

MODELOVANIE A VERIFIKÁCIA TLAKOVÝCH ÚČINKOV EXPLÓZIÍ PRI HAVÁRII NA TERMINÁLI BUNSFIELD

JÁN KANDRÁČ

MODELLING AND VERIFICATION OF PRESSURE EFFECTS DURING MAJOR ACCIDENT AT BUNCEFIELD TERMINAL

ABSTRAKT

Práca je zameraná na zhodnotenie vybraných reprezentatívnych havarijných scenárov a ich tlakových účinkov pri závažnej priemyselnej havárii na termináli v anglickom Buncefielde. Výsledky výpočtov a porovnaní sú verifikované s dostupnými informáciami z miesta havárie s cieľom definovať neurčitosti a konzervatívnosť použitého výpočtového modelu.

Keľúčovú slová: závažná priemyselná havária, analýza rizika, VCE, explozívne horenie, rozptyl nebezpečných látok, ALOHA

ABSTRACT

The work is focused on evaluation of representative accident scenarios and their pressure effects during major industrial accident on Buncefield terminal in Great Britain. Results of the calculations and the comparisons are verified with available information from place of the accident with a goal to define uncertainties and conservativeness of the used calculation model.

Key words: major industrial accident, risk analysis, VCE, explosive combustion, dispersion of hazardous substances, ALOHA

ÚVOD

V závere roku 2005 došlo v priemyselnej zóne pri meste Hemel Hempsteade neďaleko Londýna k závažnej priemyselnej havárii (ZPH), ktorá vyradila z prevádzky prakticky celý industriálny komplex. Havária na palivovom termináli Bunsfield, ktorý je v majetku spoločnosti Hertfordshire Oil Storage Terminal (HOSL) bola zaradená medzi najväčšie priemyselné havárie v Európe a aj vo svete.

V HOSL majú podiel nadnárodné spoločnosti TOTAL UK Limited 60 % a Texaco 40 %, pre ktoré táto udalosť znamenala stratu celej investície. Haváriou boli významne postihnuté aj ďalšie spoločnosti, ako British Petroleum, Shell a British Pipeline Agency (hlavne z dôvodu vysokých nepriamych - následných škôd).

HOSL bol piaty najväčší britský terminál pohonných hmôt, projektovo mohol skladovať 6-8 % štátnych hmotných rezerv a zásoboval leteckým benzínom, kerozínom, benzínom a naftou rozsiahle oblasti juhovýchodného Anglicka, vrátane letísk Heathrow, Gatwick a Luton.

V júli 2003 uviedol HOSL a ďalšie spoločnosti v priemyselnej zóne vo svojich bezpečnostných správach (podľa Smernice Európskej únie SEVESO II) [1] projektové skladovacie kapacity uhľovodíkových palív na úrovni 200 tis. ton. V čase havárie však uvádzané skladované množstvo týchto palív nedosahovalo ani 35 tis. ton.

Pri havárii v dňoch 11. – 14. decembra 2005 výbuchy a následné požiare úplne zničili 21 z 26 skladovacích nádrží, 5 nádrží sa podarilo hasičom zachrániť. Bolo zranených vyše 40 ľudí (vrátane hasičov), čo však bola len šťastná zhoda náhod (prvý výbuch bol skoro ráno a v nedeľu). V blízkej priemyselnej zóne boli zničené dva veľké a desať menších stavebných objektov (výrobných, skladovacích a administratívnych) a čiastočne bolo poškodených takmer tisíc stavebných objektov, vrátane rodinných domov v okruhu do 2 km. Havária významne zasiahla aj samotné mesto Hemel Hempstead, z ktorého bolo evakuovaných vyše 3 000 ľudí. Takmer 16 500 zamestnancov rôznych firiem v priemyselnej zóne prišlo čiastočne alebo úplne o prácu.

PRIEBEH HAVÁRIE

V nedeľu 11. decembra o šiestej hodine ráno obyvateľov mesta prebudila séria mohutných výbuchov v priemyselnej zóne. Následné vyšetrovanie príčin iniciácie tejto havárie poukázalo aj na jeden špecifický havarijný scenár. Ten sa vyšetrovaním havárie postupne potvrdzoval, aj keď ešte ani dnes nie je ho možné jednoznačne definovať ako príčinu a iniciátor havárie. Jedno je však možné špecifikovať, a to je časový priebeh poruchovej udalosti predchádzajúcej havárii.

Dňa 11. decembra 2005 o približne 03:00 hod ranej snímač hladiny benzínu v nádrži 912 zaznamenával nezmenený údaj hoci práve prebiehalo plnenie nádrže s intenzitou dodávky benzínu na úrovni $550 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$.

