

ročník 23, číslo 2/2023

SPEKTRUM

vychází 2x ročně

ISSN 1804-1639 (Online)



VŠB TECHNICKÁ
UNIVERZITA
OSTRAVA

FAKULTA
BEZPEČNOSTNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Recenzovaný časopis

**Sdružení požárního a bezpečnostního
inženýrství, z.s.**

a

**Fakulty bezpečnostního inženýrství,
VŠB - Technická univerzita Ostrava**

SPEKTRUM

Recenzovaný časopis
Sdružení požárního a bezpečnostního
inženýrství, z.s. a Fakulty bezpečnostního
inženýrství

*Reviewed journal
of Association of Fire and Safety
Engineering and Faculty of Safety
Engineering*

Vydavatel - *Publisher:*
Sdružení požárního a bezpečnostního
inženýrství, z.s.
17. listopadu 15, 708 00 Ostrava - Poruba

Editor - *Editor:*
doc. Dr. Ing. Michail Šenovský

Redakční rada - *Editorial Board:*
doc. Dr. Ing. Michail Šenovský
(šéfredaktor - *Editor-in-Chief*)
doc. Dr. Ing. Miloš Kvarčák
(zástupce šéfredaktora - *Deputy Editor
-in-Chief*)

prof. Ing. Karol Balog, PhD.
doc. Ing. Ivana Bartlová, CSc.
Dr. Ing. Zdeněk Hanuška
doc. Ing. et Ing. Karel Klouda, CSc., Ph.D., MBA
RNDr. Stanislav Malý, Ph.D., DBA
prof. MUDr. Leoš Navrátil, CSc., MBA, dr. h. c.
doc. Ing. Ivana Tureková, PhD.

Výkonný redaktor - *Responsible Editor*
Ing. Lenka Černá

Všechny uveřejněné příspěvky byly
recenzovány
All published contributions were reviewed

Adresa redakce - *Editorial Office Address:*
SPBI, z.s.
Lumírova 13
700 30 Ostrava - Výškovice
e-mail: spektrum.fbi@vsb.cz

Uzávěrka tohoto čísla - *Current Issue Copy
Deadline:* 30. 10. 2023
Vyšlo: prosinec 2023 - *Issued on December 2023*

Nevyžádané příspěvky nevracíme.
Neoznačené články jsou redakční materiály.
Uveřejněné články nemusí vždy vyjadřovat
názor redakce.
Nebyla provedena jazyková korektura.
*Rejected contributions will not be returned.
Authorless articles are prepared by
the editorial staff.
Published articles need not always express
the opinion of Editorial Board.
No language corrections were made.*

© SPEKTRUM
ISSN 1804-1639 (Online)

VŠB TECHNICKÁ | FAKULTA
UNIVERZITA | BEZPEČNOSTNÍHO
OSTRAVA | INŽENÝRSTVÍ

Fakulta bezpečnostního inženýrství
VŠB - Technická univerzita Ostrava
Faculty of Safety Engineering
VŠB - Technical University of Ostrava



Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, z.s.
Association of Fire and Safety Engineering

Obsah - Contents

Solution of the Fire Hazardous Area of the Building Using Modelling Tools and Calculations	3
Ing. Dorota Hodúlová, doc. Bc. Ing. Stanislava Gašpercová, PhD.	
Solving Spacing Distances of a Selected Object Using a Prescriptive Approach and Modelling Tools	7
Ing. Dorota Hodúlová, doc. Bc. Ing. Stanislava Gašpercová, PhD.	
Záchyt virů pomocí vysoce účinných vzduchových (HEPA) filtrů, potenciál filtrů založených na nanovlákněch zachycovat nanočástice - Viruses in High Efficiency Air (HEPA) Filtration and Nanofiber-Based Nanomaterials Potential for Nanoparticle Filtration	11
MUDr. Daniela Obitková, Ing. Milan Mráz	
Problémy selekcie zdrojov pre kvantitatívne posúdenie rizík podľa CPR štandardov	18
prof. Ing. Milan Oravec, PhD., Ing. Ladislav Čáky	

Solution of the Fire Hazardous Area of the Building Using Modelling Tools and Calculations

Ing. Dorota Hodúlová

doc. Bc. Ing. Stanislava Gašpercová, PhD.

University of Žilina, Faculty of Security Engineering

1. mája 32, Žilina, Slovak Republic

dorota.hodulova@uniza.sk, stanislava.gaspercova@uniza.sk

Abstract

Each part of the fire safety solution for buildings has its justified and irreplaceable importance. Especially nowadays, when new advances in technology make it possible to build new buildings that are not only superior in their design. These buildings are being built ever closer together, affecting their construction in terms of fire safety. The purpose of the use of the buildings, their height, and their distance from other buildings are factors that directly affect them. The article deals with the solution of the fire hazard area of the selected building. This problem is solved in two ways, namely, by a prescriptive approach using STN 92 0201 - 4 and by using the modelling tool PyroSim. Specifically, this paper contains the second part of the problem solution, namely a description of the determination of spacing distances using the PyroSim modelling tool. This article aims to highlight the differences arising in the determination of the spacing distances in the modelling tool for the different methods of modelling the space and determining the spacing distances, and the subsequent comparison with the results from the calculations.

Keywords

Fire hazardous area of buildings, modelling tool, PyroSim, prescriptive approach.

Abstrakt

Každá časť riešenia protipožiarnej bezpečnosti stavieb má svoj opodstatnený a nenahraditeľný význam. Najmä v dnešnej dobe, kedy nový pokrok v technológiách umožňuje výstavbu nových objektov, ktoré sa predchádzajú nie len svojim vyhotovením. Tieto stavby sú stavané čoraz bližšie k sebe, čo ovplyvňuje ich výstavbu aj v rámci protipožiarnej bezpečnosti. Účel užívania stavieb, ich výška, vzdialenosť od iných stavieb sú faktory, ktoré ich priamo ovplyvňujú. Článok sa zaoberá riešením požiarne nebezpečného priestoru vybranej stavby. Táto problematika je riešená dvomi spôsobmi, a to preskriptívnym prístupom pomocou STN 92 0201 - 4 a pomocou modelovacieho nástroja PyroSim. Konkrétne tento článok obsahuje druhú časť riešenia problému a to popis určenia odstupových vzdialeností pomocou modelovacieho nástroja PyroSim. Cieľom tohto článku je poukázať na rozdiely vzniknuté pri určovaní odstupových vzdialeností v modelovacom nástroji pri rôznych spôsoboch modelovania priestoru a určovania odstupových vzdialeností, a následné porovnanie s výsledkami z výpočtov.

Kľúčové slová

Požiarne nebezpečný priestor stavieb, modelovací nástroj, PyroSim, preskriptívny prístup.

Introduction

Building fire safety is the ability of structures to resist and prevent damage to health and loss of life to people, animals and property in the event of fire. To be able to implement the construction, it is necessary that all the requirements for fire

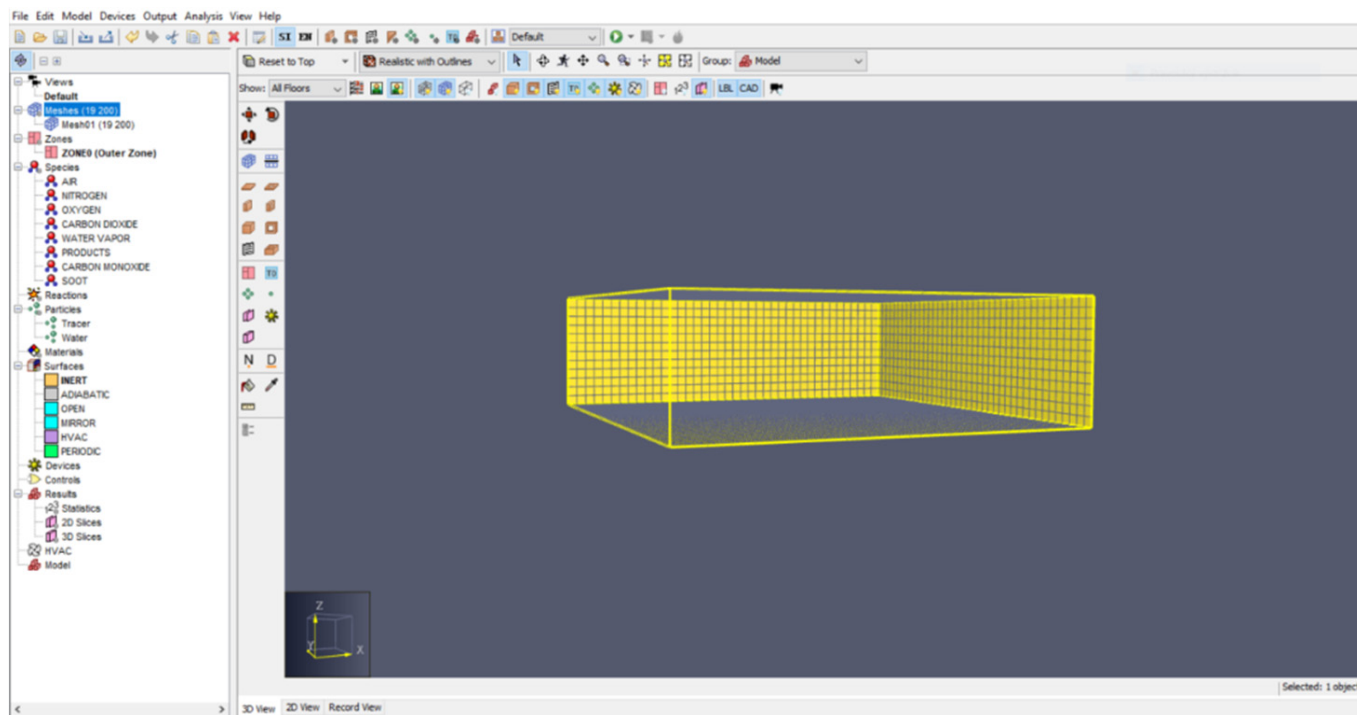


Fig. 1 PyroSim programme

safety of the construction, which are specified in the design, documentation, and fire safety of the construction, are met. To analyse the issue of fire safety solutions for buildings in Slovakia, generally applicable legislation and Slovak technical standards (hereinafter referred to as "STN") are used. STNs are not legally binding, but their wording is mandatory if an implementing regulation refers to STNs. [1, 2]

There is currently no way to 100% predict fire behaviour and its effects on buildings, but it is possible to estimate them using available tools. Such tools include fire models. Fire models are a technology that allows the simulation of fires, especially in confined spaces. Thanks to this technology, we can predict the behaviour and progression of fires, thereby effectively combating their occurrence and thereby eliminating property damage and, in particular, protecting the lives and health of the occupants of these structures. However, the implementation of fire models in practice is still unknown from the point of view of fire safety solutions for buildings, and for their application, it is sufficient to establish boundary conditions in individual areas of fire safety solutions for buildings under which they would give similar results as the prescriptive approach.

This paper aims to determine the spacing distances for a selected fire compartment of a flat using the PyroSim modelling tool, highlight the differences arising in the determination of spacing distances for different methods of modelling the selected compartment, and then compare them with the results from simulations.

Methodology

Fire models are designed fires based on a limited area of application of specific physical parameters, which are used for designing fire safety of buildings, assessing the possibility of evacuation of objects, creating designs of devices for the removal of heat and combustion products, investigating the causes of fires and its course [3].

PyroSim is a graphical user interface for the FDS, which is integrated into PyroSim together with the Smokeview visualization program. This system provides immediate input feedback and the correct format for the FDS. PyroSim offers geometry generation functions in 2D and 3D views. Within the geometry, it is possible to create objects, group them, replicate them or display them flexibly. PyroSim allows you to import and export FDS files, which checks the accuracy of the data. PyroSim also allows you to import some types of AutoCAD file formats, within which individual program geometries are represented as guidelines or obstacles. A view of the PyroSim program can be found in Fig. 1 [4].

The basis of space modelling in PyroSim is the creation of a Computational Mesh. A computational mesh consists of computational cells, in which we define the dimension of Heat transfer, fire and combustion products calculations are performed individually in these cells and simultaneously in the whole computational mesh at the same time to obtain the most accurate results and visualizations [4].

To create the space, the Materials that will be used in its creation must first be defined. PyroSim offers the possibility to create a solid material or a liquid fuel. When defining a solid material it is necessary to know its Density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), Specific Heat ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), Conductivity ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), Emissivity (-) and Absorption Coefficient (m^{-1}). Based on the definition of the materials, Surfaces can be created, which are assigned to individual structures in the building. Surfaces are assigned to individual objects that are created in the program or to parts of the Computational Mesh. Surfaces assign properties to objects that make them capable of, for example, absorbing heat. For Computational Grids, Surfaces can change their properties to one of the objects or to an external space where combustion products can escape during a fire. Using

Surfaces, fires can also be defined in PyroSim. Specifically, by using the Surface Burner, the program defines the Heat Release Rate per unit area to determine the fire at the selected location. Objects of the fire area, such as walls, furniture, and objects, are defined using Obstructions. In PyroSim, it is possible to create block objects, so it is necessary to imagine a complex object as a union of several blocks. An example of creating such an object using blocks is shown in Fig. 2. Holes, which are used to create openings in structures to replace windows or doors, also count as objects. Furthermore, Devices (Devices) can be created in PyroSim, which are used to measure arbitrary fire parameters such as temperature, time, heat release rate, etc. [4].

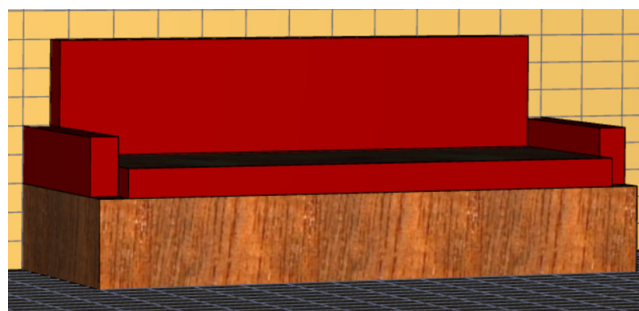


Fig. 2 Example of an object in the fire area made of blocks

In PyroSim it is also possible to measure distances. These are measured using a Plane (Slice), which is placed horizontally on one of the x, y or z axis. Next, the quantity to be measured is determined, i.e. the Heat Flux Density, whose critical value for measuring the fire hazardous area is $18.5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. An example of the creation of the Plane and the measurement of the spacing distance is shown in Fig. 3 [4].

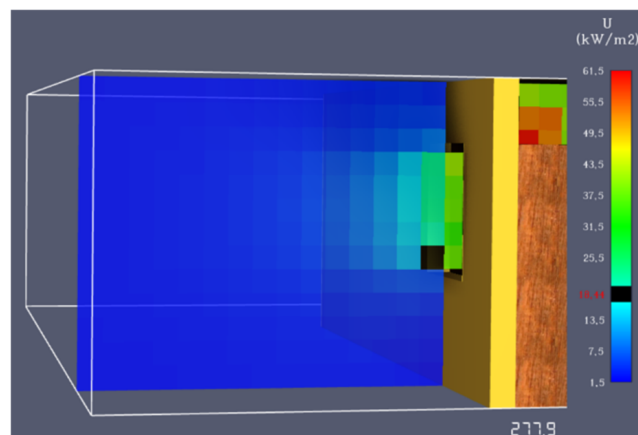


Fig. 3 Distance measurement using the Plane

Solving spacing distances in PyroSim

The selected area for the detection and comparison of spacing distances was the fire compartment of the flat. The apartment consisted of a living room connected to the kitchen and dining room, a bedroom, a bathroom with a toilet, a storage room and a corridor. The apartment had 3 windows, one located in the bedroom, and the other two in the living room with the kitchen. Fig. 4 shows the floor plan of the apartment with the elevations important for the correct determination of the setback distances using calculations and simulations.

