta by se mohla „přirozeně“ shodovat se začátkem otevírání ventilačního panelu) [1].

Přechod DDT byl pozorován při rozsáhlém testu, který provedli Pfortner a Schneider [47] v německém Fraunhoferově institutu ICT v roce 1984. Experimentální sestava zahrnovala „uličku“: (dvě rovnoběžné stěny vzdálené od sebe 3 m s výškou 3 m a délkou 12 m) a uzavřený prostor (prostor řidiče) s rozměry  $D \times \check{S} \times V = 3,0 \times 1,5 \times 1,5$  m (objem 6,75 m<sup>3</sup>) s původně otevřeným ventilačním otvorem do „uličky“ 0,82×0,82 m. „Ulička“ a uzavřený prostor byly naplněny stejnou 22,5 % obj. směsí vodíku se vzduchem, která byla zadržována plastovou fólií.

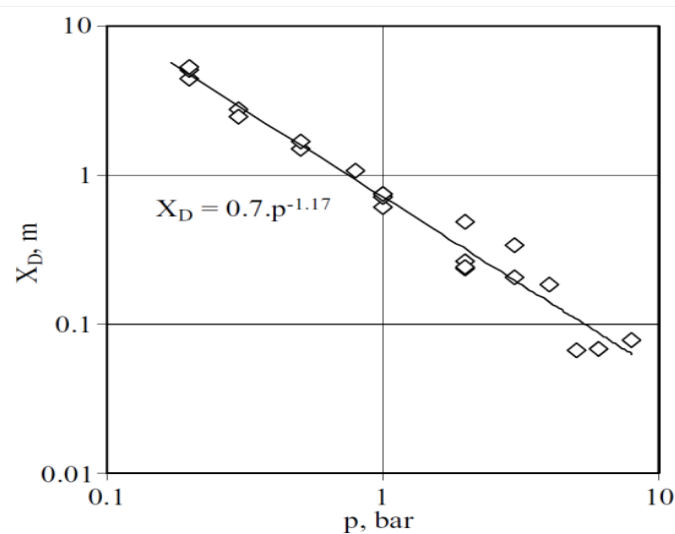


## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

Výsledkem přechodu DDT byla ventilace deflagrace směsi vodíku 22,5 % obj. se vzduchem iniciované u zadní stěny pěti zapalovači do částečně uzavřeného prostoru simulujícího „uličku“. V čase 54,61 ms po zapálení došlo k přechodu DDT v „uličce“ na úrovni podlahy, kdy se urychlený plamen vycházející z prostoru řidiče dotkl podlahy [47].

### 7.2 Náběhová vzdálenost k přechodu DDT

Vzdálenost od bodu zapálení k místu přechodu DDT, tj. náběhová vzdálenost  $X_D$ , se s rostoucím tlakem zkracuje (obrázek 18). Pro potrubí s průměrem 105 mm se jedná přibližně o 70 cm při počátečním tlaku 1 bar a zkracuje se na přibližně 7 cm při tlaku 5 bar (korelace pro  $X_D$  platí pro potrubí s vnitřním průměrem větším než 20 velikostí detonační buňky,  $d > 20\lambda$ ; bude popsáno níže) [48].



Obrázek 18. Náběhová vzdálenost k přechodu DDT v závislosti na počátečním tlaku [48]

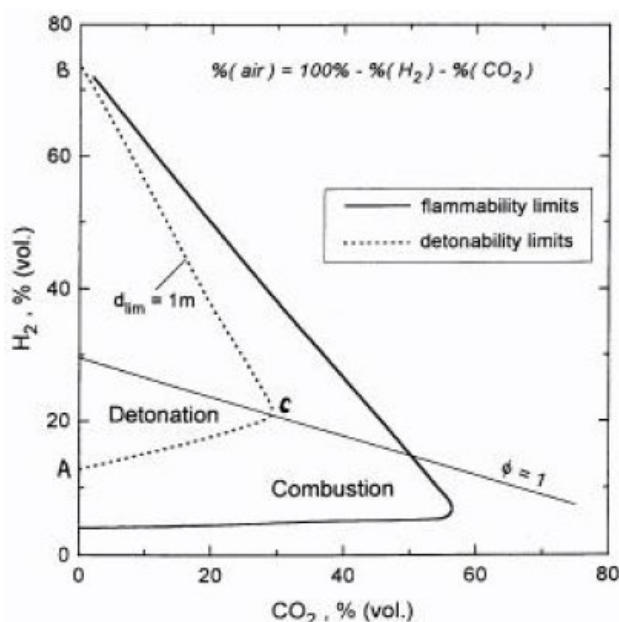
### 7.3 Meze detonovatelnosti a faktory ovlivňující rozsah detonovatelnosti

Horní a dolní meze detonace (UDL a LDL) jsou maximální a minimální koncentrace vodíku ve vzduchu nebo kyslíku, při kterých může dojít ke stabilní detonaci. Tyto meze se řídí velikostí a geometrií prostředí a také koncentrací paliva [49]. Liší se od mezí hořlavosti, které určují meze pro pomalé šíření plamene, nikoli meze pro šíření nadzvukové detonační vlny. Mezní hodnoty detonovatelnosti leží vždy v rozsahu hořlavosti. Mezní hodnoty detonovatelnosti nejsou základními charakteristikami směsi, protože silně závisí na povaze, velikosti a uspořádání experimentu. Průměr potrubí, v němž se může detonace šířit, by měl být řádově stejný jako velikost detonační buňky  $\lambda$  (viz níže).

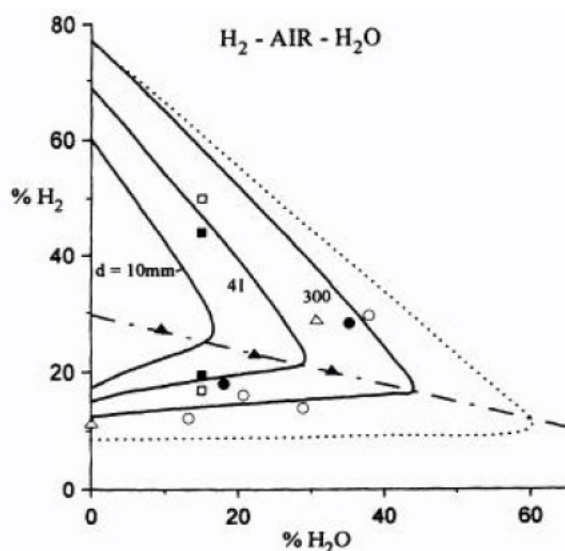
Rozsah detonovatelnosti uvedený technické zprávě normy ISO/TR 15916:2004 [50] činí 18–59 % obj. vodíku ve vzduchu. Pro směs vodíku se vzduchem v potrubí s průměrem 43 cm se uvádí rozsah detonace 13–70 % obj. [51]. Ještě nižší hodnota meze detonovatelnosti 12,5 % obj. byla zjištěna v ruské detonační zkušebně RUT, největší svého druhu [1]. Alcock a kol. doporučují používat nejširší rozsah detonovatelnosti vodíku ve vzduchu 11–59 % obj. [13]. [6].

## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

Rozsah detonovatelnosti závisí na povaze oxidantu. Například pro směsi vodíku se vzduchem se uvádí rozsah detonovatelnosti 18,2–58,9 % obj., zatímco pro směsi vodíku s kyslíkem 15–90 % obj. [52]. Zvýšení teploty ( $T$ ) z 293 na 373 K vede k rozšíření rozsahu detonovatelnosti: LDL se u směsi vodíku se vzduchem sníží z 11,6 na 9,4 % obj., zatímco UDL se zvýší ze 74 na 76,9 % obj. Rozsah detonovatelnosti také silně závisí na přidavku ředidel do směsí obsahujících vodík. Vliv tří ředidel, oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ), vody ( $\text{H}_2\text{O}$ ) a dusíku ( $\text{N}_2$ ), na meze detonovatelnosti a hořlavosti je znázorněn na obrázcích 19–21.

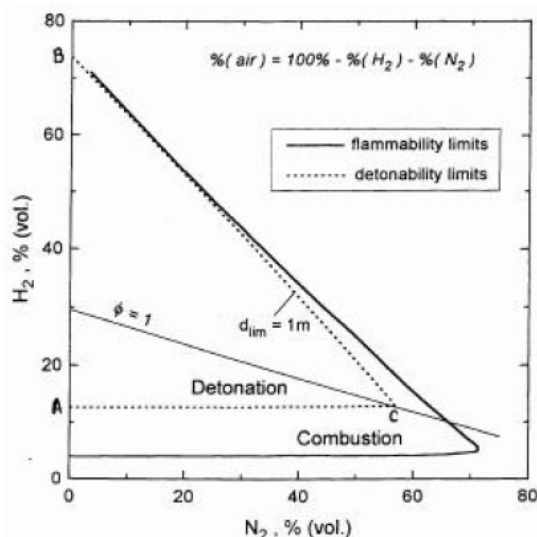


Obrázek 19. Vliv přidavku oxidu uhličitého do směsi vodíku se vzduchem na rozsah detonovatelnosti/hořlavosti [53].



Obrázek 20. Vliv přidavku vody do směsi vodíku se vzduchem na rozsah detonovatelnosti [53].



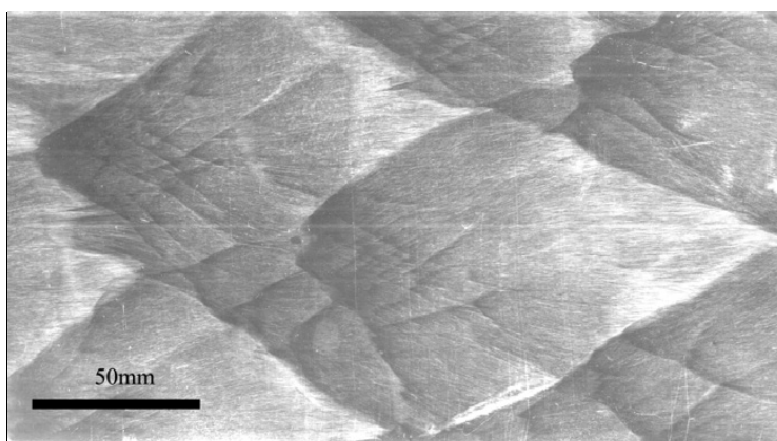


Obrázek 21. Vliv přidavku dusíku do směsi vodíku se vzduchem na rozsah detonovatelnosti [53].

Přídavek oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ) coby ředidla výrazně mění rozsah detonovatelnosti směsi vodíku se vzduchem, který se v přítomnosti tohoto ředidla snižuje (obrázek 19). V přítomnosti vody se také výrazně snižuje rozsah detonovatelnosti. Velikost průměru potrubí ovlivňuje také rozsah detonovatelnosti směsi vodíku se vzduchem (obrázek 20). V přítomnosti dusíku ( $\text{N}_2$ ) se s rostoucí koncentrací ředidla výrazně snižuje UDL, ale LFL a LDL zůstávají takřka beze změny (obrázek 21).

#### 7.4 Velikost detonační buňky a struktura čela detonace

Jakmile se detonace spustí, šíří se tak dlouho, dokud se směs, za předpokladu dostatečné velikosti oblaku, nachází v mezích detonovatelnosti. Detonační vlna má složitou 3D strukturu s charakteristickým rybím vzorem, jak je znázorněno na obrázcích 22 a 23 [54] a dále na obrázku 25 [58].



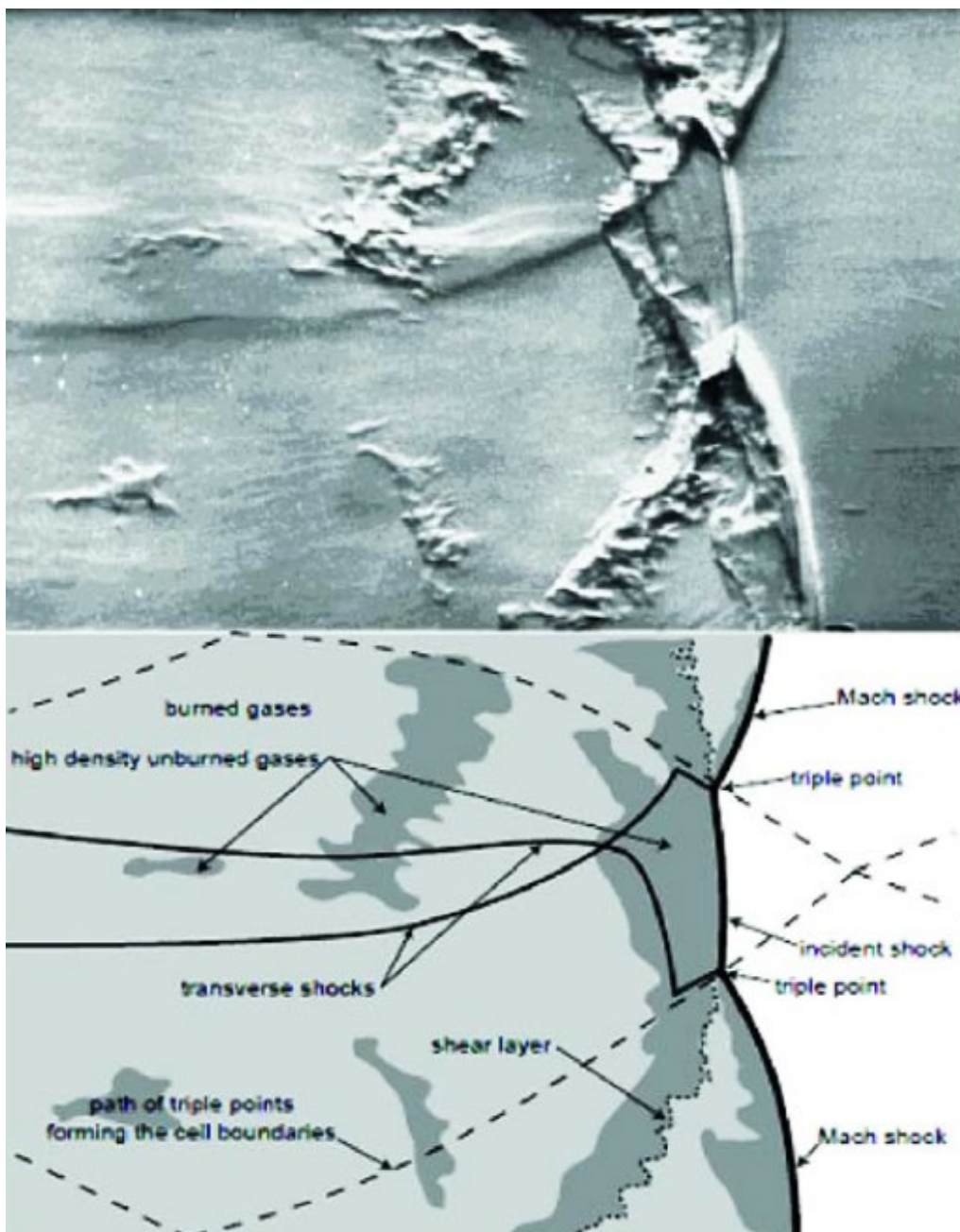
Obrázek 22. Buněčná struktura detonační vlny (detonace se šíří zleva doprava) [54].