Výpočty poukazujú na to, že okolo 05:20 hod nádrž 912 mala byť už úplne plná, resp. hladina v nádrži mala dosiahnuť havarijnú úroveň (maximálna hladina v nádrži), hlásič (snímač havarijnej úrovne hladiny) mal to zahlásiť a bezpečnostný systém mal automaticky uzavrieť ventily a odstaviť čerpadlo. Vyšetrovaním sa zistili dôkazy (svedkovia), ktorí poukázali na to, že bezpečnostný systém nezpracoval a došlo k preplneniu nádrže. Na obr. č. 2 je schéma príslušnej nádrže 912 s vyznačením bezpečnostných funkcií a tiež ventilačných striešok v strešnom plášti, cez ktoré začal benzín pretekať z nádrže von do spoločnej záchytnej a havarijnej nádrže s ďalšími dvomi susednými nádržami.

Dá sa predpokladať, že od 05:20 hod pokračujúce čerpanie benzínu spôsobilo únik paliva cez ventilačné striešky v strešnom plášti a jeho rozlievanie a kaskádovité prepádanie sa po deflektorových prstencoch nádrže s intenzívnym miešaním sa s okolitým studeným vzduchom (vonkajšia teplota sa pohybovala okolo 0°C) s následným narážaním a rozlievaním sa po dne spoločnej záchytnej a havarijnej nádrže (ozn. Bund A).

Záznam z priemyselných kamier (systém CCTV) o 05:38 hod už zachycuje hmlovitý mrak (zrejme zmes studeného vzduchu a benzínových pár) pohybujúci sa od nádrže 912 na severo - západný roh Bund A a ďalej smerujúci na západ. Tento mrak mal výšku okolo jedného metra. O 05:46 hod mrak dosiahol výšku dva metre a šírila sa od Bund A všetkými smermi.

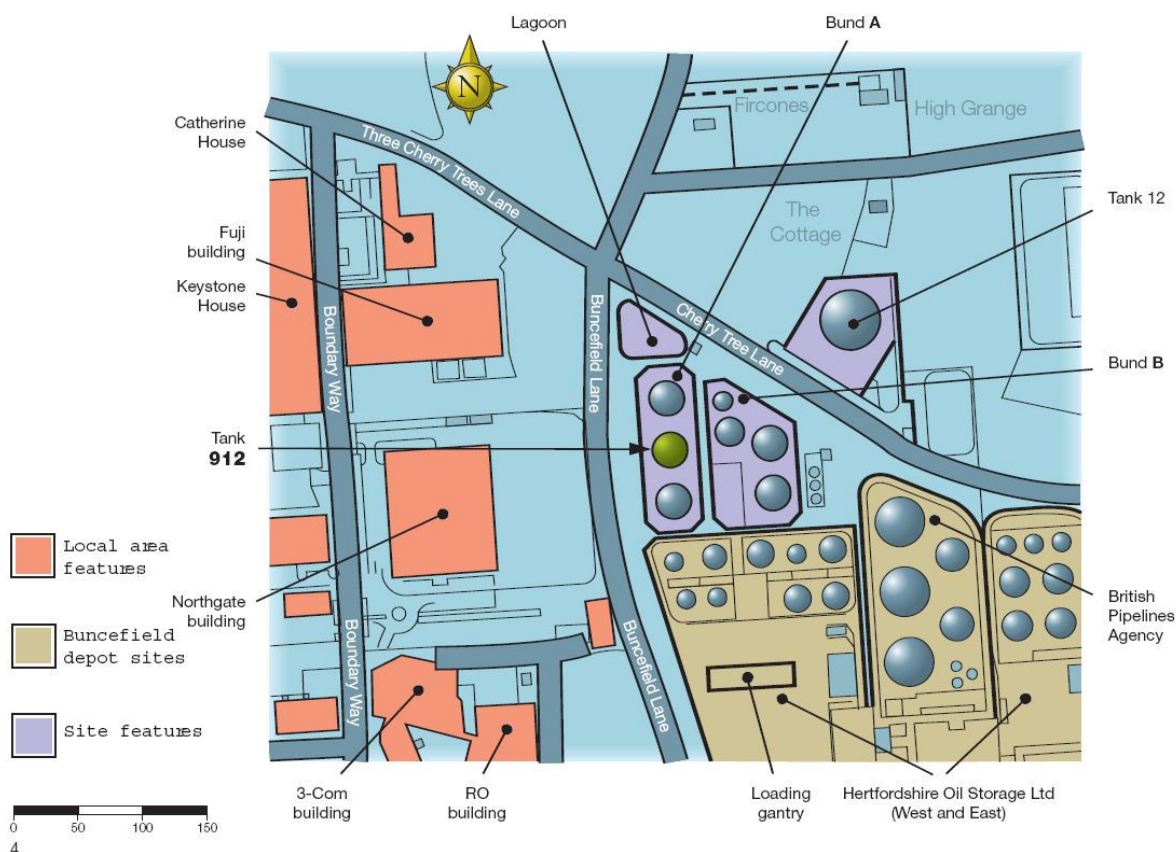
Medzi 05:50 hod až 06:00 hod sa do nádrže 912 dodávalo $890 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ benzínu. Hmlovitý mrak do 05:50 hod sa šírila po Cherry Lane a Buncefield Lane, opisujúc povrch okolitej krajiny. Dosiahol parkoviská a budovy 3-Com, Northgate House a Fuji a smeroval ku Catherine House. Do času hlavnej explózie roh tohoto oblaku siahal takmer po Boundry Way a začal dosahovať cisternové stáčacie (plniace) stanovišťa na juhu. Na severe mrak došiel ku Cherry Tree Lane. Z východnej strany bol hmlovitý oblak taktiež zachytený kamerami CCTV. Podľa svedkov sa výška viditeľnej hmly líšila, od 1 m v oblasti Bund A a cisternových stáčacích stanovišť až po 5 – 7 m na Cherry Trees Lane (viď obr. č. 1).