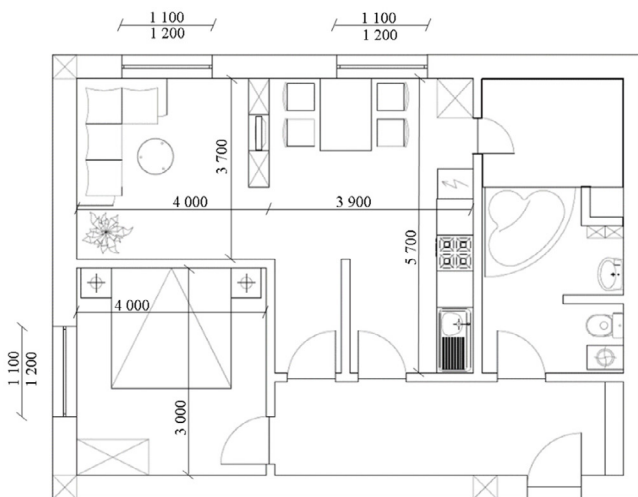


Fig. 4 Floor plan of the apartment

In PyroSim, spacing distances were handled in two ways. The first way was to model the entire flat in PyroSim, define the fires and then track the spacing distances. The second method was simplified since the apartment fire was assigned to a small area that burned and then the spacing distances were tracked.

Spacing distances by modelling the entire apartment

Within this method, a computational mesh with dimensions of 10 x 13 x 2.5 m was first modelled. The cells of the computational grid were set to a size of 0.25 x 0.25 x 0.25 m. Subsequently, 5 materials were created, which are listed in Tab. 1 along with their properties. These materials were selected from the available PyroSim database.

Tab. 1 Materials and their properties

Material	Density (kg.m ⁻³)	Specific Heat (kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Conductivity (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Emissivity (-)	Absorption coefficient (m ⁻¹)
Concrete	2 280	1,04	1,8	0,9	0,0005
Foam	28	1,7	0,05	0,9	0,0005
Plastic	1 380	1	0,1	0,95	0,0005
Wood	450	1	0,1	0,9	0,0005
Fabric	100	1	0,1	0,9	0,0005

Subsequently, these materials were used to create the surfaces described in Tab. 2.

Tab. 2 Surfaces and their description

Surface	Thickness (m)	Composition	Pattern
Wall	0,1	Concrete 100%	
Furniture	0,1	Wood 100%	
Seating part	0,1	Foam 90%	
		Fabric 10%	
Carpet	0,01	Fabric 100%	
TV	0,1	Plastic 100%	

The fire area was then created, individual rooms with the same dimensions as those used in the calculation of the spacing distances in the calculations according to the standard. Also, the bedroom

and living room rooms were furnished as they contained the most combustible materials. A bed, two bedside tables and a wardrobe were created in the bedroom area. In the living room, a sofa, coffee table, cabinets, television and carpet were created. The furnishings for these two rooms were selected based on the floor plan and the defined fire, which will be described below. The modelled space of the living room is shown in Fig. 5 and the bedroom in Fig. 6.

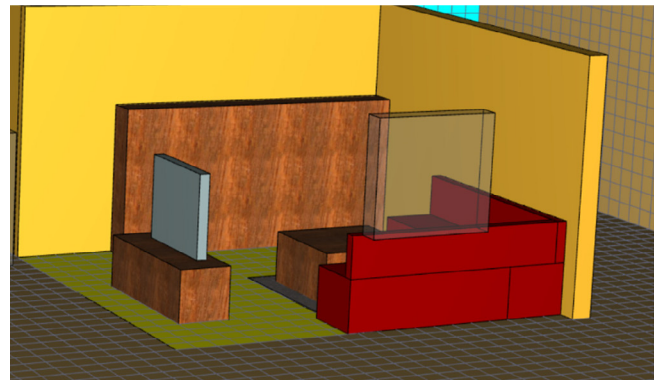


Fig. 5 Living room space in PyroSim

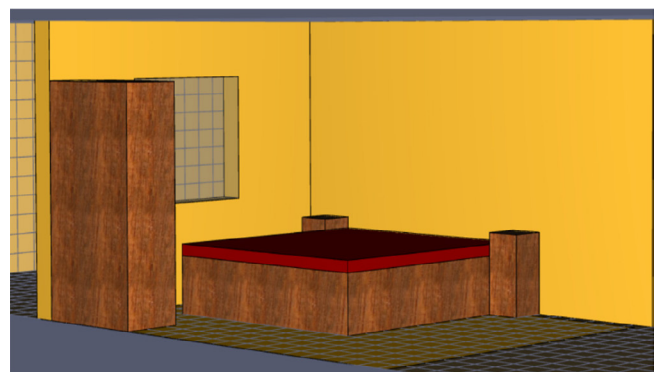


Fig. 6 Bedroom space in PyroSim

The next step was to define the fire. The fire was created using the Burner surface, which was defined using the values of the heat release rate over time. The individual values of heat release rates over time were selected from the Catalogue of Heat Release Rates, which comes from the Czech Technical University in Prague [5]. The living room and bedroom fires were selected from the fire catalogue. In the living room, there should have been a sofa, cabinets, a coffee table, a television and a carpet. In the bedroom, it was to be a bed, two bedside tables and a wardrobe. The apartment was also furnished in the simulation based on these furnishings. As the fires covered the whole room, the fires were assigned to the floor of the room. The heat release rates for each room can be found in Appendix A. Next, Plans were created that were used to measure spacing distances. Three planes were created, each plane was drawn through the centre of the window in the vertical direction. The planes were set up to measure the Heat Flux Density parameter. The last step was to set the simulation parameters, which remained at the default values of the program. The simulation length was set to 767 s. Since the living room fire lasted 767 s and the bedroom fire lasted only 43 s, the simulation length was set according to the living room fire.

Spacing distances in a simplified way

In a simplified way, two simulations were created in PyroSim. One simulation focused on the fire separation distance for a bedroom fire, the other for a living room fire, thus the fire separation distances were considered separately for each room. Computational grids were first created in PyroSim. The computational grids

had dimensions of 20 x 5 x 5 m. The sizes of the computational cells were set to 0.1 x 0.1 x 0.1 m, so they were smaller than in the first simulation, these simulations were simpler and because of the greater accuracy of the calculations, this was more appropriate. The next step was to create the Fire Surface. In each simulation, one surface was created to represent the living room or bedroom fire. The fires were defined based on the Heat Release Rates over time in Appendix A. An Opening was then created and assigned a fire surface fill. This opening had the same dimensions as the windows in the original design. The opening was placed in the centre of the wall with dimensions of 5 x 5 m. Subsequently, Planes were created to measure the spacing distances with the recording of the Heat Flux Density parameter. The planes were drawn through the centre of the windows in a vertical direction. Subsequently, the parameters of the fire area were set, which remained at the predefined values of the program. The simulation length for the living room fire was 45 s, and the simulation length for the bedroom fire was 767 s. Fig. 7 shows the simulation space of the living room fire in a simplified manner.

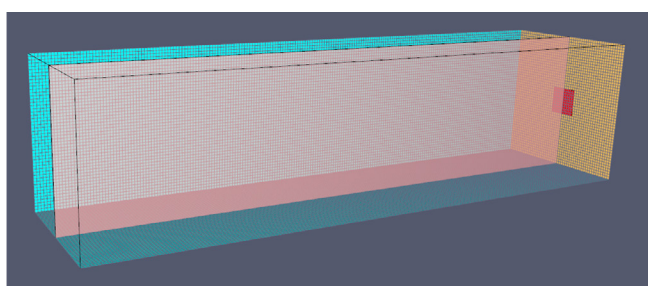


Fig. 7 Living room fire simulation space in a simplified way

Results and Conclusion

Based on individual calculations and simulations, the results of spacing distances for the fire section of the apartment, specifically for its 3 windows, were obtained. The spacing distances according to STN 92 0201 - 4 were obtained by calculation. The spacing distances from PyroSim had to be obtained by subtracting the spacing distance from the graphical results of the simulations. A description of the calculations according to STN 92 0201 - 4 is not the subject of this article, but the individual results are given in the article. The values of the spacing distances from the calculations and the simulations can be found in Tab. 3.

Tab. 3 Values of separation distances

		Room	Separation distances (m)	
Simulations	Simplified method	Living room	2,1	
		Bedroom	1,5	
	Simulation of the entire flat	Living room	0,3	
		Bedroom	0,3	
Calculations	According to Tab. 3	Tight window borders	Living room	4,4
			Bedroom	4,7
		Height h_u is the height of the space	Living room	1,1
			Bedroom	3,4
	According to Tab. 6	Tight window borders	Living room	4,5
			Bedroom	5,9
		Height h_u is the height of the space	Living room	0,8
			Bedroom	4

As can be seen, the results for the spacing distances in the whole flat simulation are very small, while in the simplified method they are several times larger. This fact was because, in the simulation of the whole apartment, the fire was determined by the floor of the apartment, thus the heat itself and the observed heat flux density parameter did not have sufficient intensity to get through the window out of the room, the fire compartment. In the simplified method, the fire was assigned to the window itself, hence the observed heat flux density parameter radiated directly to the outside environment and therefore the spacing distance recorded was greater. In the simulations, it would be more appropriate to use the simplified method of simulating the spacing distances, as the time spent on simulating the fire area is saved, but the spacing distances come out larger, hence they are on the safety side.

When solving spacing distances using calculations according to STN 92 0201 - 4, it can be seen that the greater the proportion of fire open areas to the area of the perimeter wall, the greater the spacing distance. Therefore, it is on the side of safety that the area of the perimeter structure in which the fire open areas are located should be as small as possible, so the proportion will be the largest and therefore the spacing distance will also be larger. There is also a noticeable difference between the determination of the spacing distance according to Tab. 3 and Tab. 6. The values of the setback distances come out about the same, sometimes the value is higher according to Tab. 3 and sometimes according to Tab. 6, but Tab. 6 should be used as it is intended for this purpose.

By comparing the results of the individual calculations and simulations, it can be seen that there is an agreement between the results of the spacing distances, and it is, therefore, possible to implement fire engineering into the determination of building spacing distances but to do this it is necessary to create a larger number of simulations and calculations on different types of buildings, which will be the subject of a solution in further research.

References

- [1] Anonym, 2023.: *Na čo slúži projekt PBS* [online]. [cit. 2023-06-23]. Dostupné z: <https://projektpbs.sk/co-je-projekt-pbs/>.
- [2] Zákon NR SR č. 314/2001 Z. z. o ochrane pred požiarmi.
- [3] KAČÍKOVÁ, D., 2013.: *Dynamika požiaru* [online]. [cit. 2023-06-24]. Dostupné z: http://www.gitech.sk/fire/images/dokumenty/Dynamika_poziaru.pdf.
- [4] Anonym, 2014.: *PyroSim User Manual* [online]. [cit. 2023-06-19]. Dostupné z: <https://www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/downloads/2014/02/PyroSimManual.pdf>.
- [5] WALD, F. a ed., 2017.: *Modelování dynamiky požáru v budovách*. Praha: České vysoké učení technické v Praze. 2017. ISBN 978-80-01-05633-2.

Solving Spacing Distances of a Selected Object Using a Prescriptive Approach and Modelling Tools

Ing. Dorota Hodúlová

doc. Bc. Ing. Stanislava Gašpercová, PhD.

University of Žilina, Faculty of Security Engineering

1.mája 32, Žilina, Slovak Republic

dorota.hodulova@uniza.sk, stanislava.gaspercova@uniza.sk

Abstract

The article deals with the solution of a selected part of the fire safety of buildings, namely spacing distances, in a selected fire section of a flat. This problem is solved in two ways, namely by a prescriptive approach using STN 92 0201 - 4 and by using the modelling tool PyroSim. Specifically, this paper contains the first part of the solution to the problem, namely a description of the calculation of spacing distances using the prescriptive approach. This article aims to highlight the differences that arise in the determination of spacing distances when some input data are changed and to compare them with the results of simulations.

Keywords

Spacing distance, prescriptive access, PyroSim.

Abstrakt

Článok sa zaoberá riešením vybranej časti požiarnej bezpečnosti stavieb, a to odstupovými vzdialenosťami, vo vybranom požiarnej úseku bytu. Tento problém je riešený dvoma spôsobmi, a to preskriptívnym prístupom s využitím STN 92 0201 - 4 a pomocou modelovacieho nástroja PyroSim. Konkrétne tento článok obsahuje prvú časť riešenia problému, a to opis výpočtu odstupových vzdialeností pomocou preskriptívneho prístupu. Cieľom tohto článku je poukázať na rozdiely, ktoré vznikajú pri určovaní odstupových vzdialeností pri zmene niektorých vstupných údajov a ich porovnanie s výsledkami so simuláciami.

Kľúčové slová

Odstupová vzdialenosť, preskriptívny prístup, PyroSim.

Introduction

Building fire safety is the ability of structures to resist and prevent damage to health and loss of life to people, animals and property in the event of fire. The fire safety of a building must be addressed and observed by any natural person, natural person - entrepreneur or legal entity that changes the purpose of the building, reconstructs the building or is about to build it. To be able to carry out the construction, it is necessary that all the requirements for fire safety of the construction, which are specified in the project, and project documentation, fire safety of the construction, are fulfilled [1, 2].

The basic legal provisions for project development are [2 - 5]:

- Act of the National Assembly of the Slovak Republic No. 314/2001 Coll. on Fire Protection as amended.
- Decree of the Ministry of the Interior of the Slovak Republic No 121/2002 Coll. on fire prevention.
- Decree of the Ministry of the Interior of the Slovak Republic No. 94/2004 Coll. laying down technical requirements for fire safety in the construction and use of buildings.
- Decree of the Ministry of the Interior of the Slovak Republic No. 699/2001 Coll. On the provision of water for extinguishing fires in buildings.

Fire safety of buildings in Slovakia is addressed by Slovak Technical Standards (hereinafter referred to as "STN") [6 - 12]:

- STN 92 0201 - 1 to 4 Fire safety of buildings.
- STN 92 0400 Water supply for fire fighting.
- STN 92 0202 - 1 Equipment of buildings with fire extinguishers.
- STN 92 0241 Occupancy of buildings.
- Other STNs which result from the design of specific buildings and which are referred to in the individual standards.

This article aims to determine the spacing distances for a selected fire compartment of a flat by calculation according to STN 92 0201 - 4 and to point out the differences arising in determining the spacing distances when changing some input data and the subsequent comparison with the results from simulations.

Separation distances

The spacing distance is the space around a structure in which a fire can be transmitted by radiant heat or falling parts of a burning structure. Clearances must be maintained to prevent fire transfer from one structure to another. The spacing distances in Slovakia are based on STN 92 0201 - 4 Spacing distances [9]. The most common calculation of the fire hazardous area in a building is the distance from fully fire-open surfaces, such as windows of the building [9].

The spacing distance of the fully fire-open area of a fire compartment shall be determined according to equation (1) [9]:

$$p_o = \frac{S_{po}}{S_p} \cdot 100 \leq 100 \quad (1)$$

Where:

- p_o the ratio of the fire open area to the wall area in %
- S_{po} the size of the fire open areas in m^2
- S_p the area of the perimeter wall in which there are fire open areas in m^2

If the fire openings are not distributed over the whole area of the perimeter wall, this area shall be selected as small as possible with a length of l_1 (m) and height of h_1 (m), in which all fire open areas lie. The determination of S_{po} and S_p is shown in Fig. 1.

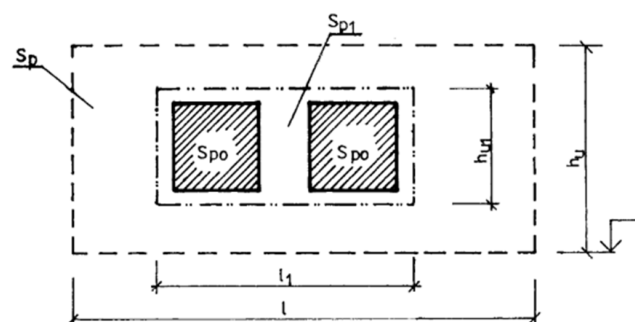


Fig. 1 Determination S_{po} a S_p [9]

After obtaining the proportion of fire open areas to the area of the perimeter wall, the spacing distance d is determined according to STN 92 0201 - 4 and selected tables depending on the type of building and fire section [9].

The fire hazard area is bounded by an area parallel to the fire open area of the fire compartment. The fire hazard area in front of the fire open area of the fire compartment shall be bounded on the sides by an oval area of the same radius as the spacing distance. The axes of the fire hazard area shall be identical to the boundaries of the fire open area and to the planes which start from the boundaries of the fire open area and make an angle of 160° with it. In height, the fire danger zone of the fire compartment shall be determined in a similar way to the sides. The determination of the fire danger zone laterally and in height is shown in Fig. 2 [9].