Detonace se může šířit kanály s charakteristickou velikostí řádu velikosti detonační buňky ( $\lambda$ ). Velikost detonační buňky je měřítkem reaktivity směsi paliva s oxidantem. Čelo vlny není

## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

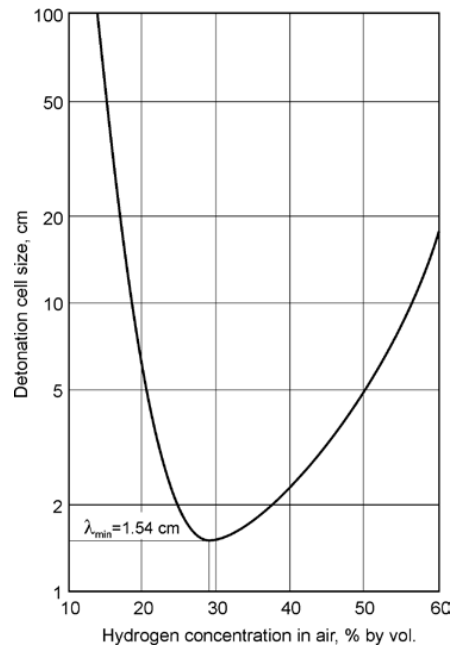
rovinné a skládá se z reakčních buněk. Vysoce reaktivní směsi, jako je například směs acetylenu se vzduchem, se vyznačují velmi malou velikostí buněk (přibližně 1 mm).

Délky detonačních buněk u stechiometrických směsí vodíku se vzduchem a vodíku s kyslíkem při počátečním tlaku 101,3 kPa se uvádějí 15,9 mm a 0,6 mm [55]. To znamená, že detonace vodíku s kyslíkem se může šířit kanály menších rozměrů ve srovnání s detonací směsi vodíku se vzduchem. Velikost detonační buňky je funkcí složení směsi. Závislost velikosti detonační buňky ( $\lambda$ ) u směsi vodíku se vzduchem na koncentraci vodíku je uvedena na obrázku 24 [56]. V jiné experimentální práci byly naměřeny hodnoty velikosti detonační buňky u stechiometrické směsi vodíku se vzduchem 1,1–2,1 cm [57].



Obrázek 23. Šlírová (clonková) fotografie hydrodynamické detonační struktury a vysvětlující schéma [54].

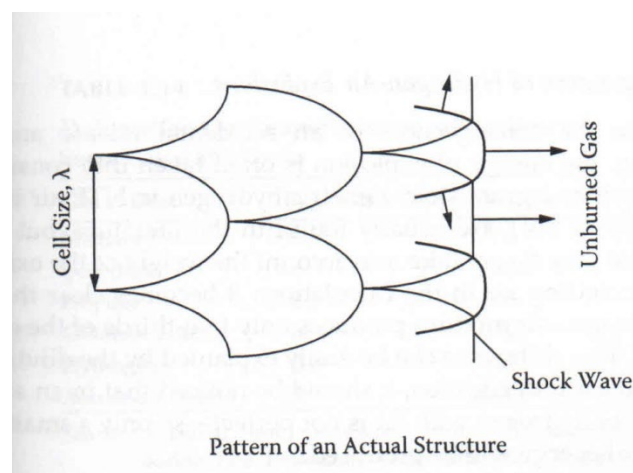
## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku



Obrázek 24. Velikost detonační buňky v závislosti na koncentraci vodíku ve vzduchu [56].

Velikost detonační buňky se zvětšuje s tím, jak se směs blíží k mezím detonovatelnosti. Čím větší je tedy experimentální aparatura, tím nižší je hodnota LDL (a tím vyšší je UDL). Meze detonovatelnosti směsi vodíku se vzduchem o shodné koncentraci vodíku se rozšiřují s rozsahem hořlavého mraku. Tím se vysvětluje rozdíl mezi dolní mezí detonovatelnosti vodíku 11 % obj., kterou uvádějí Alcock a kol. [6], a podhodnocenou hodnotou 18 % obj., kterou navrhuje mezinárodní norma ISO/TR 15916:2004 [50].

Struktura čela detonace je schematicky znázorněna na obrázku 25. Níže je uvedeno 2D znázornění struktury čela detonace dle modelů Zeldoviche, von Neumanna a Doringa (ZND).



Obrázek 25. 2D zobrazení struktury čela detonace [58].

U směsi vodíku se vzduchem se velikost buňky s rostoucím tlakem zmenšuje. Šířka buňky detonací směsi vodíku se vzduchem se výrazně zvětšuje společně s rostoucí koncentrací ředidla (např. oxidu uhličitého nebo vody).

## Přednáška 10: Zvládnání explozí vodíku

## 7.5 Kritický průměr potrubí pro spuštění detonace

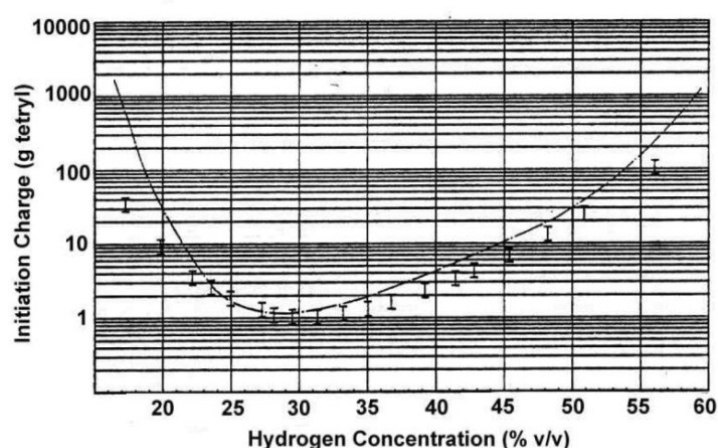
K detonaci může dojít pouze v případě, že jsou velikost potrubí nebo objem směsi dostatečně velké v porovnání s velikostí detonační buňky  $\lambda$  (je-li rozvinut nadzvukový režim proudění).

- $D > \lambda/\pi$ , kde  $D$  je vnitřní průměr hladkého potrubí,
- $d > \lambda$ , kde  $d$  je příčný rozměr volného průchodu v kanálu s překážkami,
- $L > 7\lambda$ , kde  $L$  je obecnější charakteristická velikost definovaná pro místnosti nebo kanály,
- $D_{jet} > (14 \sim 24)\lambda$ , kde  $D_{jet}$  je výstupní průměr trysky.

Pro přetíženou oblast se stechiometrickou směsí vodíku se vzduchem je přechod DDT pozorovaný v oblaku obsahujícím 4 g vodíku.

## 7.6 Přímá iniciace detonací

Schopnost směsi vodíku se vzduchem přímo iniciovat detonaci je větší než u uhlovodíků. Přímá iniciace detonace směsi vodíku se vzduchem je možná již při 1,1 g vysoce výbušné látky tetryl [43]. K iniciaci detonace ve směsi vodíku se vzduchem v koncentraci 34,7 % obj. ve volné atmosféře je zapotřebí pouze 1,86 g vysoce výbušného TNT (trinitrotoluenu). Pro směs vodíku se vzduchem v koncentraci vodíku 20 % obj. se však kritická náplň TNT výrazně zvyšuje na 190 g [43]. Pro srovnání, energie uvolněná při explozivní reakci 1 g TNT je arbitrárně standardizována na 4,184 kJ (viz ekvivalent TNT ve Wikipedii) a nižší spalné teplo 1 g vodíku je rovno  $(241,7 \text{ kJ mol}^{-1}/2,016 \text{ g mol}^{-1}) = 119,89 \text{ kJ}$ . TNT ekvivalent vodíku je tedy vysoký 28,65, což znamená, že energie uvolněná 1 g vodíku je energeticky ekvivalentní 28,65 g TNT [1, 43].



Obrázek 26. Minimální iniciační energie pro přímou detonaci směsi vodíku se vzduchem [60].

Požadavky na zápalnou energii vodíku patří k nejnižším ze všech hořlavých směsí paliva s kyslíkem (MIE  $\text{GH}_2$  ve vzduchu v NTP je 0,017 mJ). U mnoha směsí vodíku s kyslíkem bez ředění může iniciace jiskrou (v experimentech např. 1–5 mJ [59]) nebo zdrojem plamene vyvolat plnohodnotnou detonaci. Jak je znázorněno na obrázku 26, potřebná iniciační energie

## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

směsi vodíku se vzduchem nejprve klesá a poté roste, když se objemový podíl vodíku zvýší z 15 na 60 %. Minimální iniciační nálož činí přibližně 1–2 g výbušného tetrylu při koncentraci vodíku okolo 28 %.

Minimální iniciační hodnoty energie pro deflagrace a detonace různých paliv jsou uvedeny v tabulce 3. Minimální energie potřebná k vyvolání detonace vodíkové směsi se vzduchem činí přibližně  $1 \times 10^7$  mJ, což je přibližně o devět řádů více než MIE pro deflagraci (0,017 mJ).

Tabulka 3. Minimální hodnoty energie potřebné k vyvolání deflagrace a detonace vodíku, metanu a propanu.

Typ paliva	Minimální zápalná/iniciační energie	
	Deflagrace, mJ	Detonace, mJ
Vodík	0,017	$1,0 \times 10^7$
Methan	0,25	$2,3 \times 10^{11}$
Propan	0,28	$2,5 \times 10^9$

Bezrozměrný detonační tlak ( $P_1/P_0$ , rovnovážné Chapman-Jouguetovy hodnoty<sup>1</sup>) a teplota ( $T_1/T_0$ ) u směsi vodíku se vzduchem a vodíku s kyslíkem jsou uvedeny v tabulce 4 níže. Poměry  $P_1/P_0$  a  $T_1/T_0$  udávají nárůst tlaku a teploty v detonačním rázu.