O 06:01 hod došlo k prvému najväčšiemu výbuchu, po ktorom podľa výpovedí svedkov nasledovali ďalšie menšie výbuchy a požiare. Hlavný (prvý) výbuch bol lokalizovaný medzi HOSL West site a parkoviskami Fuji a Northgate budov.

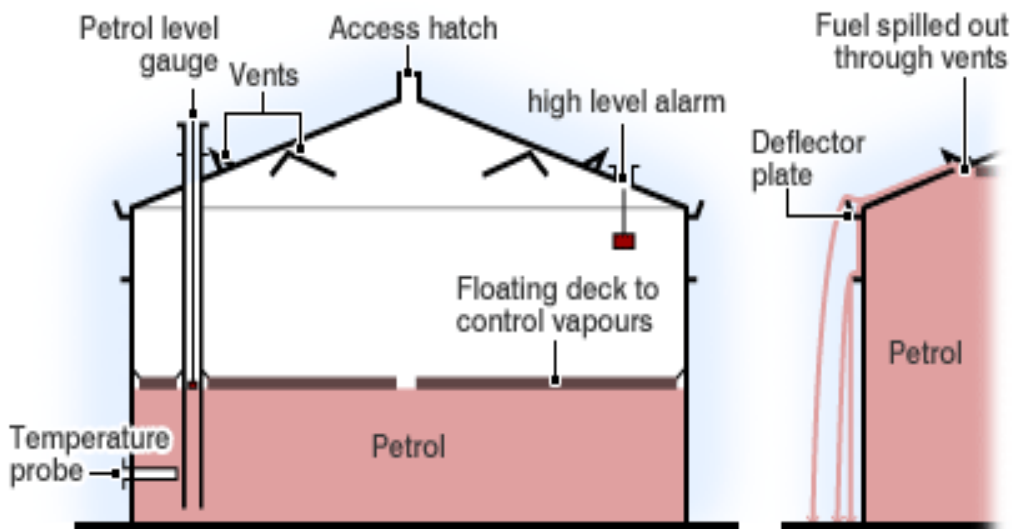
Napriek snahe vyšetrovateľov havárie identifikovať iniciačný zdroj tohto výbuchu nie je ani dnes možné ho jednoznačne definovať. Mohol to byť havarijný generátor Northgate building na južnej strane parkoviska, požiarne čerpadlá na východnej strane HOSL West site, ale aj niektoré z motorových vozidiel na parkoviskách zasiahnutých hmlovitým mrakom. Nie je vylúčené ani iné zavinenie, dôkazy sa však už asi ťažko nájdu.

Výbuch ťažko poškodil objekty Northgate House, Fuji, Catherine House a tiež 3-Com building a RO building, ale aj stavby na druhej strane ulice Boundry Way – Keystone House (viď obr. č. 1) a tlakové účinky na úrovni cca 5 kPa sa prejavili až do vzdialenosti 2 km. Len šťastnou zhodou okolností výbuch nespôsobil žiadne straty na životoch (celkovo 43 zranených).

Svedkovia havárie uviedli, že po jednej mohutnej explózii nasledovali tri menšie výbuchy, čo by potvrdzovalo teóriu ďalšieho rozvoja havárie v zachytnej a havarijnej nádrži Bund A (spoločné umiestnenie troch skladovacích nádrží v jednej havarijnej nádrži – viď obr. č. 1). Predpokladá sa, že explózia iniciovala požiar vytečeného bezolovnatého benzínu v tejto havarijnej vani (nádrži) a v dôsledku tepelného sálenia a vedenia tepla došlo k výbuchom, resp. k explozívnomu horeniu na všetkých nádržiach v Bund A.