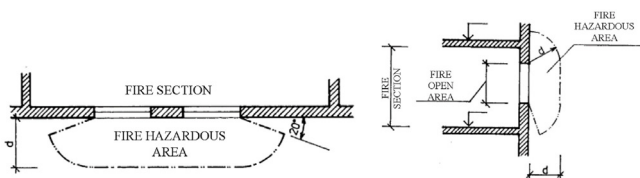


Fig. 2 Fire hazard area on the sides (left) and in height (right) [9]

Material and Methods

Selected fire section of the flat

The selected area for the detection and comparison of spacing distances was the fire compartment of the dwelling. The apartment consisted of a living room connected to the kitchen and dining room, a bedroom, a bathroom with a toilet, a storage room and a corridor. The apartment had 3 windows, one located in the bedroom, and the other two in the living room with the kitchen. The height of the apartment space is 2.5 m. Fig. 3 shows the floor plan of the apartment with the marked coordinates important for the calculation of the spacing distances.

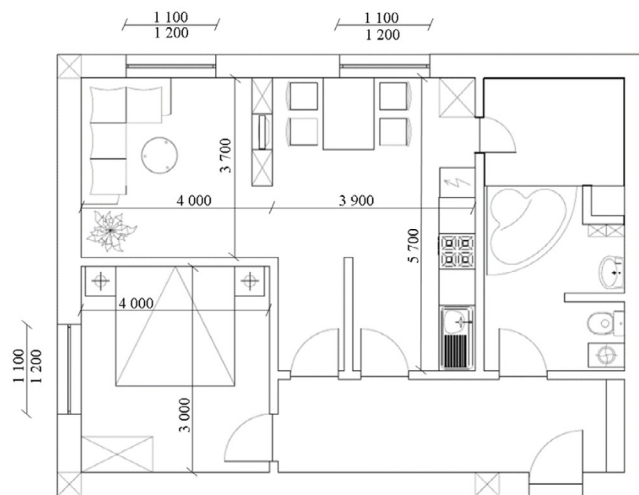


Fig. 3 Floor plan of the flat

Solution of separation distances according to STN 92 0201

The distance of the fire hazard area is calculated based on the ratio of the fire open area to the area of the perimeter wall in % according to formula (1). When calculating the size of the fire open areas, there is only one way to find it, namely by adding the areas of the openings. When determining the area of a perimeter wall in which there are fire openings, there are several ways that affect the resulting value of the proportion of fire openings to the wall area. This depends on how many windows are on the external wall and how they are positioned. The following section of the article will demonstrate the possible ways of calculating the spacing distances.

According to STN 92 0201 - 4, the spacing distances of dwellings are further determined based on Table 3 and Table 6. Table 3 is used to determine the separation distances in general, so it can also be applied to fire compartments of dwellings. Table 6 is for the fire separation distances of the fire compartments that make up the habitable cells in a residential building [9].

Living room and kitchen distances

Calculations of S_{po} :

$$S_{po} = 2 \cdot (1,2 \cdot 1,1)$$

$$S_{po} = 2,64 \text{ m}^2$$

The area of the envelope is calculated as the tight confinement of the windows.

Calculations of S_p :

$$S_{p1} = 5,8 \cdot 1,1$$

$$S_{p1} = 6,38 \text{ m}^2$$

The area of the envelope was calculated from the length that closely encloses the windows and from a height equal to the height of the space.

Calculations of S_p :

$$S_{p2} = 5,8 \cdot 2,5$$

$$S_{p2} = 14,5 \text{ m}^2$$

Based on the obtained intermediate calculations it was possible to determine two values of the ratio of the fire open area to the area of the perimeter wall.

$$p_{o1} = 0,37 = 41,37 \%$$

$$p_{o2} = 0,182 = 18,2 \%$$

The values of the ratio of the fire open area to the area of the perimeter wall were entered into Tables 3 and 6, from which the spacing distances were subtracted.

According to Table 3, these values were inserted into the first part of the table, which deals with the values of the separation distances at the height of the perimeter wall h_u up to 3 m. In both cases, the length of the perimeter wall was the same, namely 5,8 m, so the values from the table were taken from the part of the table where the value of l_u was up to 9 m. Within the part of the proportion of fire open areas to the perimeter wall area, a value of up to 60% was taken for the first calculation, and up to 20% for the second calculation. As the dwelling as a fire compartment is treated as a non-productive building within the fire safety framework, the calculated fire load of this fire compartment p_v had to be determined. This value can be determined either by calculation according to STN 92 0201 - 1 or by a simplified method of reading the p_v value from this standard, namely from Annex K, Tab. K1, in which the values of the calculated fire load were determined based on Item 16 - Flats, apartment buildings, family houses, retirement homes, including accessories. Based on this item, the p_v value was set at $50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$. Subsequently, the values of the spacing distances were determined:

$$d_{11} = 4,4 \text{ m}$$

$$d_{21} = 1,1 \text{ m}$$

According to Table 6, the spacing distance is determined by the value of the proportion of the fire-open area to the area of the perimeter wall and by the length of the fire compartment. The length of the fire compartment in this case is 10 m, so a value of up to 15 m was taken from the table. From the ratio of open fire

areas to the area of the perimeter wall, values of up to 20% and up to 60% were taken. The values of the separation distances were then determined:

$$d_{12} = 4,5 \text{ m}$$

$$d_{22} = 0,8 \text{ m}$$

Bedroom spacing distances

The same approach was followed for the bedroom as for the living room/kitchen setbacks.

Calculations of S_{po} :

$$S_{po} = 1,2 \cdot 1,1$$

$$S_{po} = 1,32 \text{ m}^2$$

The area of the envelope is calculated as the tight confinement of the windows.

Calculations of S_p :

$$S_{p3} = 1,2 \cdot 1,1$$

$$S_{p3} = 1,32 \text{ m}^2$$

The area of the envelope was calculated from the length that closely encloses the windows and from a height equal to the height of the space.

Calculations of S_p :

$$S_{p4} = 1,2 \cdot 2,5$$

$$S_{p4} = 3 \text{ m}^2$$

Based on the obtained intermediate calculations it was possible to determine two values of the ratio of the fire open area to the area of the perimeter wall.

$$p_{o3} = 1 = 100\%$$

$$p_{o4} = 0,44 = 44\%$$

According to Table 3, its first part, which deals with the values of the separation distances at the height of the perimeter wall h_u up to 3 m, the separation distance according to the length of the perimeter wall was determined to be 1,2 m, thus taking the value h_u up to 4,5 m. Within the part of the proportion of fire open areas to the area of the perimeter wall, the value up to 100% was taken for the first calculation, and up to 60% in the second calculation. As in the previous section, the value of the design fire load was taken from the standard, p_v at 50 kg.m². The values of the spacing distances were then determined:

$$d_{31} = 4,7 \text{ m}$$

$$d_{41} = 3,4 \text{ m}$$

According to Table 6, the spacing distance was determined by the length of the fire section of 7 m, so the value up to 9 m was taken from the table. From the ratio of the fire open areas to the area of the perimeter wall, values up to 100% and up to 60% were taken. The values of the spacing distances were then determined:

$$d_{32} = 5,9 \text{ m}$$

$$d_{42} = 4 \text{ m}$$

Results and Conclusion

Based on individual calculations and simulations, the results of spacing distances for the fire section of the apartment, specifically for its 3 windows, were obtained. The spacing distances according to STN 92 0201 - 4 were obtained by calculation. The spacing

distances from PyroSim had to be obtained by subtracting the spacing distance from the graphical results of the simulations. The description of the creation of the simulations is not the subject of this article, but their results are presented in the article. The values of the spacing distances from the calculations and the simulations are given in Table 1.

Tab. 1 Values of separation distances

Room		Separation distances (m)		
Simulations	Simplified method	Living room	2,1	
		Bedroom	1,5	
	Simulation of the entire flat	Living room	0,3	
		Bedroom	0,3	
Calculations	According to Tab. 3	Tight window borders	Living room	4,4
		Height h_u is the height of the space	Bedroom	4,7
	According to Tab. 6	Tight window borders	Living room	1,1
			Bedroom	3,4
		Height h_u is the height of the space	Living room	4,5
			Bedroom	5,9
			Living room	0,8
			Bedroom	4

As can be seen, the results for the spacing distances in the whole flat simulation are very small, while in the simplified method they are several times larger. This fact was because, in the simulation of the whole apartment, the fire was determined by the floor of the apartment, thus the heat itself and the observed heat flux density parameter did not have sufficient intensity to get through the window out of the room, the fire compartment. In the simplified method, the fire was assigned to the window itself, hence the observed heat flux density parameter radiated directly to the outside environment and therefore the spacing distance recorded was greater. In the simulations, it would be more appropriate to use the simplified method of simulating the spacing distances, as the time spent on simulating the fire area is saved, but the spacing distances come out larger, hence they are on the side of safety.

When solving spacing distances using calculations according to STN 92 0201 - 4, it can be seen that the greater the proportion of fire open areas to the area of the perimeter wall, the greater the spacing distance. Therefore, it is on the side of safety that the area of the perimeter structure in which the fire open areas are located should be as small as possible, so the proportion will be the largest and therefore the spacing distance will also be larger. There is also a noticeable difference between the determination of the spacing distance according to Table 3 and Table 6. The setback distance values come out about the same, sometimes the value is higher according to Table 3 and sometimes according to Table 6, but Table 6 should be used since it is designed for that purpose.

By comparing the results of the different calculations and simulations, it can be seen that there is a good agreement between the results of the setback distances and thus it is possible to implement fire engineering in the determination of the setback distances of buildings, but for this, it is necessary to create a larger number of simulations and calculations on different types of buildings, which will be addressed in further research.

References

- [1] *Na čo slúži projekt PBS*. 2023. [online]. Projekt PBS, s. r. o. [cit. 2023-06-23]. Available at: <https://projektpbs.sk/co-je-projekt-pbs/>.
- [2] Zákon NR SR č. 314/2001 Z. z. o ochrane pred požiarmi.
- [3] Vyhláška MV SR č. 121/2002 Z. z. o požiarnej prevencii.
- [4] Vyhláška MV SR č. 94/2004 Z. z. ktorou sa ustanovujú technické požiadavky na protipožiarnu bezpečnosť pri výstavbe a pri užívaní stavieb.
- [5] Vyhláška MV SR č. 699/2001 Z. z. o zabezpečení stavieb vodou na hasenie požiarov.
- [6] STN 92 0201 - 1: 2000, Požiarna bezpečnosť stavieb - Požiarne riziko, veľkosť požiarneho úseku.
- [7] STN 92 0201 - 2: 2017, Požiarna bezpečnosť stavieb - Stavebné konštrukcie.
- [8] STN 92 0201 - 3: 2000, Požiarna bezpečnosť stavieb - Únikové cesty a evakuácia osôb.
- [9] STN 92 0201 - 4: 2000, Požiarna bezpečnosť stavieb - Odstupové vzdialenosti.

Záchyt virů pomocí vysoce účinných vzduchových (HEPA) filtrů, potenciál filtrů založených na nanovláčkách zachycovat nanočástice

Viruses in High Efficiency Air (HEPA) Filtration and Nanofiber-Based Nanomaterials Potential for Nanoparticle Filtration

MUDr. Daniela Obítková

Ing. Milan Mráz

Czech Technical University in Prague, Faculty of Biomedical Engineering

Náměstí Sítná 3105, Kladno

daniela.obitkova@fbmi.cvut.cz, milan.mraz@fbmi.cvut.cz

Abstract

Currently, the rising demands on air filtration and safety of indoor air is documented. High Efficiency Particle Air (HEPA filters) with their 99.97% effectiveness in 0.3 μm particle size removal are widely used for indoor air quality maintenance. Recently nanofiber nonwoven materials are studied profoundly. Nanofiber-based air filters show several unique characteristics as high surface area, low pressure drop and high effectiveness of nanoparticles removal. The main aim of this paper is to discuss whether the nanofibers could be profitable in microorganism removal. Could nanofiber-based air filters replace the conventional HEPA filters? Could combination of conventional HEPA filters with nanofibers materials enhance the air filtration to remove more submicron particles?

Keywords

Air filtration, bacteria, high efficiency air filters (HEPA), nanofiber-based nanomaterials, virus.

Abstract

K udržení vysokého standardu čistoty vzduchu jsou nejvíce používány vysoce účinné vzduchové (High Efficiency Particle Air - HEPA) filtry, které vykazují účinnost 99,97 % v záchytu částic o velikosti 0,3 μm . Velká pozornost je též směřována k netkaným nano-vláčkovým textiliím a materiálům. Vzduchové filtry založené na nanovláčkách mají některé unikátní vlastnosti jako velký povrch materiálu, nízký spád tlaku ve filtračním zařízení a v neposlední řadě vysoká účinnost v záchytu částic s rozměry v nanometrech. Hlavním cílem práce je shrnout fakta, zda vzduchové filtry založené na nanovláčkách mohou být výhodné pro filtraci a záchyt mikroorganismů. Mohou nano-vláčkové filtry nahradit konvenční HEPA filtry? Může kombinace HEPA filtru s nano-vláčkovým filtrem zvýšit výkon takové soustavy v záchytu nanočástic?

Klíčová slova

Filtrace vzduchu, bakterie, vysoce účinné vzduchové filtry (HEPA), nano-vláčkové materiály, viry.

Introduction

The evolution of air quality requirements is a dynamic process (Shah, 2021). Understanding the best ways of air filtration can significantly contribute to the enhancement of indoor air quality and resulting improvement of public health with consequences to population protection. Our research team focuses on demonstrating microbial contamination of air filters installed in various air conditioning systems and portable air purifiers and evaluation of

their role in air borne pathogens spread. Currently we would like to discuss filtration mechanisms of high efficiency particle air filters (HEPA) considering microorganism penetration. If the conventional HEPA filters cannot eliminate microorganisms sufficiently, do the novel technologies based on nanofibers offer powerful option for air filtration enhancement?

Air filter and filtration mechanisms notes

Currently many of air conditioning systems, portable air purifiers, automotive air conditioners, commercial aircraft and other means of transport air conditioning systems use HEPA filters. Air filters (including HEPA filters) are usually made of patented filtration media. These media are based on materials containing fibers arranged perpendicularly to the air flow. Fibers are made of fiberglass, expanded polytetrafluoroethylene (PTFE) (Perry, 2016), (Shim, 2021). Micron-grade filter materials can consist of polypropylene (PP) or polyester as well. The main advantages of such filters are represented by high filtration efficiency and charge-based particle collection mechanism (Zhang, 2018). Currently modern materials as polylactic acid (PLA) fibers are investigated (Wang, 2015), (Zhang, 2019). The other biodegradable materials for air filtration as cellulose could be interesting and are also in the center of attention (Lippi, 2022). The filtration media are usually pleated within a framework containing some support elements or may be support-free. HEPA filters are comparably well defined in Europe and in the USA. As defined by the Institute of Environmental Sciences and Technology (IEST, USA) according to standards for air filters efficiency evaluation and testing (IEST-RP-CC001.3 and MIL-STD-282), HEPA filters must capture a minimum of 99.97% of particles at 0.3 micrometers in size. In Europe EN 1822:2019 is binding. It defines HEPA filter as 99.995% minimum capture of particles at 0.3 micrometers in size (EN ISO 1822-1 High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA) - Part 1: Classification, performance testing, marking, 2019). Particles of this size are the most difficult to capture and thus are considered the most penetrating particle size (MPPS). The theory of MMPs is applicable under the conditions when the air flow velocity is low to moderate. At high filtration velocities, the most penetrating particle size may become substantially smaller than 0.3 μm (Lee, 1980). Particles that are larger or smaller are filtered with even higher efficiency (Monto, 2002), (Xu, 2014).

Theoretical explanation of particles behavior is dependent on particle-fiber interaction within the filtration fibrous material. The fiber arrangement in the HEPA filters enable several models of filtration mechanism - diffusion based on the Brownian movement of molecules, internal impaction, direct interception, and sieving (Mohammed, 2022), (Wines, 2022). Inertial impaction is based on inertia which works on large, heavy particles suspended in the flow stream. These particles are heavier than the air flow surrounding them. As the fluid changes direction to enter the fiber space, the particle continues in a straight line and collides with the media fibers where it is trapped and held. Direct interception works on particles in the mid-range size that are not quite large enough to have inertia and not small enough to diffuse within the flow stream.