Tabulka 4. Detonační parametry stechiometrických směsí vodíku se vzduchem a vodíku s kyslíkem v závislosti na koncentraci vodíku [49]

H <sub>2</sub> concentration, % v/v	T <sub>0</sub> , K	P <sub>0</sub> , kPa	T <sub>1</sub> /T <sub>0</sub>	P <sub>1</sub> /P <sub>0</sub>	T <sub>0</sub> , K	P <sub>0</sub> , kPa	T <sub>1</sub> /T <sub>0</sub>	P <sub>1</sub> /P <sub>0</sub>
Hydrogen-air mixture								
18.3	298	101.3	7.657	12.154	298	10.1	7.580	12.111
25	298	101.3	9.257	14.605	298	10.1	8.870	14.223
50	298	101.3	8.706	13.713	298	10.1	8.482	13.555
59	298	101.3	7.678	12.144	298	10.1	7.601	12.119
Hydrogen-oxygen mixture								
5	298	101.3	3.118	4.880	298	10.1	3.119	4.882
25	298	101.3	9.034	14.289	298	10.1	8.660	13.896
50	298	101.3	11.646	17.857	298	10.1	10.537	16.616
75	298	101.3	12.111	18.671	298	10.1	10.834	17.250
90	298	101.3	8.576	13.584	298	10.1	8.327	13.393

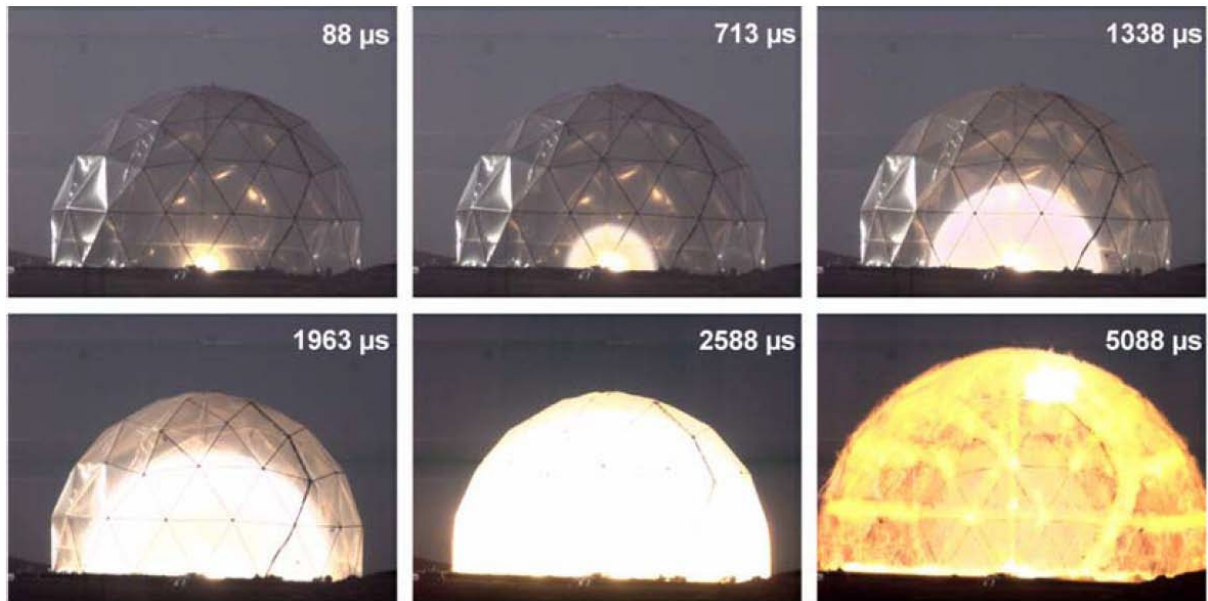
### 7.7 Detonace 30% směsi vodíku se vzduchem

Model LES byl použit k simulaci polokulovité detonace směsi vodíku se vzduchem v koncentraci 30 % obj. vodíku v polyethylenovém balónu s poloměrem 5,23 m. Detonace se šířila v prostředí bez překážek [23]. Přímá iniciace detonace proběhla na úrovni podlahy. Na obrázku 27 jsou uvedeny snímky z experimentu. Dynamika přetlaku v tlakové vlně byla zaznamenána ve vzdálenosti 15,6 m a byl vypočten odpovídající impuls tlakové vlny.

<sup>1</sup> Chapman-Jouguetova podmínka platí přibližně pro detonační vlny v silných výbušninách. Uvádí, že detonace se šíří rychlostí, při níž reagující plyny právě dosahují rychlosti zvuku, když reakce ustane.

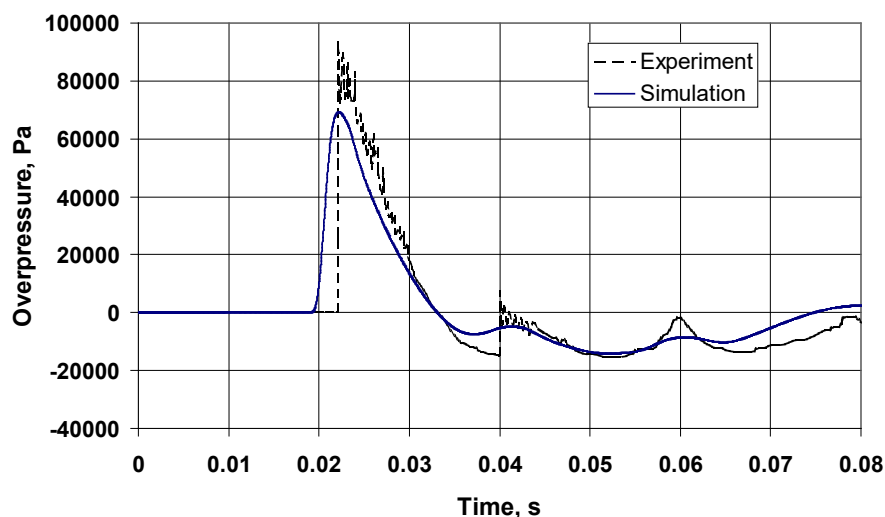


## Přednáška 10: Zvládnání explozí vodíku



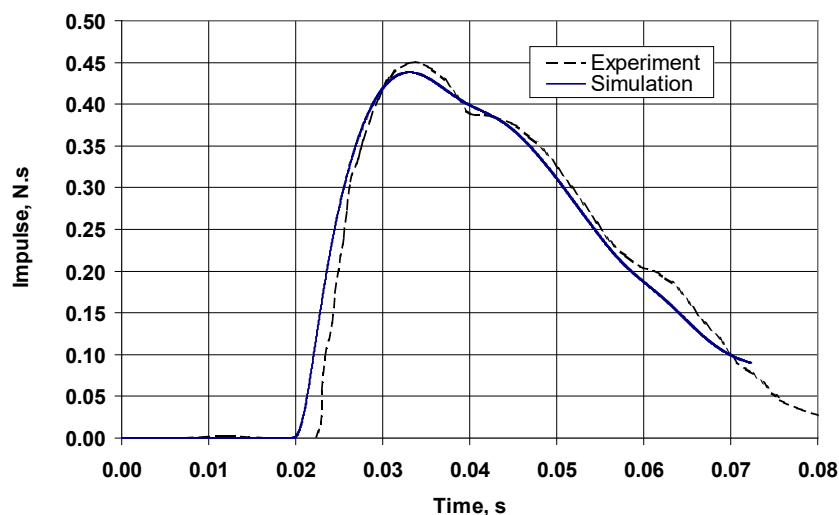
Obrázek 27. Polokulovité detonace směsi vodíku se vzduchem (30 % obj.) v polyethylenovém balónu (poloměr 5,23 m) [23].

Detonační (Chapman-Jouguetova) rychlost pro 30 % obj. směsi vodíku se vzduchem stanovená podle [61] byla  $D=1\,977$  m/s [1], Chapman-Jouguetův tlak 15,3 MPa [1]. Experimentální dynamika tlakové vlny z detonace ve vzdálenosti 15,61 m od místa zapálení je znázorněna na obrázku 28 s překrytím výsledků simulace. Shoda je obecně přijatelná, s 25% podhodnocenou předpovědí simulovaného přetlaku při výbuchu v okamžiku špičky.



Obrázek 28. Experimentální a simulovaná dynamika přetlaku tlakové vlny ve vzdálenosti 15,61 m [1].

Narozdíl od dynamiky tlakové vlny je vypočtený impuls v dobré shodě s experimentem (obrázek 29). Předpokládá se, že tomu tak je z důvodu správné energetické bilance, kterou model poskytuje.



Obrázek 29. Experimentální a simulovaný impuls tlakové vlny ve vzdálenosti 15,61 m [1].

## 8. Účinky tlakových vln na člověka a budovy

Tlakové vlny jsou škodlivé v mnoha ohledech. Jejich účinky lze rozdělit na primární, sekundární a terciární [62].

- Primární účinky:
  - poškození sluchu,
  - poškození plic a dalších vnitřních orgánů,
- Sekundární účinky:
  - zranění způsobená odlétávajícími úlomky (např. skleněnými střepy),
  - zřícení konstrukcí na lidi s následkem těžkých zranění nebo smrti,
- Terciární účinky:
  - přemístění celého těla jedince.

Škodu nezpůsobuje pouze přetlak, ale také impulz, který působí na osobu nebo předmět, místo, kde se osoba nachází, a osobní vybavení, které má daný člověk při sobě.

Metodika vyvinutá na univerzitě v Ulsteru [63] umožňuje uživatelům stanovit nebezpečné vzdálenosti pro člověka a budovy v případě protržení vysokotlaké vodíkové nádrže (samostatné nebo na palubě vozidla s palivovými články) při požáru. Metodika předkládá sadu nomogramů pro grafické stanovení nebezpečných vzdáleností od samostatných nádrží (obrázek 32a a obrázek 36a) a nádrží ve vozidlech (obrázek 32b a obrázek 36b) při požáru.

Dočasná ztráta sluchu, kterou popsali Baker a kol. [64] a ke které dochází při přetlaku nad 1,35 kPa a impulzech nad 1 Pa·s, je považována za mez „neškodlivosti“ pro člověka. Mezní hodnoty pro úroveň „poranění“ a „úmrtí“ pro člověka a mezní hodnoty pro budovy uvedené v tabulkách 5 a 6 byly převzaty z dokumentu [65].



## Přednáška 10: Zvládnání explozí vodíku

Tabulka 5. Prahové hodnoty přetlaku pro poškození lidského zdraví (ve venkovním prostředí).

Účinek	Přetlak, kPa
Přechodný posun prahu [64]: Mezní hodnota úrovně „bez poškození“ pro nebezpečnou vzdálenost (evakuační perimetr)	1,35
1% pravděpodobnost protržení ušního bubínku (zvolena jako prahová hodnota úrovně „poranění“) [65]	16,5
1% pravděpodobnost úmrtí – krvácení do plic (zvolena jako prahová hodnota úrovně „smrt“) [65]	100

Tabulka 6. Prahové hodnoty přetlaku pro poškození budov [65].

Poškození	Přetlak, kPa
Mírné poškození budovy	4,8
Částečná demolice budovy – budova zůstává obyvatelná	6,9
Takřka úplné zničení budovy	34,5–48,3

Kritéria poškození osob a budov popsaná výše v tabulkách 1 a 6 jsou použita v níže uvedených nomogramech pro stanovení nebezpečných vzdáleností při roztržení samostatných vysokotlakých vodíkových nádrží a vysokotlakých nádrží pod vozidlem s různými objemy a tlakem.

### 8.1 Protržení samostatné nádrže při požáru

Nomogramy pro grafický výpočet nebezpečných vzdáleností a zón od tlakové vlny vyvolané protržením samostatné (stacionární) vysokotlaké vodíkové nádrže při požáru představili Kashkarov a kol. [66] na univerzitě v Ulsteru v roce 2020. Nomogramy sestavené pomocí modelu rozpadu tlakové vlny [63] a validované na základě experimentů s protržením nádrže při požáru o tlaku 350 a 700 bar lze použít ke stanovení nebezpečných vzdáleností a zón na základě síly tlakové vlny charakterizované jak přetlakem, tak impulsem. Podrobnosti o obou experimentech [67], zkoušky A a B, které byly použity k ověření modelu a implementaci do nomogramů, jsou uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 7 Zkoušky protržení samostatných nádrží s tlakem 700 barů [67]

Zkouška, typ nádrže	Nádrž P, bar <sup>a</sup>	Nádrž V, L	Vodík T, K <sup>b</sup>	Vzduch T, K
Zkouška A, typ IV	945,4	35	379,8	282,15
Zkouška B, typ III	994,7	36	394,2	280,15

<sup>a</sup> Tlak v nádrži se před protržením zvýšil v důsledku přenosu tepla z požáru.

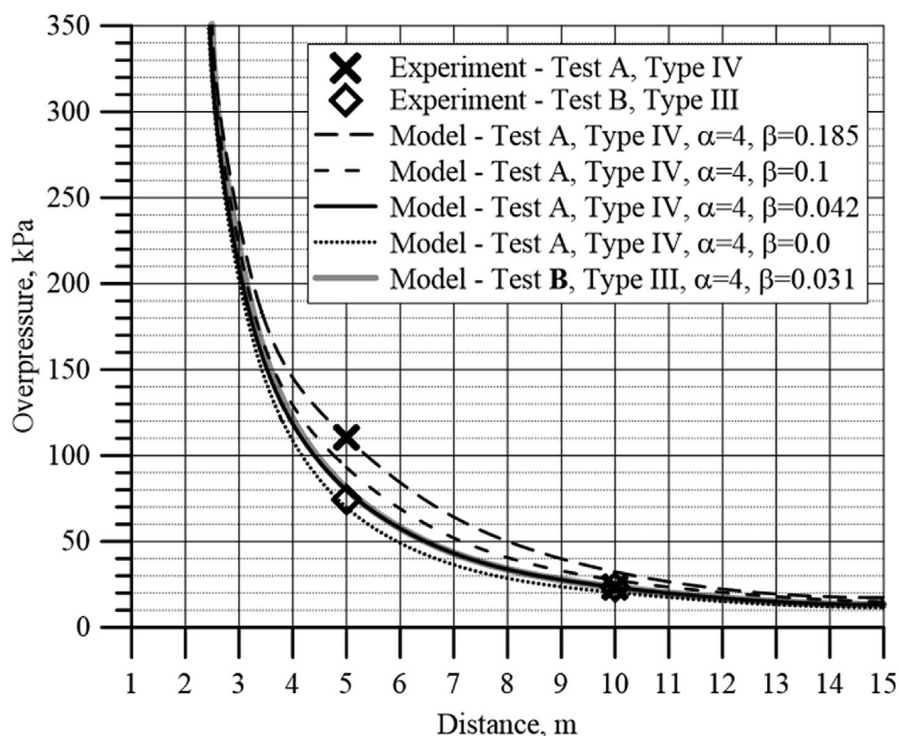
<sup>b</sup> Teplota v nádrži se před protržením se zvýšila v důsledku přenosu tepla z požáru.