Obr. č. 1 Schematické zachytenie terminálu HOSL a jeho najbližšieho okolia postihnutého výbuchom a následnými požiarimi (nádrž 912 označená šípkou)



Obr. č. 2 Základná schéma nádrže 912 (zľava sú v texte uvedené meranie teploty a hladiny benzínu v nádrži, ventilačné striešky, servisný otvor, hlásič maximálnej hladiny v nádrži, deflektorový prstenec a pretečenie paliva cez ventilačné striešky, vo vnútri nádrže je plávajúci vrchlík - minimalizujúci odparovanie paliva)

Oneskorenie niekoľkých minút medzi mohutným a nasledujúcimi menšími výbuchmi naznačuje, že tieto výbuchy už skutočne mohli byť skôr v dôsledku vnútorných výbuchov v nádržiach, resp. v dôsledku únikov paliva z poškodených nádrží a potrubí, ako z výbuchov z plynného oblaku. Toto tvrdenie podporuje aj fakt, že časť strechy nádrže 910 z Bund A, ktorá bola nájdená na parkovisku pri budove Northgate sa tam zrejme dostala po vnútornej explózii v tejto nádrži. V tom čase nádrž bola prázdna (nepoužívaná), takže iné vysvetlenie tejto skutočnosti by bolo problematické.

Menšie výbuchy už neboli seizmicky zaznamenané (len hlavný výbuch). Preto nie je možné presne povedať koľko menších výbuchov sa vyskytlo a v akom čase. Prvý bol zrejme pár minút po hlavnom výbuchu a pravdepodobne všetky sa udiali do pol hodiny po hlavnom výbuchu. Nedá sa však vylúčiť, že bol aj nejaký výbuch pred hlavným výbuchom.

Po iniciácii požiaru v Bund A už výška plameňov sa pohybovala okolo 100 m a sálavé teplo z požiaroviska (Bund A) spôsobilo závažné škody na potrubných rozvodoch a susedných zásobníkoch (nádržiach), čím boli iniciované ďalšie požiare. Unikajúce horiace palivá sa dostali nielen do špeciálnej a dažďovej kanalizácie, ale aj do bazénov požiarnej vody a tiež potrubných a káblových kanálov a cez poškodené havarijné nádrže aj do pôdy a do spodných vôd.

Havária sa menila na katastrofu, ktorej sa už nedalo zabrániť. Bezmocní hasiči zachraňovali ľudí a mobilizovali sily a prostriedky na zabránenie ďalšieho šírenia sa požiaru. Hasiť v týchto podmienkach by bolo totiž šialenstvom.

Až 14. decembra o 19:36 hod dohoreli posledné nádrže a začali sa hodnotiť škody.

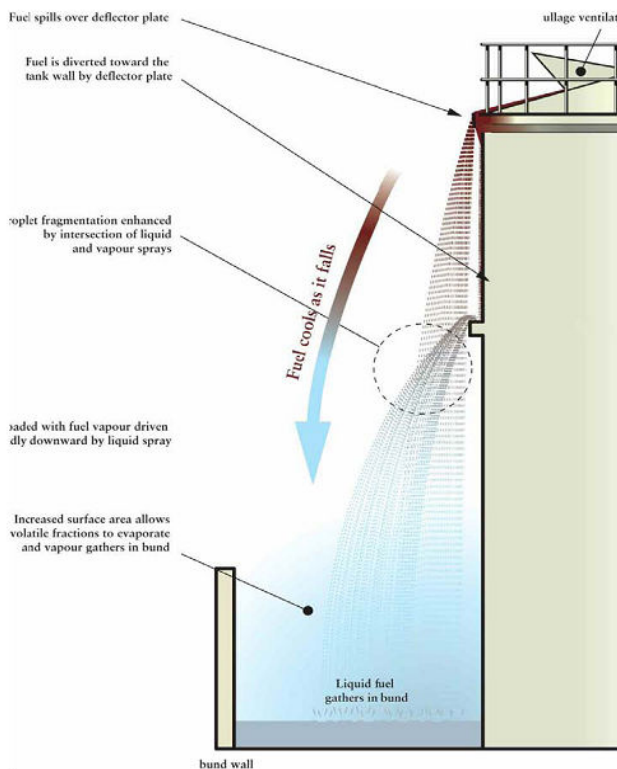
MODELOVANIE A VERIFIKÁCIA ROZPTYLU NEBEZPEČNÝCH ŠKODLIVÍN

Ako už bolo spomenuté v predchádzajúcom texte, zásobník 912 začal pretekať cez vetracie otvory umiestnené na streche. Prúd vytekajúceho benzínu sa prepadal cez hranu strechy zásobníka (deflektor), na ktorej sa trieštil na kvapky a menšie prúdy, ktoré sa na nižšie situovanej obrube nádrže (viď obr. č. 3), ako ďalšej kaskáde, trieštili na drobné kvapky.