These mid-sized particles follow the flow stream as it bends through the fiber spaces. Particles are intercepted or captured when they touch a fiber. Sieving occurs when the particle is too large to fit between the fiber spaces (Hinds, 2021), (Boudina, 2020). Diffusion is the dominant collection mechanisms for particles smaller than 0.2 μm , interception works on particles up to 0.6 μm . Particles of around 1 μm or greater may be effectively removed by inertial impaction (Tcharkhtchi, 2021). The mechanisms of air filtration in fiber-based filtration medium is shown in the figure 1.

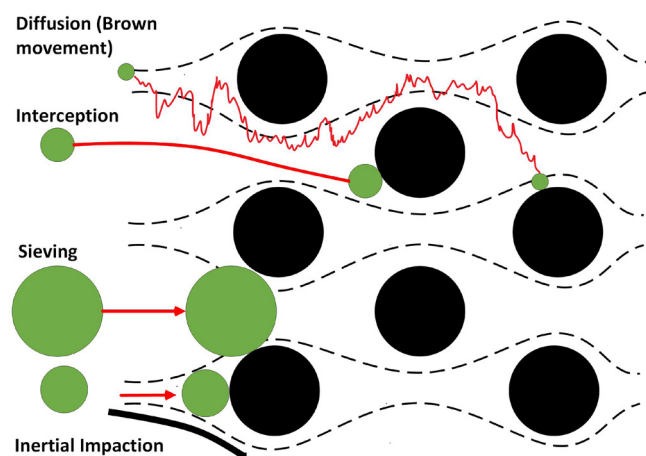


Figure 1 Mechanisms of filtration in fiber-based air filter. The figure represents a cross section of a fiber-based filtration medium. The interrupted black line suggests the direction of air flow. The black circles are the cross section of fibers of the filtration medium. The green objects show filtered particles. The red lines or arrows demonstrate the direction of filtered particles. (Daniela Obítková 2023)

Microorganisms in air filtration

HEPA filters are widely used in heating ventilation air conditioning systems or portable air purifiers in different types of buildings including offices, hospitals, or shopping centers. The means of transport as cars trains or buses and trams serving for public transport are equipped with HEPA filtered air conditioning systems as well. Liu et al. reviewed the effectiveness of HEPA filters in portable air purifiers in elimination of SARS CoV-2. Their results showed that the HEPA filters eliminate the virus sufficiently (Liu, 2022). Other studies dealing with HEPA filters in portable air purifiers reported good elimination of *Aspergillus* and significant decrease of hospital-related *Aspergillus* infection (Eckmanns, 2006). Some research has suggested that HEPA filters may be useful to reduce airborne levels of pathogenic bacteria. Boswell et al reported that portable HEPA filters were associated with significantly reduced hospital airborne levels of methicillin-resistant (Boswell, 2006).

The bacterial size generally ranges from 0.1 μm to 10 μm , whereas viruses, despite the fact they can make clusters or be bound to other particles, are usually 25-400 nm in diameter (Hogan, 2005). Kowalski et al. performed an interesting study dealing with modeling and prediction of filtration efficiencies for different kinds of microbes. Microbes differ from particulate matter in several respects, such as density, the presence of hydrophobic capsules or slime layers, and in having flagella that enable motility. The next factor that may cause filtration efficiency difference from predictions based on particle size could be the rod-like shape of various bacteria as well. Larger groups of microbes, streptococci, staphylococci and droplet nuclei, are held together by very weak natural forces and are likely to break up on aerosolization or on impact with filter fibers. The result is that microbes will be reduced to singular forms during the process of filtration. If not, then

they remain as larger particles and predicted filtration efficiency will not be different from particles of comparable size. The most important results of the Kowalski's research group are as follows. To predict filtration efficiency of fibrous air filters they compared calculations considering average diameter and logmean diameter of microorganisms and found that existing filter models are adequate for predicting the filtration efficiency of bacteria and spores provided that the logmean diameters, not the average diameters, are used for particle size. The filtration efficiencies of the smallest viruses, however, cannot be conservatively predicted due to the limitations of existing filtration theory in this size range. This matter could not be resolved and remains to be researched further. The interesting result of their experiment shows that the degree of penetration of microorganisms with the size corresponding with MMPs for HEPA filters may not be significant but may warrant some evaluation of the risks because the majority of these microorganisms belong to the group of causative agents of nosocomial infections (Kowalski, 1999). For most applications the HEPA is adequate, but tolerance for viral penetration is very low, and thus only a few penetrating virions may be enough to cause disease. For viruses to be efficient at penetrating HEPA filters they must remain as submicron particles. Most agree that viruses will not occur as singlets when dispersed in an aerosol; rather, they will agglomerate or attach to inert materials that will increase the particle sizes. Testing viral penetration of HEPA filter by MS2 coli phage (ATCC 15597-B1) the research group reported decrease of MMPs diameter to about 135 nm by higher velocities of air flow. When the velocity of air flow doubled from 2 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ to 4 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, the viable penetration increased approximately ten times. The authors conclude that the HEPA filters do not eliminate the viruses of smaller sizes optimally (Heimbuch, 2007). The viruses can penetrate the HEPA filter via the defects of the material itself, caused for example by pleating of the single layers of filtration media. The pinhole leaks could represent the next cause of the filtration capacity failure (Harstad, 2007). Discussion of plausible HEPA filter insufficiency in virus elimination in experimental laboratories provokes many questions. Do we have any investigations of microbial contamination of HEPA filters coming from air conditioning systems of buildings or means of transport?

Korves et al. reported examination of 48 samples of air filters removed from commercial aircraft air conditioning system during regular maintenance. Using multiplex RT PCR kit ResPlex II ver. 2.0 kit (Qiagen), they found rhinovirus, Influenza A and Influenza B viruses in three samples (Korves, 2011). Despite the fact, that we do not know if the viruses were on the inlet or outlet surface of the filter, the presence of the viruses on the air filters in the aircraft air conditioning system is worth the attention. The interesting report of virus transmission onboard brought Olsen et al. They investigated three flights where there were patients with SARS CoV-1 infection. In the flight 2, 120 persons were onboard including the index passenger that had symptomatic SARS. 22 persons got infected - 8 were seated in close vicinity to the index passenger (it means in the same row or 3 rows in front of the index passenger). Then, 10 persons who got infected were seated elsewhere. Aircraft ventilation systems are believed to be highly efficient at keeping the air free of pathogens, which they do by exchanging the air in passenger cabins every three to four minutes and passing the circulated air through air filters (Olsen, 2003). But, thinking about SARS CoV-1 transmission there is one remaining question - how was the virus transported in sufficient concentration to infect the persons seated far from the index passenger? Is it possible that the virus penetrated the HEPA filter and returned to the passenger cabin with recirculated air?

Our research group experienced interesting results of microbial contamination of air filter removed from commercial aircraft during regular maintenance. Bacteria were sampled and cultivated from inlet and outlet surfaces of the filter. The main result was

that the amount (CFU/ml) of several pathogens found on the filter was ten times higher on the outlet than on the inlet surface of the filter. Among cultivated pathogens we found *E. coli*, *M. morgani*, *k. ozeanae* or *Y. pseudotuberculosis* (Pavlík, 2019), (Obitková, 2019). To support the discussion of bacterial contamination of investigated air filter, the following table 1 shows the diameter of different microorganisms. The microbe sizes can be taken to consideration when comparing to the filtration mechanisms mentioned above.

Table 1 The microorganism sizes

MICROORGANISM	SIZE	CITTION
Escherichia coli	0.5x1-3 µm	(Zhou, 2022)
Staphylococcus aureus	0.5-1.5 µm	(Gnanamani, 2017)
Streptococcus pneumoniae	0,5-1.25 µm	(Murray, 2016)
Staphylococcus haemolyticus	0.8-1.3 µm	(Baron, 1996)
Mycoplasma pneumoniae	1-2 µm x 0.1-0.2 µm	(Saraya, 2017)
Mycobacterium tuberculosis	0.2-0.5 x 1.0-1.5 µm	(Han, 2015)
Legionella pneumophilla	3-5 µm	(Percival, 2014)
Bordetella pertussis	0.5-1.0 µm	(Ryan, 2004)
Neisseria meningitidis	0,6-1 µm	(Baron, 1996)
Adenovirus	80-90 nm	(Desheva, 2019)
Rhinovirus	30 nm	(To, 2017)
SARS CoV-2	100 nm	(Bar-On, 2020)
Parainfluenza virus 1	17x9 nm	(Henrickson, 2003)
Influenza A virus	80-120 nm	(Stanley, 1944)
Respiratory syncytial virus	0,5-12 µm x 90-130 nm	(Norrby, 1970) (Ke, 2018)
Cytomegalovirus	105 nm	(Ho, 1982)
Aspergillus fumigatus	2.0-3.0 µm	(Kwon-Chung, 2013)

Respiratory viruses as contaminants of the air filters

We can expect contamination of air filters by respiratory viruses to wide extent. As mentioned above, Influenza A and Influenza B viruses was detected on air filters in the commercial aircraft. Parainfluenza viruses belong to potential contaminants as well (Goyal, 2011). Rhinovirus was detected in indoor air of office building equipped with heating ventilation air conditioning system (HVAC) (Myatt, 2004), so the contamination of air filter could be expected. The influenza or common cold infections are usually limited to cool months of the year (Fisman, 2012). The respiratory syncytial virus (RSV) was proven in HVAC filter in children's day care center in seasonal manner (Prussin, 2016). Adenoviruses represent another representants of airborne infectious agents. Under experimental conditions, most aerosolized adenovirus particles were stopped by fiberglass air filter in air handling unit (AHU) tests, but several viral particles penetrated the filter with negligible loss of infectivity (Bandaly, 2019). Recently, the severe acute respiratory syndrome virus-2 SARS CoV-2 could be present on the air filters which are used to clean the indoor air (Nazarenko, 2020). The SARS-CoV-2 is RNA virus, enveloped and belongs to rather smaller viruses. The SARS-CoV-2 occurs through respiratory droplets, droplet nuclei or virus aggregates (Kampf, 2020). The droplet nuclei and aggregates are important for air filtration because the droplets sediment quickly within two meters far from infected individuals (Heo, 2021). SARS-CoV-2 in the form of aerosolized particles, which are found in a spectrum of sizes, typically 0.25 to 0.5 µm, nearly resembles the MMPs diameter. In fact, the HEPA filters are the most important air filters in virus removal, even in cleanrooms (Sandle, 2020). Some studies suggest the portable air purifiers as adjunctive infection control measures

with knowledge of HEPA filter functionality and limitations in mind (Christopherson, 2020).

Can nanofibers improve the filtration capacity in air filtration?

Recently, nanotechnology field created high impact in various spheres such as healthcare or environment - especially for gaseous and particle pollutant capture (Ravichandran, 2012), (Orlando, 2021). In healthcare application, the nanotextiles made of nanofibers can enhance the filtration effect and protectivity for example in face masks (El-Atab, 2021). During COVID-19 pandemic, the nanofiber textiles have been shown to have significant potential to capture SARS CoV-2 in face masks (Naragund, 2022). Among the nanotechnology products, nanofibers are one of the unique materials. Nanofibers have one order of magnitude smaller diameter than conventional fibers. The high surface-to-volume ratio, low resistance and enhanced filtration performance make nanofibers an attractive material for many applications including air filtration. In this field the nanofibers fabricated by electrospinning technique were suggested to have unique properties (Sundarrajan, 2014). Electrospinning is a simple, versatile, and economical technology. In the electrospinning method, a high voltage is applied to a polymer solution to produce ultra-fine fibers ranging from several nanometers to 2 µm. Generally, horizontal or vertical setup of electrospinning apparatus can be used. electrospinning process is mainly based on the principle that strong mutual electrical repulsive forces overcome weaker forces of surface tension in the charged polymer liquid (Chew, 2006). Electrospinning is conducted at room temperature with atmosphere conditions. Basically, an electrospinning system consists of three major components- a high voltage power supply, a spinneret and a grounded collecting plate. It utilizes a high voltage source to inject charge of a certain polarity into a polymer solution, which is then accelerated towards a collector of opposite polarity (Bhardwaj, 2010).

When the airflow containing particles passes through the electrospun fiber felt, the air can slip on the fiber surface, resulting in a substantial loss of pressure drop before and after the airflow passes through the fiber felt. The substantial reduction is beneficial to the smooth flow of air through the filter material so that the filter performance of the nanofiber felt reaches the ideal performance. Generally, the quality factor is used to evaluate the filtration performance of filter media (Alia, 2020).

Quality factor is defined as:

$$QF = -\frac{\ln(1-\eta)}{\Delta P}$$

where η is the filtering efficiency and ΔP represents pressure drop. Higher QF can be achieved by the enhancement of filtering efficiency and the reduction of the pressure drop. Nanofiber filter media has higher filtration efficiency, and lower pressure drop than traditional fiber filter materials, that is, higher quality factor. Therefore, nanofiber filtration materials have better filtration performance (Rajak, 2019), (Zhou, 2022).

Many different materials can be processed by electrospinning to produce nanofibers. Among organic polymers are leading materials polyamide PA6/12, Nylon PA6 or Polyaramid Al₂O₃, then polyurethane PUR and polyvinyl alcohol PVA could be used for nanofiber fabrication (Lev, 2010). The filtration efficiency of Nylon6 nanofiber material and high-efficiency air particle filter (test particles with an air flow speed of 5 cm.s⁻¹ and 0.3 µm) was compared. The results showed that the filtration efficiency of nano-fiber mat can reach 99.993%, which is much higher than that of high-efficiency air particle filter (Ahn, 2006). Polyacrylonitrile-based nanofibers (PAN) could be suitable for air filtration application as well (Nataraj, 2012). Electrospun nanofiber materials have high-efficiency filtration performance, but nanofibers can withstand low strength, are very fragile, easily damaged, and have extremely

poor durability. Therefore, nanofiber mats cannot be used as filters alone. In order to apply nanofibers to filtration, it is necessary to compound the nanofibers with the base fabric to increase their mechanical strength. Podgórski et al. suggested triple layer design for removing nanoparticles along with other aerosol particles. The first layer is a porous microfiber-based media for collecting the micro particles, middle one is the nano-fibrous membrane for capturing the particles in between 100 and 500 nm and the back layer is the dense layer of microfibers to provide mechanical strength to the composite media (Podgórski, 2006). Patanaik et al., prepared three-layered composite fiber filter media (the middle layer is electrospun nanofibers, and the front and back layers are nonwoven base fabrics) and double-layered fiber composite filter media. The nanofibers are deposited on the nonwoven base fabric, and the durability of the nanofiber layer is tested by circulating compressed air through these two filter media. The pore size of the layer is significantly increased, resulting in a significant change in filtration efficiency and pressure drop. For three-layer fiber composite filter media, there is no significant change in pore size, filtration efficiency (Patanaik, 2010).

The incorporation of antimicrobial agents such as silver with nanofiber is known to exhibit antimicrobial properties to the filters. Neeta et al reported antimicrobial (*E. coli* and *P. aeruginosa*) activity for poly(vinyl chloride) PVC, cellulose acetate (CA) and polyacrylonitrile (PAN) nanofiber membranes containing Ag nanoparticles (Lala, 2007). Some researchers added benzyltriethyl ammonium chloride to polycarbonate solution (PC) (Sun, 2017).

Some polymers such as Chitosan (CS) and Polymethyl acrylate (PMA) have inherent antibacterial/antiviral properties usually due to their positively charged domain structure which capture and disrupt the membrane of micro-organisms. Among them, CS and some of its derivatives enjoy advantages such as relatively good antimicrobial activity, biodegradability, and non-toxicity which attract a lot of attention recently. It has also been reported that one of the sulfated derivatives of CS (sulfated chitooligosaccharide) can inhibit HIV-1, which may have potential application for medicine to control HIV. There is even a report on the effectiveness of N-[(2-hydroxy-3- trimethylammonium)propyl] chitosan chloride (HTCC) on inhibition of the new coronavirus or SARS-CoV-2 (Borojeni, 2022).

Acknowledgments

This work has been supported by the grant no. SGS20/205/OHK4/3T/17.

Conclusion

The use of glass fibers or conventional HEPA filters cannot be fully replaced with functional nanofiber-based filters or functional nanofibers combinations so far. Such filters can improve filtration efficiency, non-selective and extended protection duration. The ability of nanofibers filters either alone or along with conventional filters for the removal of VOCs, nanoparticles and bacterial contaminates in the air is very promising. Such removal will reduce the man-made pollution in breathing air.