Při zkoušce A je naměřený přetlak v 5 m ( $\Delta p=110,5$  kPa) vyšší než přetlak v 5 m při zkoušce B ( $\Delta p=74,3$  kPa) takřka o 33 %. Hodnoty přetlaku ve vzdálenosti 10 m byly v obou zkouškách

## Přednáška 10: Zvládnání explozí vodíku

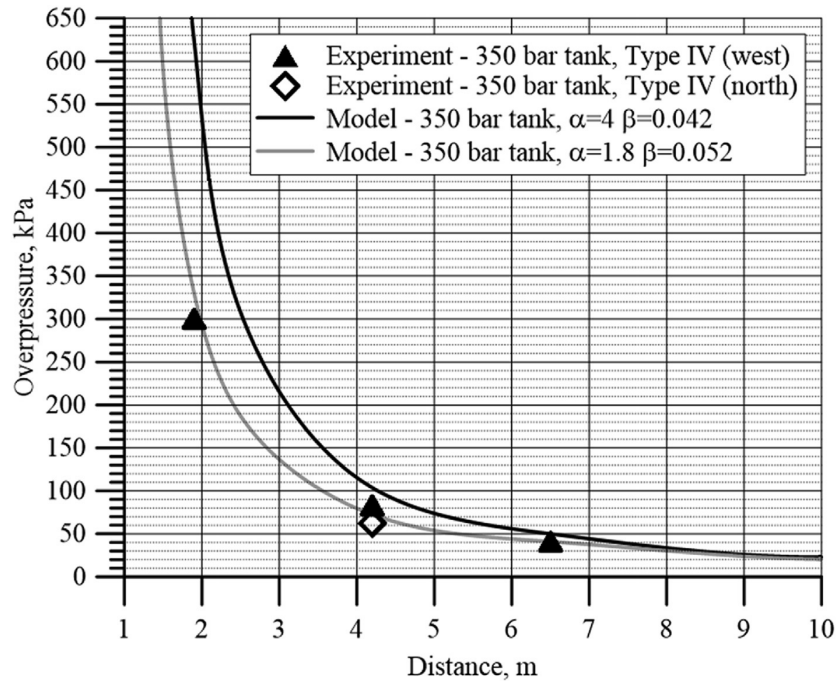
shodné, tj.  $\Delta p=23,4$  kPa. Předpokládá se, že k takovému rozdílu u prvního snímače došlo v důsledku způsobu otevření nádrží v okamžiku jejich protržení. To mohlo způsobit nasměrování výbuchu směrem k senzorům a vést k vyššímu přetlaku na prvním senzoru ve zkoušce A.

Numerická studie Molkova a kol. [67] vysvětluje vliv způsobu otevření nádrže v okamžiku protržení. Nejprve bylo v numerické zkoušce A znázorněno protržení nádrže okamžitým odstraněním stěny, které způsobilo přetlak  $\Delta p=67,13$  kPa ve vzdálenosti 5 m. To je o 39 % méně než experimentální hodnota ( $\Delta p=110,5$  kPa). Následně byla polovina stěny nádrže ve směru senzorů odstraněna od začátku simulace a druhá polovina byla odstraněna po uplynutí 0,7 ms. Toto počáteční otevření poloviny nádrže zvýšilo přetlak o 40 %, tj.  $\Delta p=112,64$  kPa. Studie dospěla k závěru o významu vlivu režimu otevření nádrže na přetlak v blízkém poli. Vliv koeficientu chemické energie na modelovou reprodukovatelnost tlaků při zkoušce A (černé křivky) a tlaků při zkoušce B (šedá křivka) je znázorněn na obrázku 30. Toto množství chemické energie přispívající k síle tlakové vlny, tj. 4,2 %, se blíží výše zmíněným 5,2 % [63]. Experimentální pokles tlaku v tlakové vlně v požární zkoušce samostatné nádrže s tlakem 350 bar proti modelovým předpovědím je znázorněn na obrázku 31, ze kterého vyplývá, že navzdory rozdílu v předpovědi špičkového tlaku v tlakové vlně v blízkém poli je rozdíl ve vzdáleném poli (za hranicí 8 m) zanedbatelný.



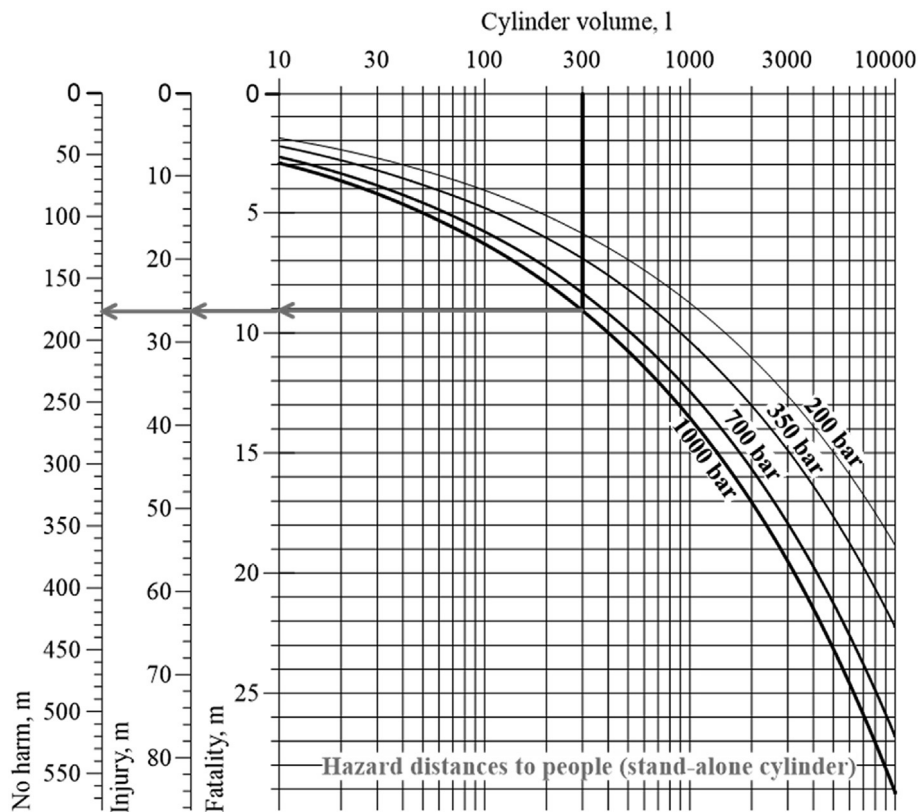
Obrázek 30. Experimentální měření přetlaku v tlakové vlně při zkouškách A a B (symboly) a modelové předpovědi zkoušek A a B s  $\alpha=4$  a různými koeficienty pro chemickou energii  $\beta$  (křivky) [66].

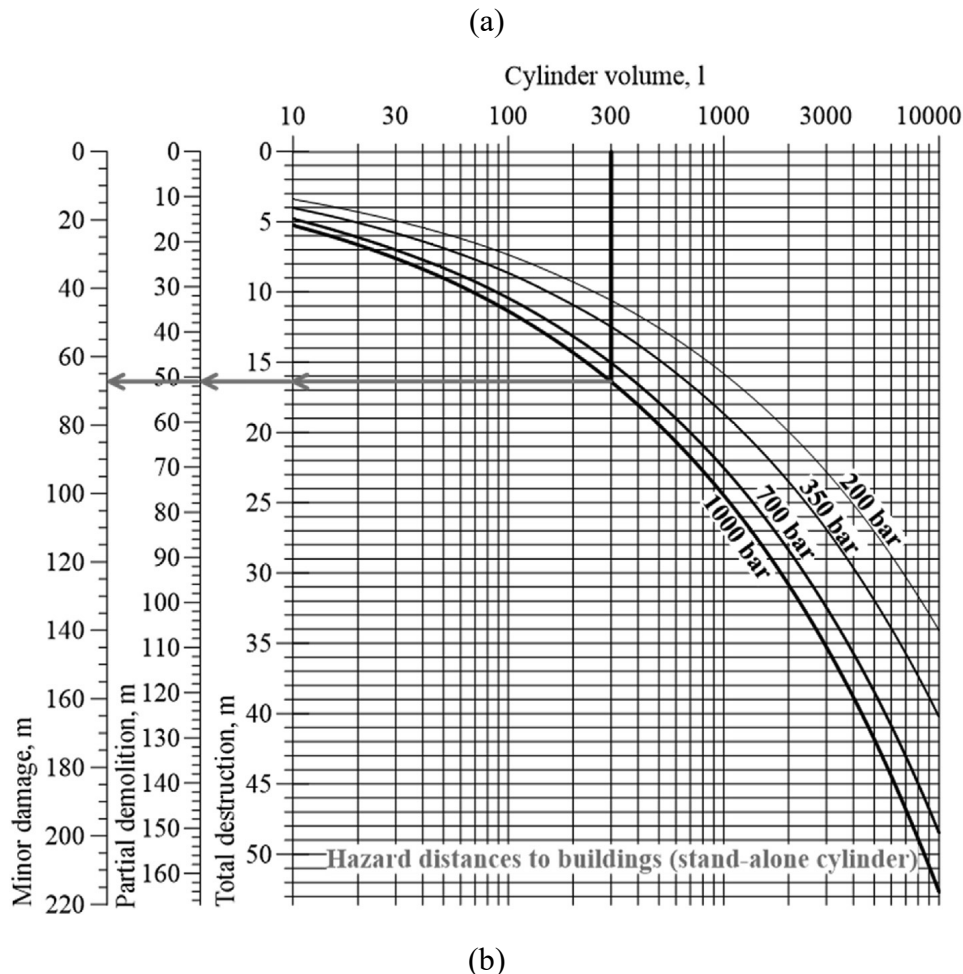
Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku



Obrázek 31. Experimentální pokles tlaku v tlakové vlně při požární zkoušce samostatné nádrže s tlakem 350 bar oproti modelovým předpovědím s  $\alpha=4$ ,  $\beta=0,042$  (samostatné nádrže s NWP 700 bar [66] a koeficienty  $\alpha=1,8$ ,  $\beta=0,052$  [63]).

Obrázek 32a navíc umožňuje příslušníkům HZS vyhodnotit vzdálenosti ohrožení osob při protržení samostatné nádrže při požáru, zatímco obrázek 32b vzdálenosti ohrožení budov v takové situaci.





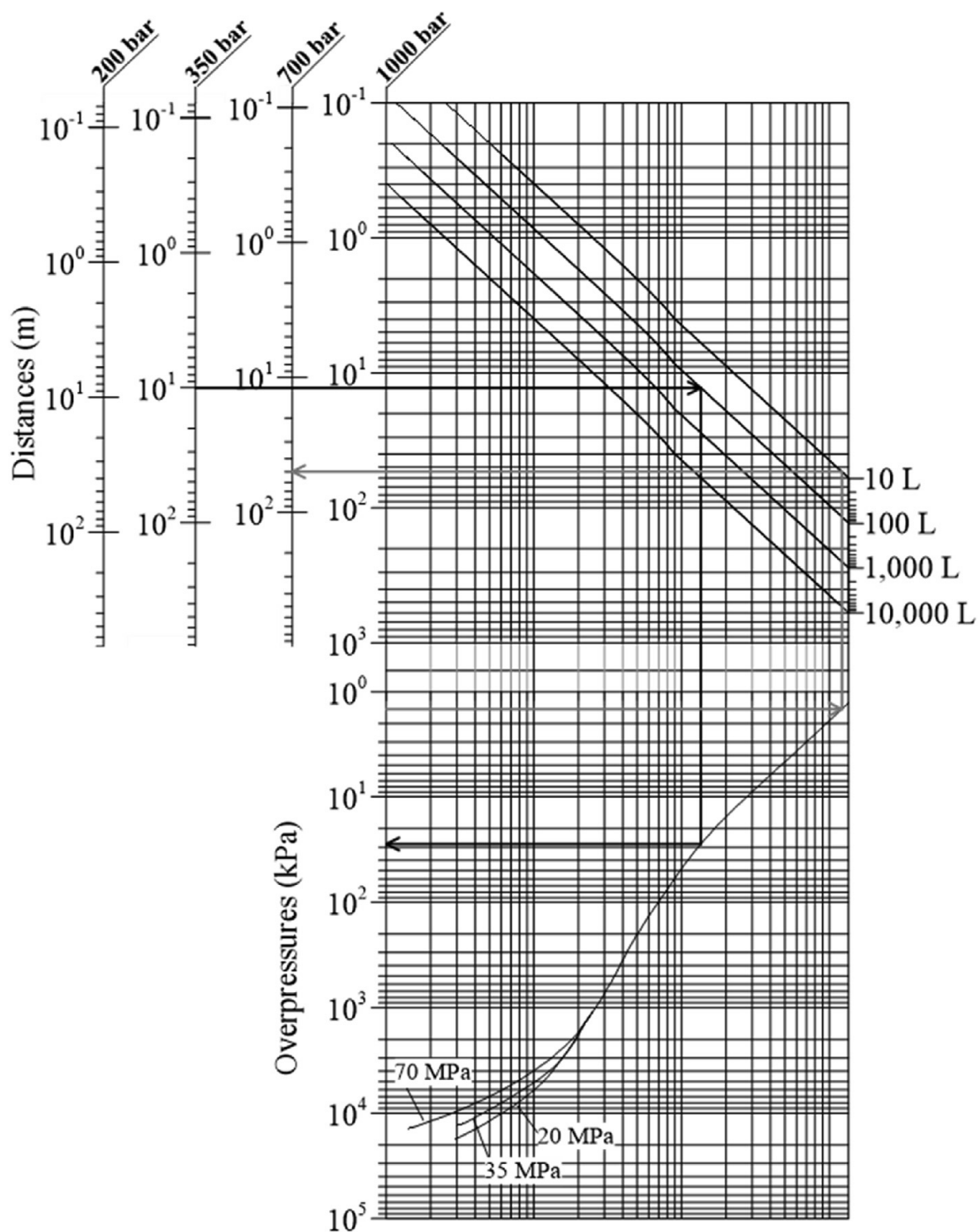
Obrázek 32. Nomogramy pro určení vzdálenosti ohrožení osob (a) a budov (b) při protržení samostatné nádrže.