V dôsledku tohto javu sa aj napriek nízkej vonkajšej teplote výrazne zvýšilo odparovanie ľahkých zložiek benzínu do okolia, pretože celková povrchová plocha paliva pre toto odparovanie narástla minimálne o 1-2 rády. Na takýto proces - zmenu skupenstva z kvapalného na plynné je však potrebná energia. Zjednodušené výpočty ukázali, že teplota vzduchu s takmer 100% vlhkosťou sa v blízkosti nádrže musela znížiť na cca -7 až -8 °C.

V dôsledku tohto podchladenia sa asi polovica vodnej pary obsiahnutá vo vzduchu vyzrážala vo forme kryštálikov ľadu vytvoriac hmlu. Tieto výpočty sú v súlade so zaznamenanými údajmi (snímkami) kamerových systémov.

Na základe známych skutočností a dostupných výsledkov doterajších šetrení bol spracovateľmi príspevku na modelovanie odparu a rozptylu ľahkých frakcií z uniknutého benzínu použitý voľne dostupný softvér ALOHA. Pre modelovanie sa zvolili identické meteorologické podmienky, aké boli v čase vzniku úniku (Pasquillova trieda stability F, relatívna vlhkosť 99%, priemerná rýchlosť vetra $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, smer vetra 280° vzhľadom na sever, teplota 0°C).



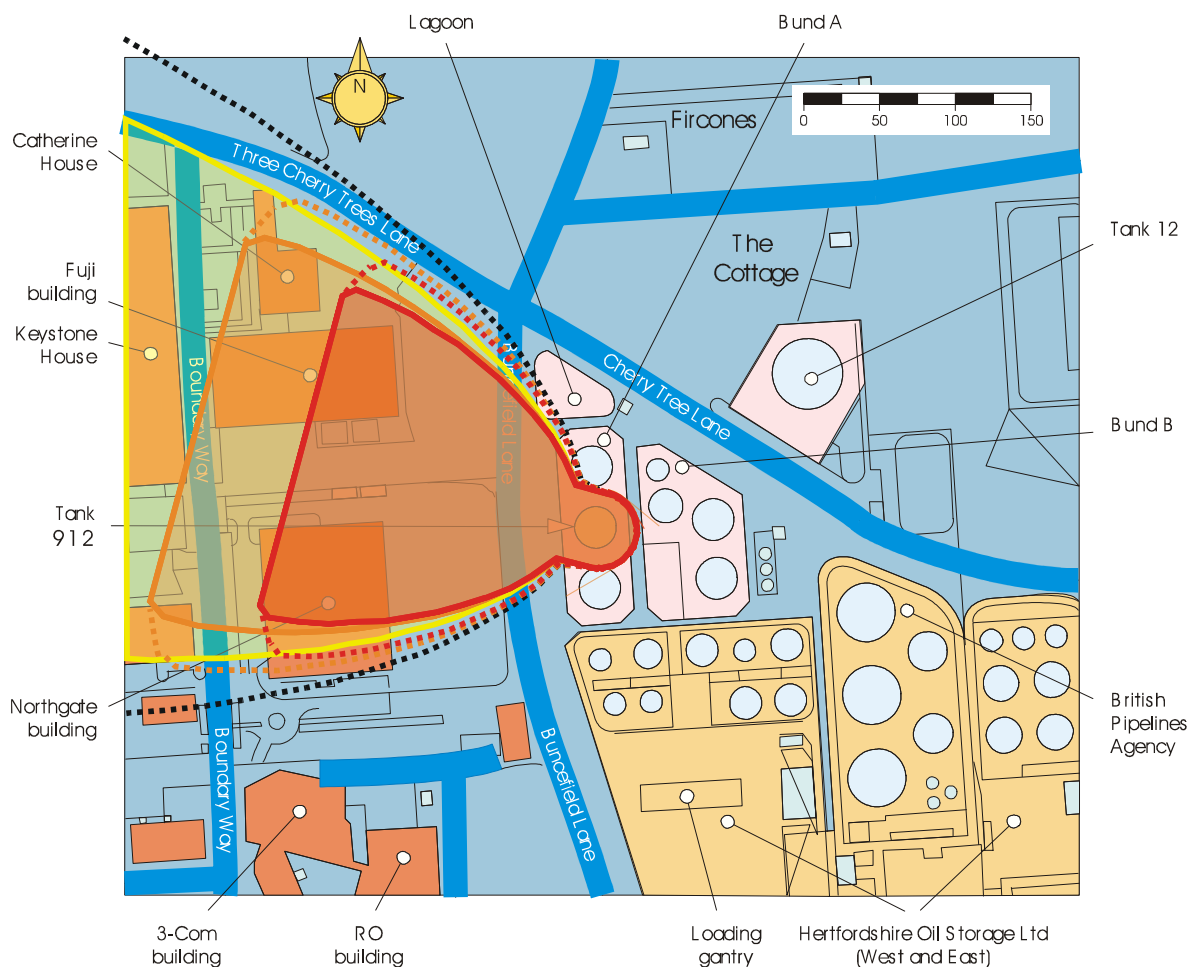
Vetracia strieška nádrže paliva
Pretekanie paliva cez deflektorovú obrubu
Vytekajúce palivo je deflektorom odčýlené od steny nádrže –
(časť paliva steká po stene nádrže a odkláňa sa od nej na druhom deflektore)
Prelínaním dvoch prúdov vytekajúceho paliva zväčšuje sa povrchová plocha pre odparovanie
Padajúce kvapôčky paliva sú ochladzované okolitým vzduchom
Podchladený vzduch s nasýtenými parami paliva klesá dole tlačný palivovým „sprejom“
V havarijnej nádrži (Bund A) vytvárajú prchavé zložky paliva so vzduchom viditeľnú hmlu, ktorá sa potom šíri mimo nádrž v smere vetra
Na dne havarijnej nádrže sa vytvára kaluž kvapalného paliva
Betónová stena havarijnej nádrže