References

- EN ISO 1822-1 High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA) - Part 1: Classification, performance testing, marking: EN ISO 1822-1 Vysoce účinné filtry vzduchu (HEPA a ULPA) - Část 1: Klasifikace, ověřování vlastností, označování, 2019. 1. Praha: Český normalizační institut.
- AHN, Y.C., S.K. PARK, G.T. KIM, Y.J. HWANG, C.G. LEE, H.S. SHIN a J.K. LEE, 2006. Development of high efficiency nanofilters made of nanofibers. *Current Applied Physics* [online]. **6**(6), 1030-1035 [cit. 2022-08-31]. ISSN 15671739. Dostupné z: doi:10.1016/j.cap.2005.07.013.
- ALIA, Muhammad a Qura Tul AIN, 2020. Advances in air filters based on electrospun nanofibers. *Environmental Contaminants Reviews* [online]. 2020-01-17, **3**(1), 32-36 [cit. 2022-06-15]. ISSN 26370778. Dostupné z: doi:10.26480/ecr.01.2020.32.36.
- BANDALY, Victor, Aurélie JOUBERT, Yves ANDRES a Pierre LE CANN, 2019. Adenovirus behavior in air handling unit fiberglass filters. *Aerobiologia* [online]. **35**(2), 357-366 [cit. 2022-09-16]. ISSN 0393-5965. Dostupné z: doi:10.1007/s10453-019-09565-3.
- BAR-ON, Yinon M, Avi FLAMHOLZ, Rob PHILLIPS a Ron MILO, 2020. SARS-CoV-2 (COVID-19) by the numbers. *ELife* [online]. 2020-04-02, **9**(Apr 2) [cit. 2022-10-12]. ISSN 2050-084X. Dostupné z: doi:10.7554/eLife.57309.
- BARON, Samuel, ed., 1996. *Medical Microbiology*. 4. Austin, USA: University of Texas. ISBN 978-0963117212.
- BHARDWAJ, Nandana a Subhas C. KUNDU, 2010. Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. *Biotechnology Advances* [online]. **28**(3), 325-347 [cit. 2022-09-15]. ISSN 07349750. Dostupné z: doi:10.1016/j.biotechadv.2010.01.004.
- BOROJENI, Iman Azarian, Grzegorz GAJEWSKI a Reza A. RIAHI, 2022. Application of Electrospun Nonwoven Fibers in Air Filters. *Fibers* [online]. **10**(2), 321-328 [cit. 2022-09-01]. ISSN 2079-6439. Dostupné z: doi:10.3390/fib10020015.
- BOSWELL, T.C. a P.C. FOX, 2006. Reduction in MRSA environmental contamination with a portable HEPA-filtration unit. *Journal of Hospital Infection* [online]. **63**(1), 47-54 [cit. 2022-08-30]. ISSN 01956701. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhin.2005.11.011.
- BOUDINA, Mouad, Frédérick P. GOSELIN a Stéphane ÉTIENNE, 2020. Direct interception or inertial impaction? A theoretical derivation of the efficiency power law for a simple and practical definition of capture modes. *Physics of Fluids* [online]. 2020-12-01, **32**(12) [cit. 2022-09-14]. ISSN 1070-6631. Dostupné z: doi:10.1063/5.0030891.
- DESHEVA, Yulia, 2019. *Adenoviruses*. 1. Intechopen. ISBN 178984990X.
- ECKMANNNS, Tim, Henning RÜDEN a Petra GASTMEIER, 2006. The Influence of High-Efficiency Particulate Air Filtration on Mortality and Fungal Infection among Highly Immunosuppressed Patients: A Systematic Review. *The Journal of Infectious Diseases* [online]. 2006-05-15, **193**(10), 1408-1419 [cit. 2022-08-30]. ISSN 0022-1899. Dostupné z: doi:10.1086/503435.
- EL-ATAB, Nazek, Rishabh B. MISHRA a Muhammad M. HUSSAIN, 2021. Toward nanotechnology-enabled face masks against SARS-CoV-2 and pandemic respiratory diseases. *Nanotechnology* [online]. 2021-11-19, **33**(6), 1-22 [cit. 2022-01-25]. ISSN 0957-4484. Dostupné z: doi:10.1088/1361-6528/ac3578.
- FISMAN, D., 2012. Seasonality of viral infections: mechanisms and unknowns. *Clinical Microbiology and Infection* [online]. **18**(10), 946-954 [cit. 2022-08-23]. ISSN 1198743X. Dostupné z: doi:10.1111/j.1469-0691.2012.03968.x.
- GNANAMANI, Arumugam, Periasamy HARIHARAN a Maneesh PAUL-SATYASEELA, 2017. Staphylococcus aureus: Overview of Bacteriology, Clinical Diseases, Epidemiology, Antibiotic Resistance and Therapeutic Approach. *Frontiers in Staphylococcus aureus* [online]. InTech, 2017-03-08, 1160-1183 [cit. 2022-10-12]. ISBN 978-953-51-2981-3. Dostupné z: doi:10.5772/67338.

- GOYAL, Sagar M., Senthilvelan ANANTHARAMAN, M.A. RAMAKRISHNAN, et al., 2011. Detection of viruses in used ventilation filters from two large public buildings. *American Journal of Infection Control* [online]. **39**(7), e30-e38 [cit. 2022-09-15]. ISSN 01966553. Dostupné z: doi:10.1016/j.ajic.2010.10.036.
- HAN, Seung Jung, Taeksun SONG, Yong-Joon CHO, et al., 2015. Complete genome sequence of Mycobacterium tuberculosis K from a Korean high school outbreak, belonging to the Beijing family. *Standards in Genomic Sciences* [online]. **10**(1) [cit. 2022-10-12]. ISSN 1944-3277. Dostupné z: doi:10.1186/s40793-015-0071-4.
- HARSTAD, J. Bruce a Melvin E. FILLER, 2007. Evaluation of air filters with submicron viral aerosols and bacterial aerosols. *American Industrial Hygiene Association Journal* [online]. 2007-12-27, **30**(3), 280-290 [cit. 2022-02-02]. ISSN 0002-8894. Dostupné z: doi:10.1080/00028896909343122.
- HEIMBUCH, Brian K. a Jennifer K. HODGE, 2007. *Viral Penetration of High Efficiency Particulate Air (HEPA) Filters (PREPRINT)*. Washington DC. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/235048517_Viral_Penetration_of_High_Efficiency_Part particulate_Air_HEPA_Filters_PREPRINT.
- HENRICKSON, Kelly J., 2003. Parainfluenza Viruses. *Clinical Microbiology Reviews* [online]. **16**(2), 242-264 [cit. 2022-10-12]. ISSN 0893-8512. Dostupné z: doi:10.1128/CMR.16.2.242-264.2003.
- HEO, Ki Joon, Inyong PARK, Gunhee LEE, Keejung HONG, Bangwoo HAN, Jae Hee JUNG a Sang Bok KIM, 2021. Effects of Air Purifiers on the Spread of Simulated Respiratory Droplet Nuclei and Virus Aggregates. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [online]. **18**(16), 8426 [cit. 2022-06-14]. ISSN 1660-4601. Dostupné z: doi:10.3390/ijerph18168426.
- HINDS, William C., 2021. *Aerosol technology* [online]. 2. Wiley [cit. 2022-08-23]. ISBN 9781118591970.
- HO, Monto, 1982. Characteristics of Cytomegalovirus. *Cytomegalovirus* [online]. Boston, MA: Springer US, 9-32 [cit. 2023-02-28]. ISBN 978-1-4684-4075-1. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4684-4073-7_2.
- HOGAN, C.J., E.M. KETTLESON, M.-H. LEE, B. RAMASWAMI, L.T. ANGENENT a P. BISWAS, 2005. Sampling methodologies and dosage assessment techniques for submicrometre and ultrafine virus aerosol particles. *Journal of Applied Microbiology* [online]. **99**(6), 1422-1434 [cit. 2022-01-31]. ISSN 1364-5072. Dostupné z: doi:10.1111/j.1365-2672.2005.02720.x.
- CHEW, S., Y. WEN, Y. DZENIS a K. LEONG, 2006. The Role of Electrospinning in the Emerging Field of Nanomedicine. *Current Pharmaceutical Design* [online]. 2006-12-01, **12**(36), 4751-4770 [cit. 2022-09-15]. ISSN 13816128. Dostupné z: doi:10.2174/138161206779026326.
- CHRISTOPHERSON, David A., William C. YAO, Mingming LU, R. VIJAYAKUMAR a Ahmad R. SEDAGHAT, 2020. High-Efficiency Particulate Air Filters in the Era of COVID-19: Function and Efficacy. *Otolaryngology-Head and Neck Surgery* [online]. **163**(6), 1153-1155 [cit. 2022-01-19]. ISSN 0194-5998. Dostupné z: doi:10.1177/0194599820941838.
- KAMPF, G., Y. BRÜGGEMANN, H.E.J. KABA, J. STEINMANN, S. PFAENDER, S. SCHEITHAUER a E. STEINMANN, 2020. Potential sources, modes of transmission and effectiveness of prevention measures against SARS-CoV-2. *Journal of Hospital Infection* [online]. **106**(4), 678-697 [cit. 2022-06-14]. ISSN 01956701. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhin.2020.09.022.
- KE, Zunlong, Rebecca DILLARD, Tatiana CHIRKOVA, et al., 2018. The Morphology and Assembly of Respiratory Syncytial Virus Revealed by Cryo-Electron Tomography. *Viruses* [online]. **10**(8), 1-22 [cit. 2023-02-28]. ISSN 1999-4915. Dostupné z: doi:10.3390/v10080446.
- KORVES, T.M., D. JOHNSON, B.W. JONES, J. WATSON, D.M. WOLK a G.M. HWANG, 2011. Detection of respiratory viruses on air filters from aircraft. *Letters in Applied Microbiology*. **53**, 306-312. ISSN 0266-8254. Dostupné z: doi:10.1111/j.1472-765X.2011.03107.x.
- KOWALSKI, W.J., William P. BAHNFLETH a T.T. WHITTAM, 1999. Filtration of airborne microorganisms: Modeling and prediction. *ASHRAE Transactions: Research* [online]. 4-16 [cit. 2022-06-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/242434719_Filtration_of_airborne_microorganisms_Modeling_and_prediction.
- KWON-CHUNG, Kyung J., Janyce A. SUGUI a Joseph HEITMAN, 2013. Aspergillus fumigatus-What Makes the Species a Ubiquitous Human Fungal Pathogen? *PLoS Pathogens* [online]. 2013-12-5, **9**(12), 1-4 [cit. 2023-03-07]. ISSN 1553-7374. Dostupné z: doi:10.1371/journal.ppat.1003743.
- LALA, Neeta L., Ramakrishnan RAMASESHAN, Li BOJUN, Subramanian SUNDARRAJAN, R.S. BARHATE, Liu YING-JUN a Seeram RAMAKRISHNA, 2007. Fabrication of nanofibers with antimicrobial functionality used as filters: protection against bacterial contaminants. *Biotechnology and Bioengineering* [online]. 2007-08-15, **97**(6), 1357-1365 [cit. 2022-09-01]. ISSN 00063592. Dostupné z: doi:10.1002/bit.21351.
- LEE, K. W. a B. Y. H. LIU, 1980. On the minimum efficiency and the most penetrating particle size for fibrous filters. *Journal of the Air Pollution Control Association* [online]. **30**(4), 377-381 [cit. 2022-08-23]. ISSN 0002-2470. Dostupné z: doi:10.1080/00022470.1980.10464592.
- LEV, Jaroslav, Libor KALHOTKA a Michal CERNÝ, 2010. Nanotextile membranes for bacteria Escherichia coli capturing. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* [online]. **27**(5), 239-246 [cit. 2019-07-31]. Dostupné z: doi:10.11118/actaun201058050239.
- LIPPI, Martina, Laura RIVA, Manfredi CARUSO a Carlo PUNTA, 2022. Cellulose for the production of air-filtering systems: A Critical Review. *Materials* [online]. **15**(3) [cit. 2022-08-23]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma15030976.
- LIU, David T., Katie M. PHILLIPS, Marlene M. SPETH, Gerold BESSER, Christian A. MUELLER a Ahmad R. SEDAGHAT, 2022. Portable HEPA Purifiers to Eliminate Airborne SARS-CoV-2: A Systematic Review. *Otolaryngology-Head and Neck Surgery* [online]. **166**(4), 615-622 [cit. 2022-08-30]. ISSN 0194-5998. Dostupné z: doi:10.1177/01945998211022636.
- MOHAMMED, Atef MF, Inas A SALEH, Yasser H IBRAHIM a Nora RG MOHAMED, 2022. Theory and technology of air filtration: review. *Material Science & Engineering International Journal* [online]. **6**(1), 6-12 [cit. 2022-06-15]. Dostupné z: doi:10.15406/mseij.2022.06.00173.
- MONTO, Arnold S, 2002. Epidemiology of viral respiratory infections. *The American Journal of Medicine* [online]. **112**(6), 4-12 [cit. 2022-08-23]. ISSN 00029343. Dostupné z: doi:10.1016/S0002-9343(01)01058-0.
- MURRAY, Patrik R., Ken S. ROSENTHAL a Michael A. PFALLER, 2016. *Medical Microbiology* [online]. Ed 7. Philadelphia: Elsevier [cit. 2019-07-06]. ISBN 978-0-323-29956-5. Dostupné z: i.ums.ac.ir/files/microb/files/Murray.pdf.