Nomogramy pro vodíkové bezpečnostní technologie pro případ protržení samostatné nádrže při požáru jsou uvedeny na obrázcích 33 a 34. Jedním ze způsobů, jak je použít (přímý problém), je zvolit přetlak a impuls, které nás zajímají, a poté definovat nebezpečnou vzdálenost pro nádrž s určitým objemem a zásobním tlakem. Dalším způsobem (inverzní problém) je zvolit vzdálenost od polohy nádrže a poté najít odpovídající hodnoty přetlaku a impulsu. Nomogramy jsou znázorněny na obrázcích 33 a 34 (pro přímý problém jsou znázorněny šedé čáry se šipkami a pro inverzní problém černé čáry).

Uvažujme tlakovou vlnu při protržení samostatné nádrže s objemem 10 l a tlakem 700 bar (typické parametry motocyklových nádrží). Abychom zjistili evakuační perimetr, tj. vzdálenost bez poškození zdraví člověka, zvolíme nejprve práh poškození přetlakem ve výbuchové vlně pro vzdálenost „bez poškození“, tj. 1,35 kPa, a nakresleme přímkou z osy „Overpressure“ (Přetlak) (vodorovná šedá čára se šipkou směřující doprava na obrázku 33) až k černé křivce tlaku v zásobníku. Poté se svislá čára protáhne směrem nahoru až k zájmové křivce objemu (v tomto příkladu se jedná o objem 10 l). Pokud je zvolen objem, musí být konečná vodorovná čára nakreslena doleva až k osám „Distance“ (Vzdálenost) s přiřazeným potřebným skladovacím tlakem (přečtete si popisky nahoře). Šedá šipka na příkladu ukazuje

## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

identifikovanou vzdálenost, která činí přibližně 50 m. Pro jakoukoli další hodnotu objemu, jako je například 30 l, je třeba nakreslit další křivku rovnoběžnou s nejbližší existující křivkou objemu v horní části nomogramu (obrázek 33) pomocí dělení stupnice mezi křivkami objemu na pravé straně nomogramu.

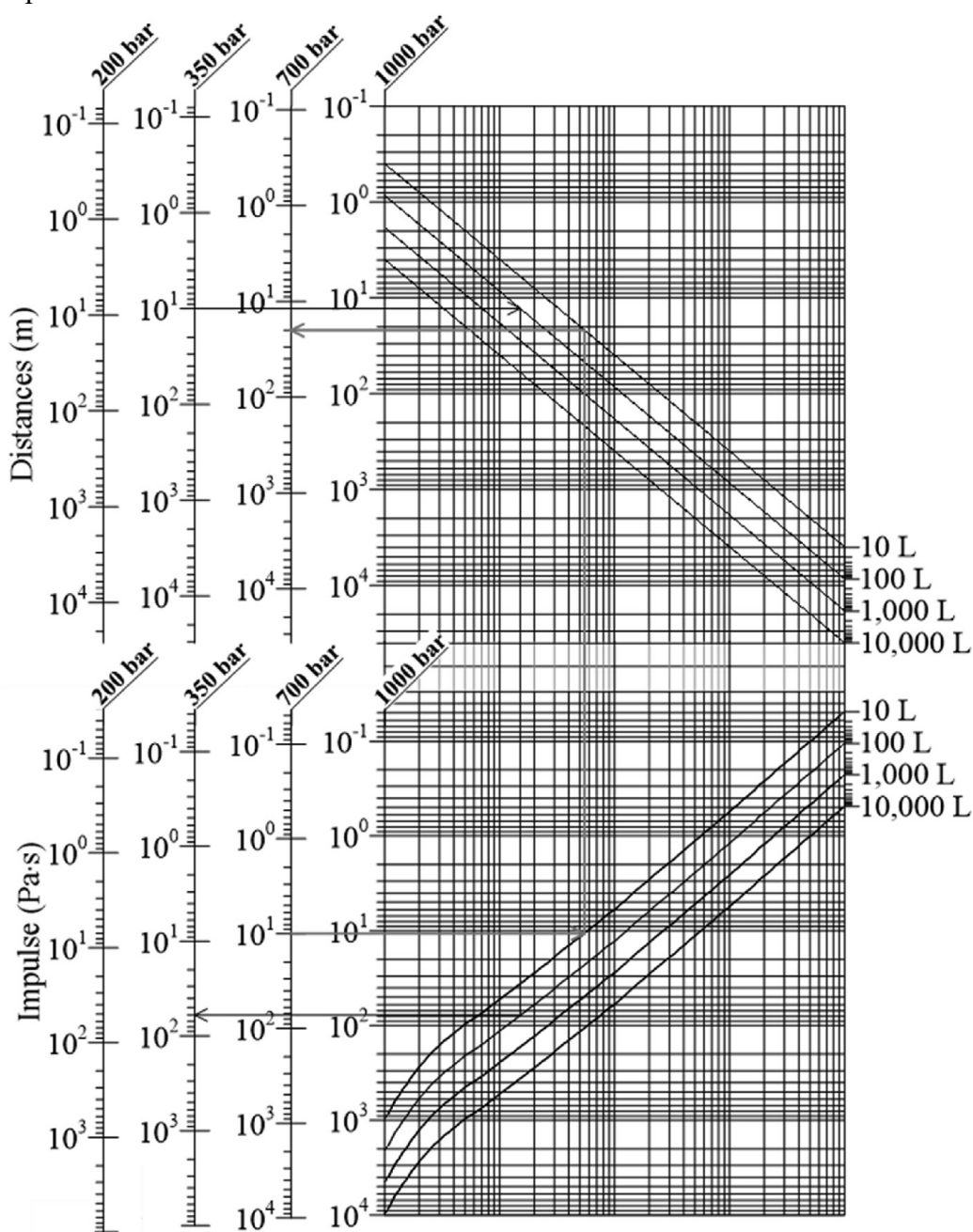


Obrázek 33. Nomogram pro vodíkové bezpečnostní technology: přetlakové vzdálenosti u tlakové vlny po protržení samostatné vodíkové nádrže při požáru.



## Přednáška 10: Zvládnání explozí vodíku

Nomogramy lze použít k určení přetlaku a impulsu v požadované vzdálenosti, jak je uvedeno na příkladu vzdálenosti 10 m a tlakové nádrže s objemem 100 l a tlakem 350 bar, které jsou znázorněny černými šipkami na obrázcích 33 a 34. Uživatel by měl definovat tlak v nádrži tak, že vybere svíslou levou horní osu přiřazenou tomuto tlaku (v tomto případě 350 bar) a nakreslí vodorovnou čáru od značky 10 m doprava až ke křivce objemu. Jakmile je zvolen objem (v našem příkladu 100 l), je přímkou vedena směrem dolů až ke křivce tlaku (obrázek 33) nebo objemu (obrázek 34) podle toho, který nomogram je použit. Od průsečíku s touto křivkou se vede další vodorovná čára k levé ose „Overpressure“ (Přetlak) (obrázek 33) nebo „Impulse“ (Impuls) (osa přiřazená stejnému tlaku v nádrži je vybrána na obrázku 34). Zjištěná hodnota přetlaku v tlakové vlně ve vzdálenosti 10 m při protržení nádrže při požáru činí přibližně 28 kPa a impuls cca 62 Pa·s.

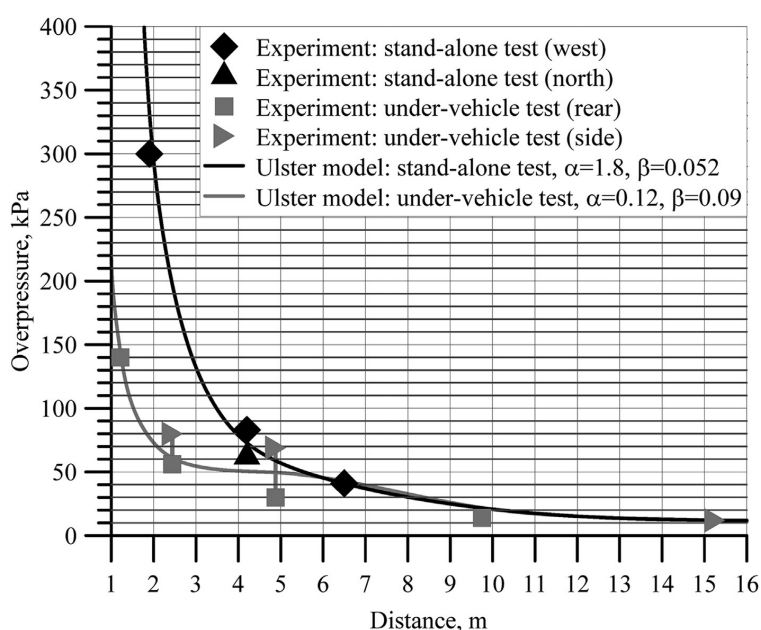


## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

Obrázek 34. Nomogramy pro vodíkové bezpečnostní technology: vzdálenost impulzu pro tlakovou vlnu při protržení samostatné vodíkové nádrže při požáru.

### 8.2 Protržení nádrže pod vozidlem při požáru

Je třeba poznamenat, že z hlediska výpočtu síly výbuchu lze v některých scénářích považovat protržení tlakové láhve pod vozidlem do jisté míry za aplikaci „samostatné“ nádrže. Tu lze použít například v případech, kdy se vozidlo při nehodě převrátí, nebo v případě uložení nádrže na střeše vozidla, např. v případě autobusů, nebo na boku vozidla. Jedná se však o konzervativní přístup, protože by se zanedbala ztráta energie při poškození karoserie vozidla. Experimentální rozpad tlaku v tlakové vlně pro 350 bar v samostatných nádržích a v nádržích pod vozidlem a srovnání s vypočtenými údaji s různými koeficienty pro mechanickou,  $\alpha$ , a chemickou energii,  $\beta$ , jsou uvedeny na obrázku 35. Výsledky modelování se dobře shodují s experimentálními údaji [66].

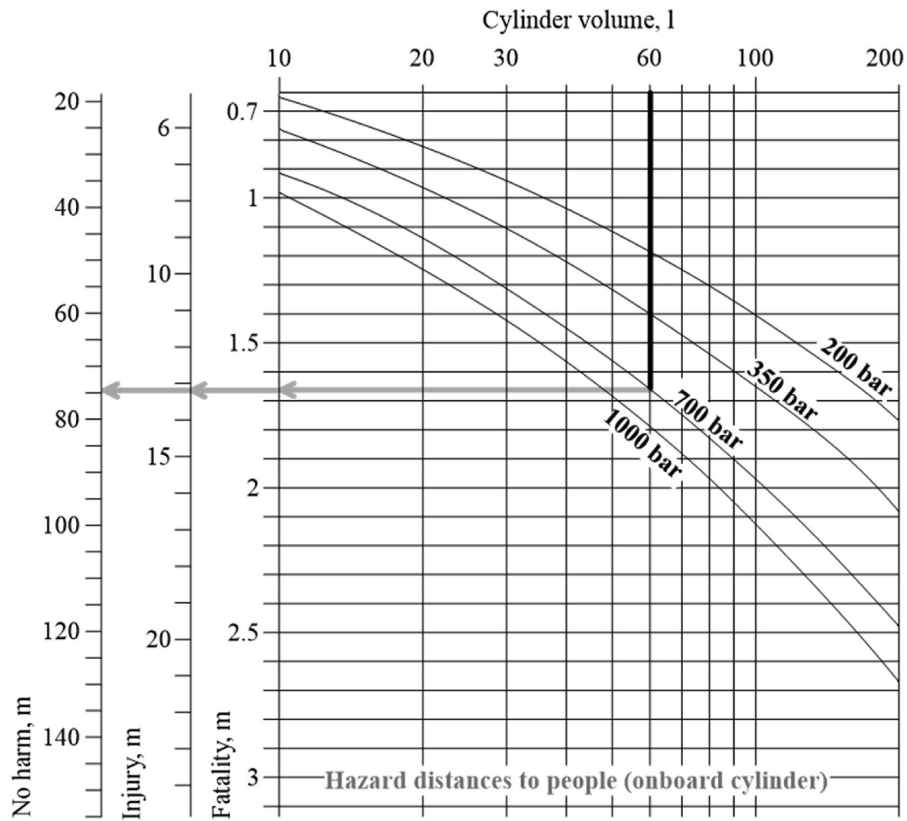


Obrázek 35. Experimenty se samostatnými nádržemi s tlakem 350 bar a nádržemi pod vozidlem a předpovědi podle modelu vyvinutého na univerzitě v Ulsteru [63].