Obr. č. 3 Schematické znázornenie procesu tvorby hmlovitého mraku v priestore havarijnej nádrže (Bund A)

Ako reprezentatívna látka pre modelový rozptyl bol zvolený kvapalný pentán (C_5), nakoľko vo vyšetrovacích správach [1-5] sa uvádza únik (odpar) prchavých zložiek benzínu – C_4 až C_6 . Odhadovaný objemový prietok tohto úniku bol stanovený na základe údajov o objemovom prietoku pri plnení nádrže 912 na $9,16 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.

Počas predpokladaného 40 min trvajúceho úniku tak uniklo výpočtovo 236 726 kg pentánu, z ktorých približne 37 t bolo vo forme pár v medziach výbušnosti. Výsledky modelového výpočtu sú zachytené v nasledujúcej tabuľke a na obr. č. 4.

Dosahy rozptylu	Koncentrácia pár	Vypočítaná vzdialenosť nežiadúcich dosahov
Červená (dolná medza výbušnosti - DMV)	13 000 ppm	210 m
Oranžová (tvorba káps)	7 800 ppm	283 m
Žltá (10% dolnej medze výbušnosti)	1 300 ppm	786 m



Obr. č. 4 Schematické modelovanie rozptylu nebezpečných látok po úniku z nádrže 912 (červená zóna – koncentrácia na úrovni DMV, oranžová zóna – lokálne na úrovni DMV, žltá zóna – koncentrácia na úrovni 10 % DMV)