- MYATT, Theodore A., Sebastian L. JOHNSTON, Zhengfa ZUO, Matthew WAND, Tatiana KEBADZE, Stephen RUDNICK a Donald K. MILTON, 2004. Detection of Airborne Rhinovirus and Its Relation to Outdoor Air Supply in Office Environments. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* [online]. 2004-06-01, **169**(11), 1187-1190 [cit. 2022-09-16]. ISSN 1073-449X. Dostupné z: doi:10.1164/rccm.200306-760OC.
- NARAGUND, Veereshgouda S. a P. K. PANDA, 2022. Electrospun nanofiber-based respiratory face masks a review. *Emergent Materials* [online]. **5**(2), 261-278 [cit. 2022-06-14]. ISSN 2522-5731. Dostupné z: doi:10.1007/s42247-022-00350-6.
- NATARAJ, S.K., K.S. YANG a T.M. AMINABHAVI, 2012. Polyacrylonitrile-based nanofibers A state-of-the-art review. *Progress in Polymer Science* [online]. **37**(3), 487-513 [cit. 2022-09-14]. ISSN 00796700. Dostupné z: doi:10.1016/j.progpolymsci.2011.07.001.
- NAZARENKO, Yevgen, 2020. Air Filtration and Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2. *Epidemiology and Health* [online]. **42**(4:e2020049), 1-3 [cit. 2022-09-15]. ISSN 2092-7193. Dostupné z: doi:10.4178/epih.e2020049.
- NORRBY, Erling, Halyna MARUSYK a Claes ÖRVELL, 1970. Morphogenesis of Respiratory Syncytial Virus in a Green Monkey Kidney Cell Line (Vero). *Journal of Virology* [online]. **6**(2), 237-242 [cit. 2023-02-28]. ISSN 0022-538X. Dostupné z: doi:10.1128/jvi.6.2.237-242.1970.
- OBITKOVÁ, Daniela, Emil PAVLÍK, Milan MRÁZ a Viktoriya GVOZDEVA, 2019. Microbial Contamination of Different Types of Air Filters. In: *Ochrana obyvatelstva v případě krizových situací a mimořádných událostí nevojenského charakteru VII. Aspekty práce pomáhajících profesí AWHP 2019*. 2019. Kladno: FBMI ČVUT v Praze, s. 179-201. ISBN 978-80-01-06651-5.
- OLSEN, Sonja J., Hsiao-Ling CHANG, Terence YUNG-YAN CHEUNG, et al., 2003. Transmission of the severe acute respiratory syndrome on aircraft. *The New England Journal of Medicine* [online]. **349**(25), 2416-2422 [cit. 2024-01-10]. Dostupné z: doi:10.1056/NEJMoa031349.
- ORLANDO, Roberta, Merve POLAT, Alireza AFSHARI, Matthew S. JOHNSON a Peter FOJAN, 2021. Electrospun Nanofiber Air Filters for Particles and Gaseous Pollutants. *Sustainability* [online]. **13**(12) [cit. 2022-08-24]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su13126553.
- PATANAİK, Asis, Valencia JACOBS a Rajesh D. ANANDJIWALA, 2010. Performance evaluation of electrospun nanofibrous membrane. *Journal of Membrane Science* [online]. 2010-04-15, **352**(1-2), 136-142 [cit. 2022-09-01]. ISSN 03767388. Dostupné z: doi:10.1016/j.memsci.2010.02.009.
- PAVLÍK, Emil, Viktoriya GVOZDEVA, Daniela OBITKOVÁ a Milan MRÁZ, 2019. Do you Feel sick after long-haul flight?: We may know why. *Labor Aktuell* [online]. **2019**(1), 32-38 [cit. 2019-10-03]. Dostupné z: <https://www.roche-diagnostics.cz/home/casopis.html>.
- PERCIVAL, Steven L. a David W. WILLIAMS, 2014. Legionella. *Microbiology of Waterborne Diseases* [online]. Elsevier, 155-175 [cit. 2022-10-12]. ISBN 9780124158467. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-415846-7.00008-1.
- PERRY, J.L., J.H. AGUI a R. VIJAYAKUMAR, 2016. *Submicron and Nanoparticulate Matter Removal by HEPA-Rated Media Filters and Packed Beds of Granular Materials: NASA/TM 2016-218224* [online]. 1. Huntsville, Alabama, USA: NASA STI. Dostupné také z: <http://www.sti.nasa.gov>.
- PODGÓRSKI, Albert, Anna BALAZY a Leon GRADOŃ, 2006. Application of nanofibers to improve the filtration efficiency of the most penetrating aerosol particles in fibrous filters. *Chemical Engineering Science* [online]. **61**(20), 6804-6815 [cit. 2022-08-22]. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/j.ces.2006.07.022.
- PRUSSIN, Aaron J., Amit VIKRAM, Kyle J. BIBBY, Linsey C. MARR a Maosheng YAO, 2016. Seasonal Dynamics of the Airborne Bacterial Community and Selected Viruses in a Children's Daycare Center. *PLOS ONE* [online]. 2016-3-4, **11**(3), 1-15 [cit. 2022-09-16]. ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0151004.
- RAJAK, Abdul, Dian Ahmad HAPIDIN, Ferry ISKANDAR, Muhammad Miftahul MUNIR a Khairurrijal KHAIRURRIJAL, 2019. Controlled morphology of electrospun nanofibers from waste expanded polystyrene for aerosol filtration. *Nanotechnology* [online]. 2019-10-18, **30**(42), 1-14 [cit. 2022-08-31]. ISSN 0957-4484. Dostupné z: doi:10.1088/1361-6528/ab2e3b.
- RAVICHANDRAN, Rajeswari, Subramanian SUNDARRAJAN, Jayarama Reddy VENUGOPAL, Shayanti MUKHERJEE a Seeram RAMAKRISHNA, 2012. Advances in Polymeric Systems for Tissue Engineering and Biomedical Applications. *Macromolecular Bioscience* [online]. **12**(3), 286-311 [cit. 2022-08-24]. ISSN 16165187. Dostupné z: doi:10.1002/mabi.201100325.
- RYAN, Kenneth J. a , ed., 2004. Haemophilus and Bordetella. In: RYAN, Kenneth J. a C.G. RAY. *Sherris Medical Microbiology*. 4. USA: The McGraw-Hill Companies, s. 395-420. ISBN 0-07-150238-6.
- SANDLE, Tim, 2020. Review of the efficacy of HEPA filtered air to control coronavirus risks in cleanrooms. *EJPPS EUROPEAN JOURNAL OF PARENTERAL AND PHARMACEUTICAL SCIENCES* [online]. **2020**(June), 2-5 [cit. 2022-09-16]. ISSN 2633-6588. Dostupné z: doi:10.37521/25203.
- SARAYA, Takeshi, 2017. Mycoplasma pneumoniae infection: Basics. *Journal of General and Family Medicine* [online]. **18**(3), 118-125 [cit. 2022-10-31]. ISSN 21897948. Dostupné z: doi:10.1002/jgf2.15.
- SHAH, Dipsha Paresh a Piyushkumar PATEL, 2021. A Review of Chronological Evolution of Air Quality Indexing Systems (1966 To 2021). *Current World Environment* [online]. 2021-12-31, **16**(3), 704-725 [cit. 2022-09-16]. ISSN 23208031. Dostupné z: doi:10.12944/CWE.16.3.5.
- SHIM, Euijin, Jeong-Phil JANG, Jai-Joung MOON a Yeonsang KIM, 2021. Improvement of Polytetrafluoroethylene Membrane High-Efficiency Particulate Air Filter Performance with Melt-Blown Media. *Polymers* [online]. **13**(23), 4067 [cit. 2022-09-14]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym13234067.
- STANLEY, W. M., 1944. THE SIZE OF INFLUENZA VIRUS. *Journal of Experimental Medicine* [online]. 1944-03-01, **79**(3), 267-283 [cit. 2022-10-12]. ISSN 1540-9538. Dostupné z: doi:10.1084/jem.79.3.267.
- SUN, Zhimin, Changgu SHI, Xiangyang WANG, Qiang FANG a Jianying HUANG, 2017. Synthesis, characterization, and antimicrobial activities of sulfonated chitosan. *Carbohydrate Polymers* [online]. **155**, 321-328 [cit. 2022-09-01]. ISSN 01448617. Dostupné z: doi:10.1016/j.carbpol.2016.08.069.
- SUNDARRAJAN, Subramanian, Kwong Luck TAN, Soon Huat LIM a Seeram RAMAKRISHNA, 2014. Electrospun Nanofibers for Air Filtration Applications. *Procedia Engineering* [online]. **75**(2014), 159-163 [cit. 2022-08-24]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2013.11.034.

- TCHARKHTCHI, A., N. ABBASNEZHAD, M. ZARBINI SEYDANI, N. ZIRAK, S. FARZANEH a M. SHIRINBAYAN, 2021. An overview of filtration efficiency through the masks: Mechanisms of the aerosols penetration. *Bioactive Materials* [online]. **6**(1), 106-122 [cit. 2022-08-23]. ISSN 2452199X. Dostupné z: doi:10.1016/j.bioactmat.2020.08.002.
- TO, Kelvin K.W., Cyril C.Y. YIP a Kwok-Yung YUEN, 2017. Rhinovirus - From bench to bedside. *Journal of the Formosan Medical Association* [online]. **116**(7), 496-504 [cit. 2022-10-12]. ISSN 09296646. Dostupné z: doi:10.1016/j.jfma.2017.04.009.
- WANG, Zhe, Chuchu ZHAO a Zhijuan PAN, 2015. Porous bead-on-string poly(lactic acid) fibrous membranes for air filtration. *Journal of Colloid and Interface Science* [online]. **441**, 121-129 [cit. 2022-08-23]. ISSN 00219797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcis.2014.11.041.
- WINES, Thomas H. a Saeid MOKHATAB, 2022. Fundamentals of filtration science. *Contamination Control in the Natural Gas Industry* [online]. Elsevier, **2022**, 1-23 [cit. 2022-09-14]. ISBN 9780128169865. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-816986-5.00001-5.
- XU, Zhonglin a Bin ZHOU, 2014. *Fundamentals of Air Cleaning Technology and Its Application in Cleanrooms* [online]. 1. New York (USA): Springer Verlag [cit. 2022-06-08]. ISBN 978-3-642-39374-7. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-642-39374-7.
- ZHANG, Haifeng, Jinxin LIU, Xing ZHANG, Chen HUANG a Xiangyu JIN, 2018. Design of electret polypropylene melt blown air filtration material containing nucleating agent for effective PM2.5 capture. *RSC Advances* [online]. **8**(15), 7932-7941 [cit. 2022-09-14]. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/C7RA10916D.
- ZHANG, Jianfeng, Gangjin CHEN, Gajanan S. BHAT, Homeira AZARI a Huili PEN, 2019. Electret characteristics of melt-blown polylactic acid fabrics for air filtration application. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2019-08-05, **137**(4) [cit. 2022-09-14]. ISSN 0021-8995. Dostupné z: doi:10.1002/app.48309.
- ZHOU, Feng, Dehua WANG, Jiamiao HU, Yi ZHANG, Bee K. TAN a Shaoling LIN, 2022. Control Measurements of Escherichia coli Biofilm: A Review. *Foods* [online]. **11**(16), 1-11 [cit. 2022-10-12]. ISSN 2304-8158. Dostupné z: doi:10.3390/foods11162469.
- ZHOU, Yangjian, Yanan LIU, Mingxin ZHANG, Zhangbin FENG, Deng-Guang YU a Ke WANG, 2022. Electrospun Nanofiber Membranes for Air Filtration: A Review. *Nanomaterials* [online]. **12**(7), 1-33 [cit. 2022-09-02]. ISSN 2079-4991. Dostupné z: doi:10.3390/nano12071077.

Problémy selekcie zdrojov pre kvantitatívne posúdenie rizík podľa CPR štandardov

prof. Ing. Milan Oravec, PhD.¹

Ing. Ladislav Čáky²

¹Technická univerzita Košice, Sjf

Letná 9, 042 00 Košice, Slovenská republika

²EHP Slovensko

Bemoláková 1015/11, 093 01 Vranov nad Topľou, Slovenská republika

milan.oravec@tuke.sk, zph@caky-ehp.sk

Abstrakt

Najrozšírenejším postupom pre výber zdrojov pre kvantitatívne posúdenie rizík (QRA) v oblasti závažných priemyselných havárií (ZPH) podľa Directive 2012/18/EU (SEVESO III) v Európe je holandský prístup. Je založený na CPR štandardoch. CPR18E z roku 1999 bolo modifikované doposiaľ 2-krát. Posledná úprava je v podobe Reference Manual Bevi Risk Assessments version 3.2, z roku 2009 (Bevi). Selektcia podľa CPR štandardov doposiaľ nepokrýva niektoré špecifiká nebezpečných látok (NL) podľa SEVESO III, ktoré majú toxické a horľavé vlastnosti. Posledné odporúčania pre túto oblasť sú z roku 2018. Sú zamerané na chladom skvapalnený horľavý zemný plyn (LNG). Pre chladom skvapalnené látky, zmesi s toxickými a horľavými vlastnosťami súčasne doposiaľ nie sú vypracované nové postupy pre selektciu pre QRA, ale ani pre výpočet dôsledkov. V príspevku sa porovnávajú vybrané metódy selekcie pred rokom 1999 so súčasnými CPR štandardami s cieľom výberu vhodných zdrojov pre QRA v oblasti ZPH. Dospelo sa k poznaniu, že metódy primárnej selekcie podľa CPR18E, Bevi manuálu je vhodné modifikovať, alebo použiť aj ďalšiu metódu pre selektciu pre QRA pri chladom skvapalnených NL s toxickými a súčasne horľavými vlastnosťami akým je čpavok.

Kľúčové slová

Závažné priemyselné havárie, selektcia zdrojov, CPR18E, Bevi príručka, FEI, CEI, IAEA-TECDOC-727.

Abstract

The Dutch approach is the most widely used procedure for selecting sources for quantitative risk assessment (QRA) in the field of major industrial accidents (QRA) under Directive 2012/18/EU (SEVESO III) in Europe. It is based on CPR standards. The 1999 CPR18E has been modified 2 times so far. The last modification is in the form of Reference Manual Bevi Risk Assessments version 3.2, from 2009 (Bevi). Selection according to CPR standards does not yet cover some specificities of hazardous substances (NL) according to SEVESO III, which have toxic and flammable properties. The latest recommendations in this area are from 2018. They target cold-liquefied flammable natural gas (LNG). For cold-liquefied substances, mixtures with toxic and flammable properties, new selection procedures for QRA, but also for calculating the consequences, have not yet been developed. The paper compares selected selection methods before 1999 with current CPR standards in order to select suitable sources for QRA in the field of ZPH. It has been established that primary selection methods according to CPR18E, Bevi should be modified, or use another selection method for QRA in cold-liquefied NL with toxic and flammable properties such as ammonia.

Keywords

Major industrial accidents, source selection, CPR18E, Bevi manual, FEI, CEI, IAEA-TECDOC-727.

Úvod

Závažné priemyselné havárie sa vyčlenili ako samostatná kategória podnikov po havárii v Taliansku, v Sevese, v roku 1974. Vytvorili skupinu Seveso podnikov. Vytvorenie Smerníc pre túto skupinu podnikov dnes poukazuje na nutnosť riešenia týchto problémov. Smernica Seveso III [1] a Nariadenie 1272/2008/EU [2] je potvrdením tohoto prístupu. Selektcia zdrojov pre QRA je rozhodujúca pre nasledovné kroky súvisiace s posúdením scenárov s potenciálom ZPH. Najrozšírenejším postupom pre selektciu zdrojov pre QRA v oblasti ZPH v Európe je holandský prístup založený na CPR štandardoch [3]. Štandard CPR18E z roku 1999 [4] bol revidovaný v roku 2005 [5]. Posledné odporúčenie k programu SAFETI-NL je Bevi príručka [6]. Už pred rokom 1999 za účelom preukazovania bezpečnosti Seveso podnikov, existovali postupy pre selektovanie rizikových zdrojov a procesov [7-9].

Chemické podniky v minulosti boli postavené v primeranej vzdialenosti od obývanej oblasti. Prísun vstupných produktov, logistika dopravy bola, vždy volená po obvode podnikov. V prístavoch vznikali veľké skladové terminály, nielen ropných produktov. Surová ropa, skvapalnené plyny, čpavok, kyseliny, patria k základným surovinám pre organickú a anorganickú chémiu. V Haife (Haifa Chemicals), sa v roku 2017, po 30-tich rokoch, podarilo na nátlak obyvateľstva, premiestniť skladovú kapacitu 12 000 ton nízkotlakého zásobníka čpavku z prístavu [10]. Známa je havária nízkotlakého skladového zásobníka čpavku s kapacitou 10 000 ton z roku 1989 [11] Jonava, Litva (dnes Achema Litva). Dnes sa stavajú nízkotlaké čpavkové zásobníky s tonážou do 40 000 ton podľa API 620R, alebo EN 14620, ktoré sú prevažne ako samostatné skladové polia mimo zastavanú oblasť. Dusičnan amónny (DAM) spôsobil viacero priemyselných havárií, príkladom bolo francúzske Toulouse. Posledným príkladom je Libanon a výbuch DAM v prístave Bejrút v roku 2020. Viaceré prípadové štúdiá poukazujú na slabé miesta súčasného postupu pre selektovanie zdrojov pre QRA podľa Bevi manuálu.

Metódy selekcie pre QRA

Metóda selekcie podľa CPR štandardov

Indikačné číslo A vyjadruje pomer medzi skutočným a medzným množstvom NL, ktoré je považované za relatívne bezpečné [4-6]. Vyjadruje mieru ohrozenia na území podniku. Tento pomer je korigovaný faktormi vyjadrujúcimi typ činnosti (proces/sklad), umiestnením jednotky (vonkajšie/vnútorne/záchyt) a podmienkami procesu. Indikačné číslo slúži na porovnanie rizikovosti zdrojov na území podniku. Indikačné číslo A je bezrozmerné číslo vypočítané podľa vzťahu:

$$A^{E,F,T} = \frac{Q \cdot O_1 \cdot O_2 \cdot O_3}{G} \quad (-) \quad (1),$$

kde:

$A^{E,F,T}$ indikačné číslo jednotky pre explozívne, horľavé, toxické látky (-),

Q množstvo NL prítomnej v jednotke (kg),

O_1 faktor pre procesnú jednotku alebo skladovacia jednotku (-),

O_2 faktor zohľadňujúci umiestnenie jednotky (-),

O_3 faktor zohľadňujúci procesné podmienky (-),

G limitná hodnota (kg).

Selektívne číslo S vyjadruje mieru ohrozenia okolia zariadením podniku s NL vzhľadom k posudzovanému bodu, ktorým sú zvyčajne hranice podniku. Vypočíta sa pre horľavé a explozívne NL podľa vzťahu:

$$S^{E,F} = \left(\frac{100}{L}\right)^3 \cdot A^{E,F} \quad (-) \quad (2)$$

pre toxické NL:

$$S^T = \left(\frac{100}{L}\right)^2 \cdot A^T \quad (-) \quad (3)$$

kde:

$S^{E,F,T}$ selektívne číslo jednotky pre explozívne, horľavé, toxické NL (-),

L vzdialenosť posudzovaného bodu od zdroja, minimálna vzdialenosť ($L_{min} = 100$ m) (m),

$A^{E,F,T}$ príslušné indikačné číslo jednotky (-).