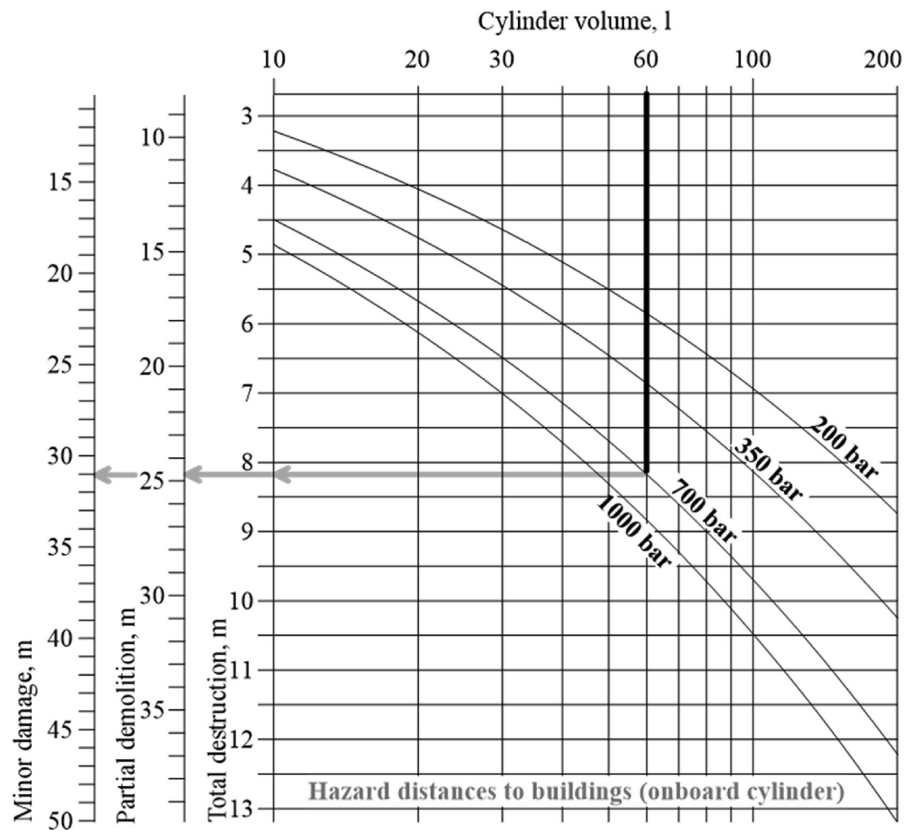
Na obrázku 36 jsou uvedeny dva nomogramy používané ke stanovení nebezpečných vzdáleností při protržení nádrže pod vozidlem při požáru. Použití nomogramů lze graficky vysvětlit na příkladu na obrázku 36. Nejprve by měl uživatel zvolit objem vodíkové nádrže na vodorovné ose (např. 60 l) a vnitřní tlak v nádrži na příslušných křivkách (např. 70 MPa). Průsečík tlakové křivky se svislou čarou odpovídající vybranému objemu nádrže je znázorněn černou šipkou. Zadruhé, pro zjištění vzdálenosti s nebezpečím úmrtí se vodorovná čára vede od průsečíku směrem k červené svislé ose na levé straně (znázorněno červenou šipkou). Vzdálenost „úmrtí“ se ve vybraném příkladu rovná 1,67 m. Pro zjištění vzdáleností „poranění“ a „bez poškození“ je třeba jednoduše prodloužit čáru na žlutou, resp. zelenou osu. Ve vybraném příkladu činí vzdálenost „poranění“ 13,2 m a vzdálenost „bez poškození“ 75 m.



Přednáška 10: Zvládnání explozí vodíku



(a)

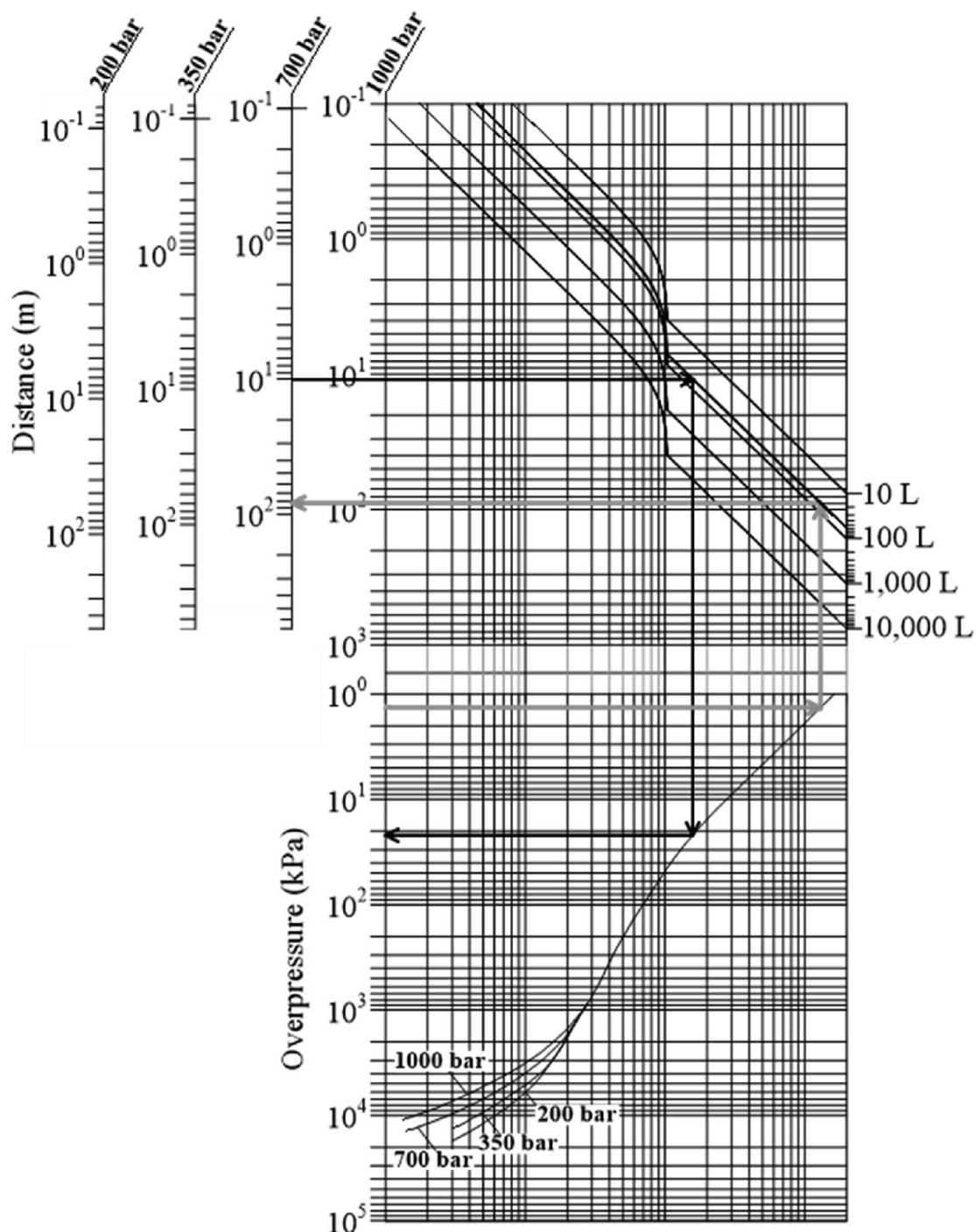


(b)

Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

Obrázek 36. Nomogramy pro určení vzdálenosti ohrožení osob (a) a budov (b) při protržení nádrže pod vozidlem (příklad nádrže 60 l, 700 bar).

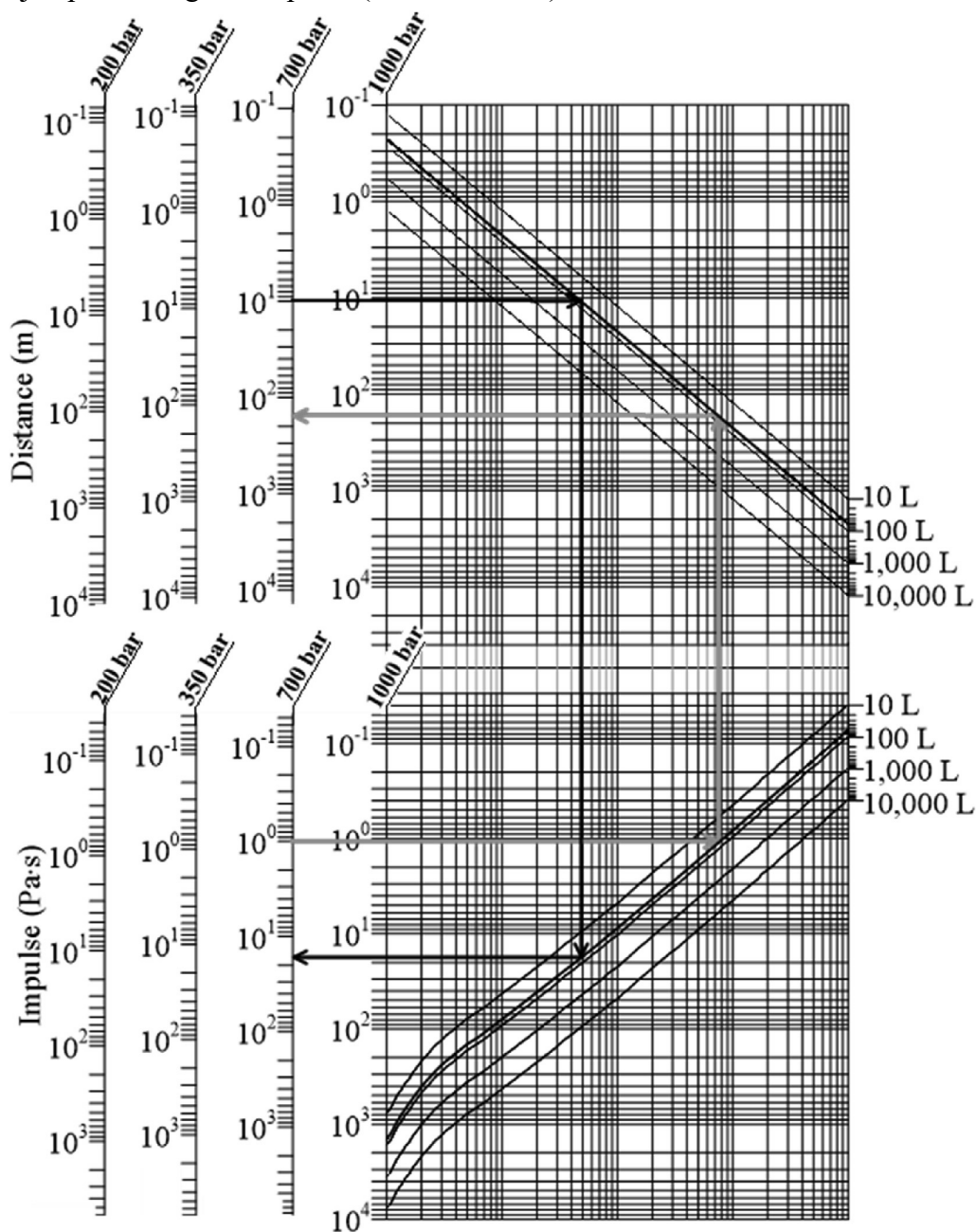
Obrázky 37 a 38 představují dva nomogramy pro určení nebezpečných vzdáleností a vlastností tlakové vlny při protržení nádrže ve vozidle. Vybraný příklad aplikace skladování vodíku v objemu 60 l a skladovacím tlaku 700 bar je znázorněn šipkami. Příklad použití nomogramu na obrázku 37 je následující. Pro zjištění přetlaku z uvažované aplikace, tj. 60 l a 700 bar u nádrže umístěné pod vozidlem, se na obrázku 37 vynese „dodatečná“ objemová křivka pro 60 l (paralelně s křivkou 100 l). Z grafu s černými šipkami vyplývá, že přetlak ve vzdálenosti 10 m bude činit 22 kPa.



## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

Obrázek 37. Nomogram pro vodíkové bezpečnostní technologie: přetlak v tlakové vlně při protržení nádrže ve vozidle (pod vozidlem) v případě požáru.

Stanovme evakuační perimetr (mezní vzdálenost „bez poškození“ zdraví osob), tj. vzdálenost, ve které přetlak v tlakové vlně klesne na úroveň 1,35 kPa. Nejprve je třeba vynést šedou čáru s šipkou od 1,35 kPa doprava až do průsečíku s křivkou tlaku. Poté čára pokračuje směrem vzhůru až do průsečíku s nově vynesenu křivkou objemu 60 l v horní části nomogramu. Poté nakreslíme vodorovnou čáru doleva až do průsečíku s osou „700 bar“. Z toho vyplývá, že evakuační perimetr bude činit 82 m. Tato hodnota se poněkud (o 9 %) liší od hodnoty 75 m získané pro stejnou nádrž pomocí nomogramu na obrázku 38. Rozdíl je v rámci přijatelné 10% chyby, která je pro grafické technologické nástroje charakteristická. Podobný postup a příklad se použije i pro nomogram impulsu (viz obrázek 38).



Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

Obrázek 38. Nomogram pro vodíkové bezpečnostní technologie: impuls v tlakové vlně při protržení nádrže ve vozidle (pod vozidlem) v případě požáru.

## 9. Vliv projektilů a úlomků

Většina modelových přístupů se zabývá účinky výbuchu a požáru. V mnoha scénářích výbuchů vodíků je však důležité i odmrštění projektilů a úlomků, které v některých případech hraje dokonce dominantní úlohu. U výbuchů plynného vodíku je takový projev typický v situacích, kdy je přítomna určitá míra uzavření nebo ohrazení. Když proces hoření přejde z deflagrace na detonaci, může mít vymrštění projektilů nebo úlomků naprosto ničivé účinky. Příkladem mohou být výbuchy plynu v průmyslových zařízeních, v garážích, na parkovišti nebo v jaderné elektrárně. Tyto situace mohou způsobit zásadní nebezpečí v souvislosti s projektily a úlomky. Odmrštění projektilů způsobí zpravidla protržení nádrže. Každá metodika hodnocení rizik souvisejících s vodíkem by měla obsahovat modely pro vymrštění projektilů a úlomků.