MODELOVANIE A VERIFIKÁCIA TLAKOVÝCH ÚČINKOV

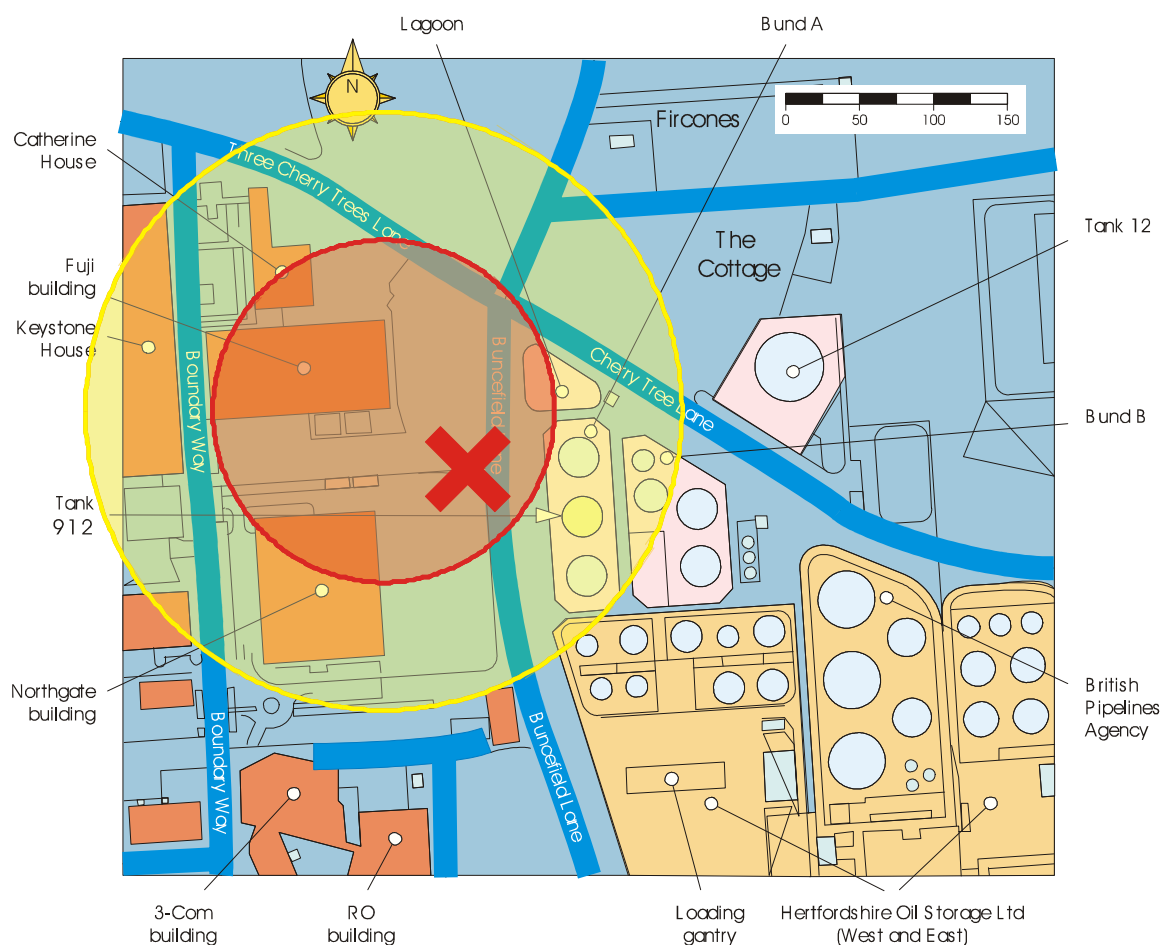
Vzhľadom na špecifické charakteristiky tlakových vln a účinkov výbuchu neohraničeného výbuchu horľavých plynov a pár je v použítom modeli TNT ekvivalentu zabudovaná neurčitosť odhadovaných tlakových účinkov.

Dosahy účinkov jednotlivých dynamických pretlakov sú znázornené na obr. č. 5. Hodnoty dynamického pretlaku boli vypočítané z výbuchu, ktorý nastal 40 minút po začatí úniku, kedy bolo iniciovaných 4 413 kg pentánu. Toto množstvo predstavuje vzhľadom k celkovému množstvu pár v medziach výbušnosti 13,6%.

Spätné overenie cez TNT ekvivalent ukázalo, že pre škody spôsobené v Buncefielde by bolo potrebné cca 15 t TNT. Prepočtom cez spalné energie TNT a pentánu bolo stanovené, že by sa jednalo o 1 643 kg pentánu, čo predstavuje účinnosť 4,3%.

Výsledky modelového výpočtu sú zachytené v nasledujúcej tabuľke a na obr. č. 5.

Vyznačenie dosahu výbuchu	Následky výbuchu	Vypočítaná vzdialenosť nežiadúcich dosahov
Červená zóna	Deštrukcia budov (55 kPa)	228 m
Žltá zóna	Vážne zranenia ľudí (24 kPa)	324 m



Obr. č. 5 Schematické modelovanie tlakových účinkov výbuchu (červená zóna – 55 kPa, žltá zóna - 24 kPa)

ZÁVER

Predkladaná práca mala za cieľ nielen poskytnúť stručnú informáciu o jednej z najzávažnejších priemyselných havárií v posledných rokoch, ale aj prezentovať nenáročné a všeobecne dostupné možnosti verifikácie špecifických následkov tejto havárie s použitím referenčného a voľne dostupného softvérového produktu (ALPHA).

Výsledky modelových výpočtov a porovnaní s použitím tohto softvéru boli verifikované jednak s dostupnými medializovanými informáciami z miesta havárie a jednak s obdobnými dostupnými modelovými výpočtami, pri ktorých bol použitý jeden z najpoužívanejších komerčných softvérových produktov spoločnosti Det Norske Veritas Ltd. (SAFETI*Professional*) [10].

Cieľom verifikácie bolo totiž pokúsiť sa definovať neurčitosti a predpokladanú (očakávanú) konzervatívnosť použitého softvérového produktu ALPHA.

Porovnaním modelových výsledkov výpočtov s realitou sa však ukázalo, že v prípade výskytu katastrofických havárií tohto typu je akékoľvek modelovanie problematické. Aj napriek tomu, že bola modelovaná len predpokladaná iniciačná havária (prvotný únik paliva a jeho výbuch), výsledky modelovania sa nedajú porovnať so skutočnými následkami. Ako najčastejšie používaný argument pre zdôvodnenie týchto rozdielov sa uvádza veľmi vysoké celkové množstvo pár paliva v medziach výbušnosti (takmer 4,5 t).