Fire & Explosion Index

V oblasti prevencie ZPH sa využíval v minulosti pre horľavé a reaktívne NL Fire & Explosion Index (FEI) [7]. Výsledná hodnota FEI sa vypočíta podľa vzťahu:

$$FEI = MF \cdot F_1 \cdot F_2 \quad (-) \quad (4)$$

kde:

MF materiálový faktor (-),

F_1 koeficient obecného ohrozenia (-),

F_2 koeficient špecifického ohrozenia (-).

Materiálový faktor (MF) vyjadruje horľavosť a reaktivitu látky, zmesi. Jeho hodnota je v rozmedzí 1-40. Koeficient obecného ohrozenia (F_1) vyjadruje všeobecné ohrozenia. Jeho hodnota je od 1-5 v závislosti od konkrétnych podmienok. Koeficient špecifického ohrozenia (F_2) zohľadňuje konkrétny stav v analyzovanej prevádzke. Jeho hodnota málokedy dosiahne hodnotu $F_2 = 6 \cdot F_1$ a F_2 sa určujú na základe viacerých parametrov. Pre odhad percenta poškodenia analyzovanej jednotky je rozhodujúci súčin F_1 a F_2 . Maximálna hodnota je 8. Táto skutočnosť dáva prehľad o možných dôsledkoch už vo fáze selekcie zdrojov pre QRA. Metodika umožňuje vypočítať aj ďalšie parametre. Tieto pre účel QRA sú sekundárne a neuvádzajú sa tu.

Chemical index

Chemická spoločnosť Dow's vytvorila pre chemické látky, zmesi s toxickým účinkom aj index chemickej expozície (CEI) [8]. CEI stanovuje mieru hrozby spôsobenej únikom toxického plynu v plynnom a kvapalnom skupenstve do okolia. Výsledná hodnota CEI sa vypočíta:

$$CEI = 655,1 \cdot \sqrt{\frac{AQ}{ERPG2}} \quad (-) \quad (5)$$

kde:

AQ celkové uniknuté množstvo NL, zmesi (kg.sek⁻¹),

$ERPG2$ koncentrácia NL, zmesi (mg.m⁻³).

Metóda uvažuje ako s únikom plynnej tak aj kvapalnej fázy zo zariadenia. Pôvodná metóda rozlišovala škálu CEI do a nad 1 000. Na základe skúseností s touto metódou sa odporúča do QRA zaradiť zdroje s $CEI > 200$. Metodika umožňuje vypočítať aj ďalšie parametre. Tieto pre účel QRA sú sekundárne a neuvádzajú sa tu.

Limity metodík pre výber zdrojov pre QRA

CPR štandardy pre výber zdrojov pre QRA

V CPR18E [4, 5], Bevi [6] pre selekciu zdrojov pre QRA sú uvedené rovnice 1-3. Pre selekciu zdrojov do QRA je uvedená podmienka $S > 1$ v hraničnom bode podniku a 50 % z maximálneho vypočítaného selektívneho čísla (S_{max}) v tomto bode. V roku 2005 [5] boli upravené odporúčania pre selekciu zdrojov do QRA. Podmienky selekcie sa však nezmenili. Tieto limity pre výber zdroja pre QRA umožňovali posudzovať menej ako 5 zdrojov. Takáto skutočnosť bola možná ak už len jeden zdroj (veľký skladový zásobník spĺňal podmienku $S > 1$ a 50 % z S_{max}).

Filozofia v Bevi z roku 2009 [6] bola iná. Po zavedení výpočtového programu SAFETI-NL sa Bevi stala len príručkou k program SAFETI-NL. Bevi aj bez výpočtového programu umožňuje vhodne selektovať zdroje pre QRA pri zohľadnení skúseností z posudzovania rizík pre účel ZPH. Použitie SAFETI-NL nezabavuje posudzovateľa myslieť a poznať konkrétnu kauzalitu. Novým bol aj prístup k selektovaniu zdrojov pre QRA. Táto skutočnosť sa odráža aj na radení kapitol v Bevi. Moduly A, B Bevi sú venované iniciačným udalostiam a zjednodušeniu výpočtu ETA voči CPR18E. Modul C selektovaniu zdrojov pre QRA. Pribudla aj podmienka minimálneho počtu zdrojov 5. Táto podmienka zabránila špekulatívnym postupom pri selekcii počtu zdrojov pre QRA. Zmeny nastali aj pri limitnej hodnote G , rovnica 1, pre kvapálne toxické látky. Zvoľnenie požiadaviek bolo pre ohrozenie okolia, kde sa v CPR18E požadovalo vypočítať aj selektívne číslo pre príhľad obývané oblasti a porovnať ho voči hodnote $S = 1$. Takáto podmienka v Bevi už nie je explicitne definovaná. Bola nahradená možnosťou vyradenia zdrojov spĺňajúcich kritérium individuálneho rizika (IR) $IR < 10^{-5}$ na území podniku. Druhou podmienkou je prijateľná miera spoločenského rizika (SR). Do výberu pre QRA nemuseli byť zaradené zdroje s frekvenciou poruchy nižšou ako 1.10^{-8} rok⁻¹, kap. 2.3.4.4 Bevi, modul C. Pre neštandardné zdroje je uvedená naďalej poznámka, že za výber zdrojov do QRA je zodpovedný posudzovateľ. Štandardy CPR nie sú univerzálne a postupy majú slabiny. Existuje skupina zdrojov, ktoré je vhodné pre QRA posúdiť iným postupom. Dotýka sa to prevažne chladom skvapalnených NL. Problematika čpavku je komentovaná v kap. 9, modulu C Bevi [6]. Doposiaľ nie je uvedený postup pre toxické plyny skvapalnené chladom pre vyššie množstvá (nad 1 000 ton). Posledné odporúčanie z roku 2018 na stránkach RIVN (National Institute of Public Health and the Environment) pre horľavé NL sú výpočtové postupy programom SAFETI-NL [12]. Novšie verzie SAFETI-NL od 6.64, sa zameriavajú na presnejšie ohraničenie hraníc individuálneho rizika (IR). Jednou z podmienok nezariadenia zdroja do QRA podľa Bevi je aj podmienka $IR < 10^{-5}$ mimo územia podniku. Cesta spresňovania podmienok IR v SAFETI-NL je založená na spresnení parametrov výpočtu a nie poznání kauzality a podmienok procesu.

FEI a CEI nástroj pre výber zdrojov pre QRA

FEI [7] a CEI [8] pracujú s indexom založeným na dôsledkoch nezávislých od frekvencie udalostí. Metodiky vznikli pred rokom 1999. Ich primárnym účelom nebola selekcia zdrojov pre QRA v zmysle ZPH. FEI je kategorizovaný do piatich kategórií, 1-60, 61-96, 97-127, 128-157 a nad 157. Pre podrobnú analýzu zdrojov metodika odporúča kategóriu zdrojov s $FEI > 157$. Naše skúsenosti s touto metodikou svedčia o zväžení zdrojov s $FEI > 127$. Ani FEI ani CEI nemá spodné ohraničenie počtu posudzovaných zdrojov. FEI má ohraničenie minimálnej tonáže posudzovanej jednotky. V prípade CEI je to aj spôsob úniku NL zo zdroja. Tieto obmedzenia vznikli na základe dlhodobých skúseností a sú zohľadnené dnes aj v CPR štandardoch [4, 5] a Bevi [6] a to formou typu úniku. Pri skladových a procesných nádobách G1 - okamžitý únik, G2 - veľký kontinuálny únik celého obsahu v priebehu 10 minút konštantnou rýchlosťou, G3 - malý kontinuálny únik s otvorom s efektívnym

priemerom 10 mm; pri potrubiach G1 - úplná ruptúra potrubia, G2 - kontinuálny únik otvorom s efektívnym priemerom 10 % z priemeru potrubia).

Výsledky

Nebezpečné chemické látky vo vybraných výrobných procesoch

Existujú výrobné postupy od riedenia vodou až po postupy nitrácie, ktorých náročnosť na aparáty a prevádzkové postupy je rozdielna. Nariadenie 1272/2008/EU [2] definuje nebezpečné vlastnosti chemických látok. Pre výpočet QRA je potrebné zohľadniť toxicitu, horľavosť, výbušnosť chemických látok bez ohľadu na prijímateľa, ktorým je človek, okolie. Na základe získaných poznatkov a skúseností z posudzovania rizík sa pre účel poukázania na problémy selekcie zdrojov pre QRA vybrali prevádzky z čpavkovej chémie - výroba hnojív, metanolová chémia - výroba lepidiel, a benzénová chémia - výroba cyklohexánu. Mnoho takýchto prevádzok existuje samostatne, alebo v rámci väčšieho chemického podniku. Čpavok je základnou chemickou látkou nielen pre výrobu hnojív. Dnes a vyrába prevažne zo zemného plynu, vzduchu (dusíka) a vody. Medziproduktmi pri výrobe hnojív je kyselina dusičná a DAM. Pre kvapalnú hnojivá je základom čpavková voda. Pre tuhé hnojivá je to DAM a anorganické látky (horčík, vápenec, dolomit ap.). Okrem zemného plynu, ktorý je vstupom pre výrobu čpavku je nutné ostatné chemické látky skladovať a manipulovať vo výrobnom procese.

Množstvo uniknutých oxidov dusíka je podmienené zastavením výroby oxidu dusnatého v procese výroby kyseliny dusičnej. Popri čpavku v týchto chemických prevádzkach sa vyrába aj DAM ako finálny produkt, ale aj ako medziprodukt pre nasledovnú výrobu hnojív. Pre výrobu močovinoformaldehydových lepidiel je vstupnou chemikáliou metanol a močovina. Formaldehyd vzniká oxidáciou metanolu.

Chemické podniky neboli vytvorené len pre výrobu jediného produktu. Čpavok, kyselina sírová, kyselina dusičná, metanol, boli už v minulosti sústredované do jedného celku za účelom špeciálnej výroby. Príkladom toho bol výbuch v nemeckom Opau, alebo v Strážskom.

Ako príklad na kombinovanú organickú a anorganickú výrobu je poukázané na technológiu, ktorá využíva hydrogenáciu a oxidáciu a bola v takejto kombinácii v posudzovanom podniku. Cyklohexán sa vyrába hydrogenáciou benzénu. Vodík pre hydrogenáciu sa najčastejšie vyrába kontinuálne parným reformingom zemného plynu. V starších chemických a hutníckych prevádzkach sa vyrábala z čpavku. V prípadoch, že je nutné použiť väčší objem vodíka je nutné mať skladový zásobník. Benzénová chémia je špecifická nielen toxicitou, ale aj náročnosťou na energie a chemické aparáty.

Porovnanie metodík za účelom vhodnej selekcie zdrojov pre QRA

V tab. 1 sú bez ohľadu na umiestnenie na teritóriu podniku, vypočítané hodnoty $A^{T,F}$ podľa rovnice 1 pre vybrané zdroje. Charakteristické zdroje v podnikoch s organickou a anorganickou chémiou sú sklady, stáčanie/plnenie železničných cisterien (ŽC), výrobné aparáty, potrubia. Zdroje v tab. 1 sú vybrané za účelom preukázania problematiky selekcie zdrojov pre QRA a nie za účelom posúdenia konkrétnej prevádzky. Pri konzervatívnom prístupe je možné prijať zjednodušenie a to podmienku ak $L > 100$ m a súčasne $L < 101$ m, potom je $A \cong S$, čo je stav, kedy zdroj je umiestnený 101 m od hranice podniku. Táto myšlienka nie je v rozpore s Bevi. Tento predpoklad umožní nepočítať S a tento stav modelovaný pre účel preukázania problému je postačujúci. Väčšina skladov a stácaní/plnení ŽC je umiestnená mimo hlavné výrobné a priamo susedí s hranicou podniku. Takéto umiestnenie vyplýva z koncepcie logistiky dopravy a bezpečnosti pri prevádzkovaní takýchto chemických podnikov.

Z vypočítaných hodnôt uvedených v tab. 1, podmienku 50 % S_{max} nespĺňa žiaden zdroj. Hodnota S pre zdroj Z6 je vysoká. Druhú podmienku, zaradenie minimálneho počtu piatich zdrojov, budú spĺňať zdroje Z5, Z8, Z4, Z11. Až na zdroj Z11, sklad metanolu, čo sú to zdroje s toxickým dôsledkom pre okolie. Pokiaľ by sa nezohľadnilo poznanie, skúsenosti s horľavými NL, tak by väčšina zdrojov s potenciálom výbuchu, požiaru nebola zaradená do QRA. Nezohľadnenie zariadení pre hydrogenáciu a im podobné reakcie v technologických celkoch považujeme za problémové. Flixborough je dostatočným poučením. Nižšie je poukázané z akých dôvodov.

Tab. 1 Výpočet $A^{T,F}$ pre vybrané zdroje za účelom selekcie pre QRA

Zdroj	NL	Q (t)	O ₁	O ₂	O ₃	G (t)	A ^T	A ^{F,E}	Poznámka
Z1	zemný plyn	2,5	1	1	10	10	-	2,5	potrubie DN 100, 3,0 MPa, 10-min. únik
Z2	zemný plyn	6,5	1	1	10	10	-	6,5	potrubie DN 250, 4,5 MPa, 10-min. únik
Z3	čpavok	500	0,1	1	10	10	-	50	vysokotlaký zásobník
Z4	čpavok	500	0,1	1	10	3	167	-	
Z5	čpavok	10 000	0,1	1	2,2	10	-	220	nízkotlaký zásobník
Z6	čpavok	10 000	0,1	1	2,2	3	733	-	plnenie/stáčanie ŽC
Z7	čpavok	55	1	1	10	10	-	55	
Z8	čpavok	55	1	1	10	3	183	-	potrubie plnenia ŽC, 10-min. únik (55 t.h ⁻¹)
Z9	čpavok	9,1	1	1	10	10	-	9,1	
Z10	čpavok	9,1	1	1	10	3	30,3	-	
Z11	metanol	4 000	0,1	1	1	10	-	40	skladový zásobník
Z12	metanol	60	1	1	1	10	-	6	stáčanie ŽC 60 ton
Z13	metanol	23,7	1	1	1	10	-	2,37	stáčanie kontajner 30 m ³
Z14	benzén	2 000	0,1	1	0,1	10	-	2	skladový zásobník
Z15	benzén	55	1	1	0,1	10	-	0,55	stáčanie ŽC 55 ton
Z16	vodík	1	0,1	1	10	10	-	0,1	sklad, 1 tona
Z17	cyklohexán	30	1	1	0,1	10	-	0,3	oxidačný reaktor 50 m ³ (zmes)
Z18	cyklohexán	500	0,1	1	0,1	10	-	0,5	sklad 500 ton
Z19	cyklohexán	55	1	1	0,1	10	-	0,55	plnenie ŽC 70 m ³

Hodnoty pre určenie LC pre príslušné NL boli z Dossier-ECHA a výpočet O₃ bol na základe Antoinovej rovnice.

V tab. 2 je poukázané na existenciu $S > 1\ 000$ aj v reálnych prevádzkach dnes. Jedná sa o sklady chladom skvapalnených plynov.

Tab. 2 Výpočet $A^{F,E}$ pre vybrané zdroje za účelom selekcie pre QRA [13]

Zdroj	NL	Q (t)	O_1	O_2	O_3	G (t)	$A^{F,E}$	$S^{F,E}$ (200 m)	$S^{F,E}$ (300 m)	Poznámka
Z1	LNG	50 000	0,1	1	5,5	10	2 750	344	101,9	Wuhaogou, Čína
Z2	LNG	150 000	0,1	1	5,5	10	8 250	1031	305,6	Čile, 2013 Austrália, 2015
Z3	LNG	165 000	0,1	1	5,5	10	9 075	1134	336,1	Austrália, 2016

Hodnoty O_3 boli rátané pre prevádzkové teploty $-158\ ^\circ\text{C}$ a pretlak 10 cm vodného stĺpca pre skvapalnený metán.