Obecně jsou počáteční podmínky jejich vymrštění definovány rozložením hmotnosti projektilů či úlomků, jakož i rychlostí a směrem odmrštění. Tyto podmínky jsou dány průběhem závady a následným urychlením expandujícími plyny nebo reakčními produkty. To je doprovázeno uvolněním tlaku v důsledku rostoucího ventilačního prostoru mezi akcelerujícími prvky.

Proces rozpadu železobetonových nebo cihelných budov při vnitřním výbuchu plynu představuje složitější jev. V případě (slabé) deflagrace pokračuje hoření i během procesu rozpadu a odmrštění trosk. Souvislost mezi růstem tlaku, ventilací a rozpadem určuje, která část konstrukce bude zasažena.

## 10. Možná opatření ke zmírnění následků výbuchů

### Preventivní opatření [62]:

#### *Pasivní opatření:*

- omezovače průtoku pro minimalizaci hmotnosti vodíku, který se podílí na tvorbě hořlavé směsi v případě úniku,
- je-li to možné, nepoužívejte uzavřené prostory,
- přirozená ventilace,
- absence zdrojů zapálení.

#### *Aktivní opatření:*

- detekce a izolace úniků vodíku.

### Zmírňující opatření [62]:

#### *Pasivní opatření:*

- deflagrační ventilace,

## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

- vytyčení nebezpečných a separačních vzdáleností,
- protipožární konstrukce.

### *Aktivní opatření:*

- reakce na mimořádné události,
- detekce,
- vypnutí napájení.

## 10.1 Zmírnění dopadů přechodu DDT

Součástí strategie pro minimalizaci potenciálu zrychlení plamene nebo detonace jsou [50]:

- prevence vzniku uzávěrů a překážek v místech, kde by se mohly tvořit hořlavé směsi vodíku se vzduchem,
- použití protiplamenných zařízení, malých ústí otvorů nebo kanálků k prevenci šíření deflagrace a detonace v soustavě,
- použití ředidel, jako jsou pára nebo oxid uhličitý, případně technik odčerpání kyslíku, je-li to možné, a systémů rozprašování vody nebo mlhy s cílem dosáhnout pomalejšího zrychlování plamene; toto doporučení normy ISO/TR 15916:2004 [50] je třeba brát s rezervou, protože plameny v premixované směsi vodíku se vzduchem jsou z hlediska hašení problematické a v okolí kapek v silných vodních sprejích mohou hořet, případně dokonce zrychlovat [68],
- dle možnosti zmenšení velikosti soustavy s cílem zúžit meze detonovatelnosti,
- spalování vodíku je náchylné k přechodu DDT, zejména v rozsáhlých soustavách, a proto je třeba se intenzivně zabývat vyšší úrovní zabezpečení technologií; pro tento druh aplikací by bezpečnostní strategie mohla spočívat v organizaci a řízení procesu spalování směsi s obsahem vodíku tak, aby se směs přiváděná do hořáku pohybovala mezi dolní mezí hořlavosti a dolní mezí detonovatelnosti.

## 10.2 Prevence přechodu DDT u palivových článků

Experimenty společnosti Pro-Science (Německo) při návrhu obalu palivového článku (FC) vedly k následujícím zjištěním a závěrům:

- Bylo zaznamenáno výrazné zrychlení plamene, které vedlo k vysokému přetlaku při celkové vstříkované hmotnosti 15 g a 25 g, což stačilo k úplné demolici experimentálního zařízení. Experimentální i numerické studie při návrhu obalu FC naznačují, že celková vstříkovaná hmotnost by měla být u zkoumané konfigurace menší než 6 g, aby se zachoval přetlak pod úrovní 10–20 kPa. I v případě 6 g vstříkovaného vodíku může stále docházet k poškození případnými projektily. Proto se zdá, že pro



## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

zajištění bezpečnosti při náhodném uvolnění vodíku je vhodná vstříkovaná hmotnost 1 g [69].

- Tlak v přívodním potrubí A průměr potrubí a ústí omezovače by měly konstrukčně omezovat hmotnostní průtok vodíku na technologickou úroveň, která je nutná pro fungování FC. Doba uvolňování by měla být vzhledem k době potřebné k detekci úniku a ovládní ventilu co nejvíce zkrácena, aby se vyloučilo uvolnění více než 1 g vodíku. Odhad ukazuje, že pro 50kW FC, který vyžaduje spotřebu vodíku těsně pod úrovní 1 g/s, by doba detekce úniku a doba odstavení přívodního potrubí měly být společně kratší než 1 s. Jakékoli zkrácení této doby bude mít pozitivní dopad na bezpečnost.
- Tento poslední požadavek je pro současnou generaci senzorů obtížně splnitelný. K zajištění přijatelné úrovně bezpečnosti je třeba vyvinout a zavést inovativní systémy detekce úniků, např. na základě analýzy kolísání tlaku v přívodu paliva. Překážka v podobě mřížky, použitá v experimentech společnosti Pro-Science k napodobení přetížení v reálném palivovém článku, vedla k silnému urychlení plamene [69]. Přetížení uvnitř obalu s palivovými články je třeba co nejvíce předejít pečlivou konstrukcí.

## Poděkování

Projekt HyResponse je všeobecně uznáván, protože zde prezentované materiály staví na původní sérii přednášek HyResponse.

## Literatura a odkazy

1. Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering (Základy bezpečnostního vodíkového inženýrství), části I a II. K dispozici na adrese: [www.bookboon.com](http://www.bookboon.com), e-kniha k bezplatnému stažení.
2. Dorofeev, SB (2007). Evaluation of safety distances related to unconfined hydrogen explosions (Hodnocení bezpečnostních vzdáleností v souvislosti s vodíkovými explozemi na volném prostranství). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 32, s. 2118–2124.
3. NFPA, Národní asociace požární ochrany (2009). Předpis pro palivové systémy vozidel na stlačený zemní plyn (CNG), 52.
4. Chapman, DL (1899). On the rate of explosion in gases (O rychlosti výbuchu plynů). Philosophical Magazine. Svazek 47, s. 90–104.
5. Jouguet, JCE (1905–1906). On the propagation of chemical reactions in gases (O šíření chemických reakcí v plynech). Journal des Mathématiques Pures et Appliquées, sv. 1, s. 347–425, 1905; pokračování sv. 2, s. 5–85, 1906.
6. Alcock, JL, Shirvill, LC a Cracknell, RF (2001). Srovnání stávajících údajů o bezpečnosti vodíku a srovnatelných paliv. Výstupní zpráva evropského projektu 5. RP EIHP2, květen

## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

2001. K dispozici na adrese: [http://www.eihp.org/public/documents/CompilationExistingSafetyData\\_on\\_H2\\_and\\_ComparativeFuels\\_S..pdf](http://www.eihp.org/public/documents/CompilationExistingSafetyData_on_H2_and_ComparativeFuels_S..pdf) [přístup k datu 02.12.2020].
7. Jordan, T (2008). Overview of hydrogen and fuel cell technologies (Přehled technologií vodíkových a palivových článků). 1. konference ISCARW „Pokrok ve vodíkové bezpečnosti“, září 2008, Ulsterská univerzita, Belfast
  8. Pfortner, H a Schneider, H (1983). Fraunhofer-institut für Treib- und Explosivstoffe. ICT-Projektorschung 19/83. Výzkumný program „Uvolňování technologických plynů – exploze ve výrobě technologických plynů a účinek tlakových vln na ochrannou obálku“. Pokusy s balónem při zkoumání deflagrace směsi vodíku se vzduchem (závěrečná zpráva). Prosinec 1983.
  9. Molkov, V, Makarov, D a Schneider, H (2006). LES modelling of an unconfined large-scale hydrogen-air deflagration (LES modelování rozsáhlé deflagrace směsi vodíku se vzduchem ve volném prostoru). *Journal of Physics D: Applied Physics*. Svazek 39, s. 4366–4376.
  10. Molkov, VV, Makarov, DV, Verbecke, F a Schneider, H (2007). Supra LES of accelerating premixed hydrogen-air flames in the open atmosphere (Supra LES akcelerujících plamenů premixovaných směsí vodíku se vzduchem v otevřené atmosféře). Sborník příspěvků z 3. mezinárodního symposia o nerovnovážných procesech, plazmatu, spalování a atmosférických jevech (NEPCAP), Soči, Rusko, červen 2007.
  11. Gorev, VA, Miroshnikov, SN a Troshin, YaK (1980) Pressure waves from gaseous explosions (Tlakové vlny z explozí plynů). Uvedeno v: *Detonace, Sborník příspěvků z VI. všeobecného symposia o spalování a explozích*, (23. až 26. září 1980, Almaty), Černogolovka, Ústav fyziky chemických látek při Akademii věd SSSR, 1980, s.110–113.
  12. Molkov, VV (2009). A multi-phenomena turbulent burning velocity model for large eddy simulation of premixed combustion (Vícefázový model rychlosti turbulentního hoření pro simulaci velkých vírů při spalování premixovaných směsí). Uvedeno v: *Nonequilibrium Phenomena: Plasma, Combustion, Atmosphere (Nerovnovážné jevy: plasma, spalování, atmosféra)*. Eds. Roy GD, Frolov SM a Starik AM, Torus Press, Moskva, s. 315–323.
  13. Verbecke, F, Makarov, D a Molkov, V (2009). VLES of lean hydrogen-air deflagrations in a closed 5.7m height vessel (VLES deflagrací chudých směsí vodíku se vzduchem v uzavřené nádobě s výškou 5,7 m). 6. středomořské sympozium o spalování, Ajaccio, Francie.
  14. Kumar, RK a Bowles, EM (1990) Flame acceleration in hydrogen/air mixtures in a vertical cylinder filled with obstacles (Zrychlení plamene ve směsi vodíku se vzduchem ve svislé láhvi vyplněné překážkami). Sborník příspěvků z 2. konference o konstrukci a používání ochranných obálek, Toronto, Kanadská společnost pro jadernou vědu, 14.–17. října 1990.



## Přednáška 10: Zvládnání explozí vodíku

15. Whitehouse, DR, Greig, DR a Koroll, GW (1996). Combustion of stratified hydrogen-air mixtures in the 10.7 m<sup>3</sup> combustion test facility cylinder (Spalování stratifikované směsi vodíku se vzduchem ve zkušebním válci s objemem 10,7 m<sup>3</sup>). Nuclear engineering and design (Jaderné inženýrství a konstrukce). Svazek 166, 453–462.
16. Dorofeev, SB (2008). Flame acceleration and transition to detonation: a framework for estimating potential explosion hazards in hydrogen mixtures (Zrychlení plamene a přechod k detonaci: rámec pro odhad potenciálního nebezpečí výbuchu ve vodíkových směsích). *Přednáška přednesená na 3. evropské letní škole o bezpečnosti vodíku*, Belfast, Spojené království, 21.–30. července 2008.
17. Ciccarelli, G a Dorofeev, S (2008). Flame acceleration and transition to detonation in ducts (Zrychlení plamene a přechod k detonaci v kanálech). Progress in Energy and Combustion Science (Pokroky ve vědě o energii a spalování). Svazek 34, s. 499–550.
18. Bradley, D (1999). Instabilities and flame speeds in large-scale premixed gaseous explosions (Nestabilita a rychlosti plamene v rozsáhlých explozích premixovaných směsí plynů). Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. sv. 357, s. 3567–3581.
19. Bradley, D, Cresswell, TM a Puttock, JS (2001). Flame acceleration due to flame-induced instabilities in large-scale explosions (Zrychlení plamene v důsledku nestabilit vyvolaných plamenem při rozsáhlých explozích). Combustion and Flame (Spalování a plamen). Svazek 124, s. 551–559.
20. Lipatnikov, AN (2007). Turbulent combustion of hydrogen-air mixtures (Turbulentní spalování směsi vodíku se vzduchem). *Přednáška přednesená na 2. evropské letní škole o bezpečnosti vodíku*, Belfast, Spojené království, 30. července až 8. srpna 2007.
21. Lipatnikov, AN a Chomiak, J (2005). Molecular transport effects on turbulent flame propagation and structure (Vliv molekulárního transportu na šíření a strukturu turbulentního plamene). *Progress in Energy and Combustion Science (Pokroky ve vědě o energii a spalování)*, sv. 31, s. 1–73.
22. Kuzněcov, VR a Jasakov, VA (1990). Turbulence and Combustion (Turbulence a spalování). Hemisphere Publishing Corporation. 1. vydání.
23. Groethe, M, Merilo, E, Colton, J, Chiba, S, Sato, Y a Iwabuchi, H (2005). Large-scale hydrogen deflagrations and detonations (Rozsáhlé vodíkové deflagrace a detonace), *Sborník z 1. mezinárodní konference o vodíkové bezpečnosti*, 8.–10. září 2005, Pisa, příspěvek 120105.
24. Molkov, V, Verbecke, F a Makarov, D (2008). LES of hydrogen-air deflagrations in a 78.5 m tunnel (LES deflagrací směsi vodíku se vzduchem v tunelu s délkou 78,5 m). Odborný časopis Věda a technologie spalování. Svazek 180 (5), s. 796–808.

## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

25. Gamezo, VN, Ogawa, T a Oran, ES (2007). Numerical simulations of flame propagation and DDT in obstructed channels filled with hydrogen-air mixture. (Numerické simulace šíření plamene a přechodu DDT v kanálech s překážkami naplněných směsí vodíku se vzduchem). Proc. Comb. Inst. Svazek 31, s. 2463–2471.
26. Landau, LD a Lifshits, EM (1988) Hydrodynamics (Hydrodynamika), Nauka, Moskva, s. 733.
27. NFPA 68 (2007) Guide for venting of deflagrations (Návod k ventilaci deflagrací), NFPA, Quincy, MA, USA.
28. Molkov, V, Verbecke, F a Saffers, JB. (2008). Venting of uniform hydrogen-air deflagrations in enclosures and tunnels: vent sizing and prediction of overpressure (Ventilace deflagrací homogenních směsí vodíku se vzduchem z uzavřených prostorů a tunelů: dimenzování ventilace a předpovědi přetlaku). 7. ročník ISHPMIE, Petrohrad, Rusko, 7. až 11. července 2008.
29. EN14994:2007. Ochranné systémy pro odlehčení výbuchu plynu.
30. Lamoureux, N, Djebaili-Chaumeix, N a Paillard, C-E (2003). Laminar flame velocity determination for H<sub>2</sub>-air-He-CO<sub>2</sub> mixtures using the spherical bomb (Stanovení laminární rychlosti plamene u směsí H<sub>2</sub>-vzduch-He-CO<sub>2</sub> pomocí kulové bomby). Experimental Thermal and Fluid Science (Experimentální věda o termice a tekutinách). Svazek 27, s. 385–393.
31. Tse, SD, Zhu, DL a Law, CK (2000). Morphology and burning rates of expanding spherical flames in H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/inert mixtures up to 60 atmospheres (Morfologie a rychlost hoření expandujících sférických plamenů ve směsích H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/inertních látek do tlaku 60 atmosfér). Sborník příspěvků z 28. mezinárodního sympozia o spalování, Pittsburgh, PA: The Combustion Institute, s. 1793–1800.
32. Babkin, VS (2003). Private communication (Soukromá komunikace). Ústav chemické kinetiky a spalování, Sibiřská pobočka, Ruská akademie věd, Novosibirsk, Rusko.
33. Paskan, HL, Groothuizen, ThM a de Gooijer, H (1974). Design of pressure relief vents (Konstrukce přetlakových otvorů). *Uvedeno v: Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries (Prevence ztrát a podpora bezpečnosti ve zpracovatelském průmyslu)*, vyd. C. H. Buschman, s. 185–189.
34. Projekt HyIndoor. Výstup D5.1. „Guidelines on fuel cell indoor installation and use“ (Pokyny pro montáž a použití palivových článků ve vnitřních prostorech, [http://www.hyindoor.eu/wp-content/uploads/2014/06/HyIndoor-Guidelines\\_D5.1\\_Final-version3a.pdf](http://www.hyindoor.eu/wp-content/uploads/2014/06/HyIndoor-Guidelines_D5.1_Final-version3a.pdf) [přístup k datu 02.12.2020])
35. Friedrich, A, Grune, J, Jordan, T, Kotchourko, A, Kotchourko, N, Kuznetsov, M, Sempert, K, Stern, G (2007). Experimental study of hydrogen-air deflagrations in flat layer

## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

- (Experimentální studie deflagrací směsí vodíku se vzduchem v ploché vrstvě), mezinárodní konference o vodíkové bezpečnosti, 11.–13. září 2007, San Sebastian, Španělsko.
36. Tamanini F. Partial-volume deflagrations e characteristics of explosions in layered fuel/air mixtures (Deflagrace a vlastnosti explozí v částečném objemu vrstvených směsí paliva se vzduchem). Uvedeno v: Sborník příspěvků z 3. mezinárodního semináře o nebezpečí požárů a výbuchu (ISFEH3), Lake Windermere, Anglie; 2000. s. 103–117.
  37. Buckland I. Explosions of gas layers in a room size chamber (Výbuchy plynných vrstev v komoře o velikosti místnosti), sv. 58. Série symposií Institutu chemických technologií (Institution of Chemical Engineers); 1980.
  38. Whitehouse DR, Greig DR, Koroll GW. Combustion of stratified hydrogen-air mixtures in the 10.7 m<sup>3</sup> combustion test facility cylinder (Spalování stratifikované směsi vodíku se vzduchem ve zkušebním válci s objemem 10,7 m<sup>3</sup>). Nucl Eng Des 1996;166:453–462.
  39. Makarov D, Hooker P, Kuznetsov M, Molkov V. Deflagrations of localised homogeneous and inhomogeneous hydrogen-air mixtures in enclosures (Deflagrace lokalizovaných homogenních a nehomogenních směsí vodíku se vzduchem v uzavřených prostorech). Mezinárodní časopis o vodíkové energii 2018; 43:9848–9869.
  40. Stamps D, Cooper III E, Egbert R, Heerdink S, Stringer V. Pressure rise generated by the expansion of a local gas volume in a closed vessel (Růst tlaku vyvolaný expanzí lokálního objemu plynu v uzavřené nádobě). Proc R Soc A 2009;465:3627–3646.
  41. Molkov V. Venting gaseous deflagrations (Ventilace deflagrací plynů). Disertační práce. Moskva: VNIPO; 1996 [rusky].
  42. Molkov VV, Nekrasov VP. Dynamics of gaseous combustion in a vented constant volume vessel (Dynamika spalování plynů ve ventilované nádobě s konstantním objemem). Combust Explos Shock Waves 1984;17(4):363–370.
  43. BRHS, Dvouletá zpráva o bezpečnosti vodíku (2009). Evropská síť excellence „Bezpečnost vodíku jako nosiče energie“ (NoE HySafe). K dispozici na adrese: [www.hysafe.org](http://www.hysafe.org) [přístup k datu 02.12.2020].
  44. Zbikowski, M, Makarov, D a Molkov, V (2008). LES model of large scale hydrogen–air planar detonations: Verification by the ZND theory (LES model rovinných detonací směí vodíku se vzduchem ve velkém měřítku: ověření pomocí teorie ZND). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 33, s. 4884–4892.
  45. Dorofeev, SB, Bezmelnitsin, AV a Sidorov, VP (1995). Transition to detonation in vented hydrogen-air explosions (Přechod k detonaci při odlehčeném výbuchu směsi vodíku se vzduchem). Combustion and Flame (Spalování a plamen). Svazek 103, s. 243–246.

## Přednáška 10: Zvládnání explozí vodíku

46. Tsuruda, T a Hirano, T (1987). Growth of flame front turbulence during flame propagation across an obstacle (Růst turbulence na čele plamene při šíření plamene přes překážku). *Věda a technologie spalování* Svazek 51, s. 323–328.
47. Pförtner, H a Schneider, H (1984) Závěrečná zpráva pro Interatom GmbH, Bergish Gladbach, Německo, říjen, interní zpráva Fraunhofer ICT. (V němčině).
48. Kuznetsov, M. a kol. (2005). DDT in a smooth tube filled with a hydrogen-oxygen mixture (Přechod DDT v hladkém potrubí naplněném směsí vodíku s kyslíkem). *Shock Waves (Rázové vlny)*. Svazek 14(3), s. 205–215.
49. NASA (1997). Bezpečnostní norma pro vodík a vodíkové systémy. Pokyny pro konstrukci vodíkových systémů, výběr materiálů, provoz, skladování a přepravu. Technická zpráva NSS 1740.16, Úřad pro bezpečnost a zajištění misí, Washington. K dispozici na adrese: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19970033338/downloads/19970033338.pdf> zrušeno dne 25. července 2005 [přístup k datu 03.12.2020].
50. ISO/TR 15916 (2004). Základní hlediska bezpečnosti vodíkových systémů. Mezinárodní organizace pro normalizaci. Technická komise ISO 197, Vodíkové technologie. Mezinárodní organizace pro normalizaci, Ženeva.
51. Tieszen, SR, Sherman, MP, Benedick, WB, Shepherd, JE, Knystautas, R a Lee, JHS (1986). Měření velikosti detonační buňky ve směsi vodíku, vzduchu a páry. *Pokrok v astronautice a aeronautice*. Svazek 106, s. 205–219.
52. Lewis, B a von Elbe, G (1987). *Combustion, flames and explosion of gases (Hoření, plameny a výbuchy plynů)*. 3. vydání. Academic, Press.
53. Breitung, W a kol. (2000). Flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in nuclear society (Zrychlení plamene a přechod od deflagrace k detonaci v jaderné společnosti). *Zpráva NEA/CSNI č. NEA/CSNI/R(2000)7*.
54. Radulescu, MI, Sharpe, GJ a Law, CK (2005). The Hydrodynamic Structure of Detonations (Hydrodynamická struktura detonací). *Sborník 20. ročníku ICDERS*, Montreal, Kanada 2005.
55. Bull, DC, Ellworth, JE a Shiff, PJ (1982). Detonation Cell Structures in Fuel/Air Mixtures (Struktura detonačních buněk ve směsi paliva se vzduchem). *Combustion and Flame (Spalování a plamen)*. Sv. 45(1), s. 7–22.
56. Lee, JHS (1982). Hydrogen air detonations (Detonace směsí vodíku se vzduchem). *2. mezinárodní workshop o důsledcích působení vodíku na bezpečnost vodních reaktorů*. Albuquerque, Nové Mexiko.
57. Gavrikov, AI, Efimenko, AA a Dorofeev, SB (2000). A model for detonation cell size prediction from chemical kinetics (Model pro předpověď velikosti detonační buňky z chemické kinetiky). *Combustion and Flame (Spalování a plamen)*. Svazek 120, s. 19–33.

## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

58. Rigas, F and Amyotte, P (2013). Vodíková bezpečnost. Boca Raton: CRC press. Taylor and Francis Group.
59. Cassut, LH (1961). Experimental investigation of detonation in unconfined gaseous hydrogen-oxygen-nitrogen mixtures (Experimentální zkoumání detonace plyných směsí vodíku, kyslíku a dusíku v otevřeném prostoru). Časopis ARS. Sv. 31, s. 7.
60. Lee, JH, Kynstantus, RC, Guirao, M, Benedick, WA a Shepherd, JE (1982). Hydrogen air detonations (Detonace směsí vodíku se vzduchem). Sborník příspěvků z 2. mezinárodního workshopu o důsledcích působení vodíku na bezpečnost vodních reaktorů. M. Berman, Ed., SAND82-2456, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, říjen.
61. Browne, S a Shepherd, JE (2007). Linear Stability of Detonations with Reversible Chemical Reactions (Lineární stabilita detonací s reverzibilními chemickými reakcemi). Rozšířený abstrakt a plakát o postupu prací na 21. mezinárodním kolokviu o dynamice výbuchů a reaktivních systémech, ENSMA, Poitiers, Francie, 22.–27. července 2007.
62. Projekt HyFacts. Kapitola DM. Deflagrace a detonace vodíku. K dispozici na adrese: <http://hyfacts.eu/category/education-training/> [přístup k datu 04.01.2016].
63. Molkov, V a Kashkarov, S (2015). Blast wave from a high-pressure gas tank rupture in a fire: stand-alone and under-vehicle hydrogen tanks (Tlaková vlna z protržení vysokotlaké plynové nádrže při požáru: samostatné a podvozkové vodíkové nádrže). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy. Sv. 40, č. 36, s. 12581–12603.
64. Baker, WE, Cox, PA, Westine, PS, Kulesz, JJ a Strehlow, RA (1983). Explosion hazards and evaluation (Nebezpečí výbuchu a jeho hodnocení). Elsevier Scientific Publishing Company.
65. Mannan, S (2005). Časopis Loss Prevention in the Process Industries (Prevence ztrát ve zpracovatelském průmyslu), 3. vydání, sv. 1. Elsevier Butterworth-Heinemann.
66. Kashkarov S, Li Z, Molkov V. Blast wave from a hydrogen tank rupture in a fire in the open: Hazard distance nomograms (Tlaková vlna při protržení vodíkové nádrže za požáru na volném prostranství: nomogramy pro stanovení nebezpečné vzdálenosti). Mezinárodní časopis o vodíkové energii (International Journal of Hydrogen Energy), 2020, 45:2429–2446.
67. Molkov V, Cirrone D, Shentsov V, Dery W, Kim W, Makarov D. Blast wave and fireball after hydrogen tank rupture in a fire (Tlaková vlna a ohnivá koule po protržení vodíkové nádrže při požáru). Uvedeno v: Advances in pulsed and continuous detonations (Pokrok v impulzních a průběžných detonacích); 2018.
68. Shebeko, YuN, Tsarichenko, S G, Eremenko, OYa, Keller, VD a Trunev, AV (1990). Combustion of lean hydrogen-air mixtures in an atomized water stream (Spalování

## Přednáška 10: Zvládání explozí vodíku

chudých směsí vodíku se vzduchem v rozprašovaném proudu vody). Combustion Explosion and Shock Waves (Spalování výbuch a rázové vlny). Svazek 26(4), s. 426–428.

69. Friedrich, A, Kotchourko, N, Stern, G a Vesper, A (2009). HYPER experiments on catastrophic hydrogen releases inside a fuel cell enclosure (Experimenty HYPER s katastrofickým únikem vodíku uvnitř krytu palivového článku). *Sborník příspěvků třetí mezinárodní konference o bezpečnosti vodíku*, příspěvek ID 118, 16.–18. září 2009, Ajaccio, Korsika, Francie.