Už vonkoncom nie je možné modelovať vplyv synergických efektov – dominoefektov a stochastický charakter samotného vzniku a rozvoja ďalších špecifických havarijných scenárov, ktoré nasledovali po iniciačnom výbuchu. Miera neurčitostí vo vstupoch do takéhoto modelovania je totiž tak vysoká, že výpovedná schopnosť, a tým aj vierohodnosť výsledkov je veľmi nízka a odborne (profesionálne) neakceptovateľná.

Ako najpravdepodobnejší iniciátor prvého najničivejšieho výbuchu sa pôvodne najčastejšie uvádzal box núdzového generátora na južnej strane Northgate building. Na základe zachovalých záznamov CCTV sa ale ukazuje, že potenciálny iniciátor tohto výbuchu mohol sa nachádzať aj v priestore východného priečelia Fuji building, resp. aj inde.

Taktiež sa doteraz nepodarilo objasniť skutočnosť, že odhadovaný dynamický pretlak pri tomto výbuchu sa pohyboval okolo 700 – 1000 kPa, čo je rádovo vyššia hodnota, než k akej sa odborníci dopracovali na základe doteraz známych skutočností, výpočtov a skúseností (predpokladal sa pretlak na úrovni max 50 kPa).

Je zrejmé, že aj na základe najlepších postupov vyšetrovania je dnes už nereálne dopracovať sa k objektívnejším výsledkom, pretože väčšina dôkazového materiálu bola zničená výbuchmi a požiarmi, ale aj represívnymi a záchrannými aktivitami zásahových hasičských jednotiek.

Ukazuje sa, že výpovedná schopnosť akéhokoľvek modelovania takýchto katastrofických havárií je minimálna, aj za predpokladu použitia špičkových softvérových produktov. Z tohto dôvodu je dostupnosť reálnych informácií a výsledkov vyšetrovania tejto udalosti významným prínosom pre celú odbornú i laickú verejnosť.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- [1] The Buncefield Investigation, Progress report, Hertfordshire Oil Storage Terminal, Report, Published 21/02/06
- [2] The Buncefield Investigation, Second progress report, Hertfordshire Oil Storage Terminal, Report, Published 11/04/06
- [3] The Buncefield Investigation, Third progress report, Hertfordshire Oil Storage Terminal, Report, Published 09/05/06
- [4] The Buncefield Major Incident Investigation, Health and Safety Executive, Report, Published 13/06/06

RUSKO, M. – BALOG, K. [Eds.] 2007:

**Manažérstvo životného prostredia 2007 ▼▲▼ Management of Environment '2007
 zo VII. konferencie so zahraničnou účasťou konanej 5. - 6. 1. 2007 v Jaslovských Bohuniach
 Proceedings of the International Conference, Jaslovské Bohunice, 5-6 January 2007
 Žilina: Strix et VeV. Prvé vydanie. ISBN 978-80-89281-18-3.**

-
- [5] The Buncefield Investigation, Buincefield Short report for MARS, Rev. 2, Hertfordshire Oil Storage Terminal, Published 12/05
 - [6] Vyhláška MV SR č. 96/2004 Z.z., ktorou sa ustanovujú zásady protipožiarnej bezpečnosti pri manipulácii a skladovaní horľavých kvapalín, ťažkých vykurovacích olejov a rastlinných a živočíšnych tukov a olejov
 - [7] Vyhláška MV SR č. 94/2004 Z.z., ktorou sa ustanovujú technické požiadavky na protipožiarnu bezpečnosť pri výstavbe a pri užívaní stavieb
 - [8] Zákon MŽP SR č. 261/2002 Z.z. o prevencii závažných priemyselných havárií a o zmene a doplnení niektorých zákonov v platnom znení (zákon č. 277/2005 Z.z.)
 - [9] Vyhláška MŽP SR č. 489/2002 Z.z., ktorou sa vykonávajú niektoré ustanovenia zákona o prevencii závažných priemyselných havárií (novela č. 451/2005 Z.z.)
 - [10] Bezpečnostná správa podniku Slovnaft, a.s., Správa Slovnaft, Bratislava, jún 2005
 - [11] ALOHA User Manual, Det Norske Veritas Ltd., Risk Management Software. Available on-URL: >www.dnv.com/software<

ADRESA AUTORA

Ing. Ján Kandráč, CSc., RISK Consult, Račianska 72, 831 02 Bratislava, Slovenská republika, e-mail: >jan.kandrac@riskconsult.sk<

RECENZENT

prof. Ing. Karol Balog, PhD., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta Trnava, Ústav bezpečnostného a environmentálneho inžinierstva, Botanická 49, 917 01 Trnava, Slovenská republika, e-mail: >karol.balog@stuba.sk<