Aj pri odporúčaní uvedenom v [12] je zrejme, že pre $L > 200$ m bude pre $S_{max} > 1\ 000$. Problémom je, že skladové polia sa v rámci rozširovania podnikov stávajú príťažlivými k podnikom a nie sú samostatné jednotky bez potenciálu domino efektu k okoliu. Hodnoty selektívneho čísla zdrojov Z2, Z3 z tab. 2 aj vo vzdialenosti 200 m sú nad rámec bežných indikačných a selekčných čísel pri selekcii podľa CPR štandardov a Bevi. Pri umiestnení týchto zdrojov mimo obývanú oblasť je možné dosiahnuť hodnotu $IR < 10^{-5}$. V prípade postavenia týchto zásobníkov v existujúcej infraštruktúre prístavu, priemyselnej zóny, alebo v blízkosti chemického komplexu sa požadovaná hodnota IR nedosiahne ani tým, že sa bude spresňovať výpočet pomocou SAFETI-NL. Hodnota IR ani SR nezmení kauzalitu vzniku dôsledku. Potrebné je uvedomiť si, že sklad je potrebné naskladniť a vyprázdniť. K tomu je potrebná infraštruktúra. V prípade porovnania aj so zdrojom Z6 z tab. 1 sú to reálne technologické zdroje s hodnotami prevyšujúcimi hodnoty bežných selektívnych čísel. Pre skladové zásobníky horľavých látok, napr. ropa (sklady s tonážou do 100 000 ton) podľa rovnice 1, je $A^{F,E} \cong 100$. Pri vzdialenostiach do 200 m od zdroja potom bude $S \cong 13$. Takéto hodnoty sú rádovo porovnateľné s chemickými prevádzkami. Výrazný je problém pri skvapalnených stredne toxických plynov. Limitná hodnota G , rovnica 1, pre tieto látky je 1/3 z limitu pre horľavé látky. Príklad je v tab. 1, zdroje Z4, Z6, Z8. To pre zásobník s 10 000 ton čpavku znamená hodnotu $A^T = 733$. Zásobník v Jonava (10 000 ton čpavku) [11] bol postavený v roku 1978 Japonskom. Zásobník v Haife (12 000 ton) bol postavený v roku 1987. Pri pohľade na prístav v Haife je zrejme, že sa v prístave neskladuje len čpavok. Tieto technológie sú reálne a CPR štandard ich nepostihuje ani v Európe. Nízkotlaké sklady

LNG sú aj v Európe a v tonáži nad 150 000 ton. Podobné hodnoty indikačných a selektívnych čísel podľa rovnice 1-3 existujú. Z týchto skutočností sú zrejme slabiny CPR štandardu pri súčasných kritériách pre výber zdrojov pre QRA.

V tab. 3 sú vypočítané charakteristické hodnoty FEI , podľa rovnice 4 a postupu pre výpočet FEI . Zdroje v tab. 3 sú vybrané za účelom preukázania problematiky horľavých NL v kontexte horľavosť-toxicita a požiadaviek FEI ako aj porovnania s CPR štandardom.

Pre zdroj Z17 uvedený v tab. 3, boli vypočítané hodnoty FEI variantne ako pre nábeh, tak aj pre ustálený režim reaktora. Účelom je poukázať na rizikovosť hydrogenácie. Hodnota $FEI > 157$ je mnohokrát podmienená procesnými podmienkami (hydrogenácia) a technologickými prevádzkovými podmienkami. Viaceré zdroje uvedené v tab. 3, Z17a,b, by pri selekcii podľa CPR18E neboli zahrnuté do QRA. Nesplňajú ani kritérium 50 % S_{max} . FEI z pohľadu výbušnosti nie je citlivá na vlastnosť čpavku - výbušnosť, čo je spôsobené nízkou hodnotou MF . Čpavok má hodnotu $MF = 4$ (má nízku reaktivitu). Ak by F_1 a F_2 dosahovali maximálnych teoretických hodnôt potom by $F_1 = 1,85$ a $F_2 < 5,85$ pre sklady. Takéto hodnoty sú pre korodujúce tlakové zásobníky s netesnými prírubami. Toto je v praxi nereálne. Potom by $FEI < 60$. Podľa FEI sú to zdroje, ktorých stupeň rizikovosti je najnižší a zanedbateľný. Táto skutočnosť koreluje s myšlienkou z Bevi, že pre čpavok je nutné rátať len toxický rozptyl. Je to logické, nakoľko koncentrácia dolnej medze výbušnosti pre čpavok je o dva rády vyššia ako koncentrácia pre usmrtenie človeka. Zdroje uvedené v tab. 3, s hodnotou FEI medzi 97-157 sú zdroje

Tab. 3 Charakteristické výstupy z metodiky FEI pre prevádzky aj s horľavými NL

Zdroj	NL	MF	FEI	R [m]	Poznámka
Z1	zemný plyn	21	95	24	potrubie DN 100, 3,0 MPa, 2,5 ton
Z2	zemný plyn	21	126	32	potrubie DN 250, 4,5 MPa, 6,5 ton
Z3	čpavok	4	21	5	vysokotlaký zásobník, 500 ton
Z4	čpavok	4	26	6	nízkotlaký zásobník, 10 000 ton
Z6	čpavok	4	42	11	plnenie/stáčanie ŽC, 55 ton
Z10	metanol	16	76	19	skladový zásobník, 4 000 ton
Z11	metanol	16	119	30	stáčanie ŽC 60 ton
Z12	metanol	16	107	27	stáčanie, kontajner 30 m ³
Z14	benzén	16	129	33	skladový zásobník
Z15	benzén	16	122	31	stáčanie ŽC 55 ton
Z17a	cyklohexán	21	264	61	reaktor oxidácie 50 m ³
Z17b	benzén, vodík	21	189	48	reaktor oxidácie, nábeh 50 m ³
Z17c	vodík	21	148	38	reaktor - dehydrogenácia
Z17d	cyklohexán	21	130	33	destilačná kolóna
Z18	cyklohexán	16	121	31	sklad 500 ton
Z19	cyklohexán	16	92	23	plnenie ŽC 55 ton

Tab. 4 Porovnanie kategórií únikov a dôsledkov pre vybrané metodiky

Únik (kg.s ⁻¹)	CEI	Uniknuté množstvo (kg)			CPR	IAEA-TECDOC-727	
		1 min	2 min	10 min	kategória	kategória	dôsledok
10	176	600	1 200	6 000	G3	CII	výbuch
13	200	780	1 560	7 800	G2	CII	
20	248	1 200	2 400	12 000	G2	CII	
100	556	6 000	12 000	60 000	G1	EIII	toxický rozptyl
200	786	12 000	24 000	120 000	G1	EIII	
300	962	18 000	36 000	180 000	G1	EIII	
330	1 009	19 800	39 600	198 000	G1	EIII	

Čpavok (ERPG2 = 139 mg.m⁻³ staršia hodnota uvedená podľa pôvodného postupu pre výpočet CEI.

s horľavými a výbušnými NL, z ktorých však ani jeden podľa CPR18E a Bevi, tab. 2, by nebol zaradený do QRA. Pre zdroje s čpavkom podľa odporúčania v kap. 3.2.1 modul B, tab. 10, Bevi [6], je nutné vykonať výpočet len pre toxický rozptyl. Táto skutočnosť nie je ošetrená už pri selekcii zdrojov, rovnica 1 a 2, žiadnym odporúčaním, ani obmedzením. Táto skutočnosť je zrejme, ak sa vykoná analýza havárií a zohľadní sa množstvo uniknutého čpavku.

O správnosti predpokladu pre zaradenie zdrojov s toxickým rozptylom pre CEI > 200 do QRA je možné sa presvedčiť. V tab. 4 sú uvedené vypočítané hodnoty CEI podľa rovnice 5 pre unikajúce množstvá 10 až 330 kg.s⁻¹. Sú porovnané s postupmi podľa CPR a IAEA-TECDOC-727 [9].

Pri výpočte dôsledkov podľa CPR, Bevi, sú kvantifikované typy únikov okamžitý a kontinuálny. Kontinuálne úniky sú kategorizované pre úniky do 10 kg.s⁻¹, od 10 až 100 kg.s⁻¹ a nad 100 kg.s⁻¹, (kategórie G1, G2, G3). Hodnoty CEI < 176 je možné porovnať s kontinuálnym únikom do 10 kg.s⁻¹. Pri týchto hodnotách úniku podľa IAEA-TECDOC-727 dochádza k výbuchu. Obdobné porovnanie je možné aj pre ďalšie typy únikov do a nad 100 kg.s⁻¹. Dôležité je to z pohľadu selekcie a hlavne poznania typu dôsledku už v etape selekcie zdrojov pre QRA. Pre čpavok, pri tonáži nad 60 ton, nie je charakteristický výbuch, kategória EIII podľa IAEA-TECDOC-727 [9]. Uvedené je to v tab. 4. CPR18E v selekcii zdrojov pre QRA pre NL, ktoré majú toxické aj horľavé vlastnosti súčasne má rôzne limity pre toxické a horľavé NL. Bevi pri výpočte dôsledkov odporúča už len výpočet toxického rozptylu. To je v súlade s FEI a CEI podľa tab. 4 pri únikoch nad 100 kg.s⁻¹. Tvrdenie o zaradení zdrojov s CEI > 200 do QRA sa zakladá na našich skúsenosti, že únik trvá minimálne 10 min. Z tab. 4 je zrejme, že pokiaľ sa odtrhne príruha na ŽC tak 55 ton bude do 10 min. mimo ŽC a v plynnom skupenstve. To je problém nie len pre obsluhu, ale aj okolie. Obdobným spôsobom je možné vykonať porovnanie pre iné NL s charakteristickou vlastnosťou toxicita-horľavosť

Diskusia

Dnešné chemické technológie sa líšia oproti minulosti nielen produkciou (množstvo, druh) voči stavu z roku 1999. V podnikoch kde sa zachovala pôvodná koncepcia bezpečnosti chemického konceptu (spôsob výroby a miera rizika) nie je metóda selekcie podľa CPR štandardov problémom. Ani z pohľadu vlastností NL horľavosť-toxicita. V minulosti nebola ani v CPR18E dopracovaná myšlienka vlastností NL toxicita-horľavosť. Toto reziduum je aj v Bevi doposiaľ. Vyplýva to z existencie selektívnych čísel, ktoré sú rádovo neporovnateľné s ostatnými selektívnymi číslami, tab. 1 a tab. 2. Zmena konceptu bezpečnosti pri zmenenej produkcii v podnikoch vytvorila tento problém ešte výraznejším. Metódy selekcie pre QRA podľa Bevi [6] je vhodné modifikovať. CPR štandardy boli samostatné štandardy. Bevi manuál sa stal len podpornou príručkou pre SAFETI-NL. Bevi zaradil selekciu až

v module C. V module B je doporučené pre čpavok. Ale explicitne nie je povedané v selekcii, že čpavok nie je nutné rátať na výbuch. Podmienka pre nezaradenie zdrojov s IR < 10⁻⁵ nepreukazuje jasne, že tieto zdroje nebudú príspevkom do hodnoty SR. Je ju možné považovať len za úhybný manéver a neriešenie problému selekcie zdrojov so selektívnym číslom o jeden rád vyšším ako je prevažná väčšina zdrojov v procese selekcie. Ak v štatistickom súbore vznikne odľahlá veličina, tak ju vyradíme. V prípade ZPH je to nemožné. Selekcia zdrojov neslúži len pre účel QRA. Havarijný plánovanie bez kvantifikácie scenárov a opisu kauzality je bezpredmetné. Z tohto pohľadu si aj pri existencii SAFETI-NL a odporúčaní uvedených v Bevi nedovolíme na základe skúseností nezahrnúť niektoré zdroje do QRA.

Odporúčenia pre počet zdrojov pre QRA

Bevi [6] okrem obmedzenia počtu zdrojov pre QRA zdola viac ako 5, nemá obmedzenie zhora. Nie je odporúčaný počet zdrojov pre QRA v závislosti na posudzovanom počte zdrojov v podniku. Táto skutočnosť nedáva odpoveď na otázku aké percento zdrojov je možné očakávať po vykonaní selekcie. Na základe skúseností do roku 2011 [14] bolo pri počte posudzovaných zdrojov do 50 zaradených 2 % zdrojov pre QRA. Pri počte posudzovaných jednotiek medzi 50-100 to bolo 2-5 % zdrojov. Pri počte nad 100 to bolo 5-10 %. Od roku 1999 sa nami vykonalo viac ako 100 posúdení. Posudzovaný rozsah zdrojov v podnikoch bol od 3 500 zdrojov vo veľkých chemických podnikoch, až do 600 zdrojov v hutníckych prevádzkach s chemickými prevádzkami. Pri počte zdrojov 3 500 v podniku so zmiešanou výrobou (organická, anorganická výroba) bolo do QRA zaradených 1,7 %. V podnikoch s cca 1 200 zdrojmi a prevládajúcou organickou chémiou to boli 2 %. V hutníctve s chemickými prevádzkami pri počte zdrojov 600 to boli 2 %.

Obdobne je možné poukázať aj na percento skupiny odporúčenej metódou FEI a CEI pre podrobnú analýzu. Pri percentuálnom zastúpení kategórií FEI, kde hodnota FEI = 159 bola určená ako vzťažná (100 %) je možné vidieť, že pri tvorbe metodiky sa rátao s 37,7 % zastúpením kategórií FEI < 60, s 22,6 % zastúpením kategórií FEI v intervale 61-96, s 19,4 % zastúpením kategórií FEI v intervale 97-127, s 18,8 % zastúpením kategórií FEI v intervale 128-158 a 2,5 % zastúpením kategórií FEI > 159. Percentom kategórie sa FEI rádovo nelíši od CPR štandardov z pohľadu zdrojov pre QRA. FEI sa určuje len pre horľavé a výbušné vlastnosti NL.

Existujú aj NL s toxickými vlastnosťami. Pôvodná metóda kategorizácie CEI rozlišovala škálu CEI od 1 až 1 000. Pri hodnotách CEI > 1 000 sa odporúčalo CEI = 1 000. Na základe skúseností s touto metódou a porovnaním s inými screeningovými metódami sa nami odporúča do QRA zaradiť zdroje s CEI > 200. Viacero NL má horľavé aj toxické vlastnosti. Pokiaľ sa zohľadní aj táto vlastnosť tak do 2 % sa zmesť väčšina posudzovaných NL vhodných pre selekciu QRA. V tomto je zhoda medzi metodikami selekcie,

či novými alebo staršími. Táto skutočnosť je prvotnou informáciou pre posudzovateľa.

Odporúčania pre zohľadnenie zaradenia zdrojov pre QRA

Problémy vznikali pri prevádzkach s výrazne prevládajúcimi vlastnosťami NL toxicita-horľavosť, nie horľavosť-toxicita. V hutníctve prevládal oxid uhoľnatý a decht v rôznych podobách. Takéto NL nevykazujú výrazné rozdiely a CPR štandardy sú vhodné aj za predpokladu, že sa skladujú energeticky využívané plyny v skladoch od 50 000-400 000m³.

V chemických podnikoch s organickou aj anorganickou chémiou je v CPR štandardoch vhodné ošetrené rozhranie horľavosť-toxicita. Nevhodne je ošetrené doposiaľ rozhranie toxicita-horľavosť. V malých podnikoch s prevládajúcim jedným druhom výrobku sa QRA po selekcii zúžilo na jednu, maximálne dve prevládajúce NL, ktoré mali aj horľavé, aj toxické vlastnosti.

Pre sklady chemických látok, akými sú sklady mimo rafinérií je CPR štandard vhodný bez rozdielu skladovanej NL. Ak sa pri selekcii podľa rovnice 1-3 vyskytnú zdroje so selektívnym číslom vyšším o jeden rád a súčasne minimálne jeden zdroj s indikačným číslom A o dva rády vyšším ako väčšina zdrojov je dôvod posúdiť celú selekciu zdrojov aj druhou metódou. V prípade, že sa nejedná len o jeden zdroj so selektívnym číslom o jeden rád vyšším je nutné vytvoriť samostatnú skupinu a posúdiť ju samostatne. Pre obidve skupiny je nutné prijať rovnaké pravidlá. Pre výber metód platí pravidlo diverzifikovania a redundancie metód súčasne. Výber a kombináciu metód pre selekciu zdrojov pre QRA určuje posudzovateľ na základe vedomostí, metód a možností. Poznanie CPR štandardov, Bevi, SAFETI-NL je len minimálnym predpokladom pre správne selektovanie zdrojov pre QRA.

SAFETI-NL má nastavených mnoho predvolených hodnôt, ktoré zjednodušujú výpočet. Nepoznaním jadra problému vznikajú výstupy, ktoré nezodpovedajú realite. Bolo na to poukázané aj v [15] pre jednoduchý príklad BLEVE.

Amoniak doposiaľ prináša pre metódy selekcie niekoľko nezodpovedaných otázok v oblasti selekcie zdrojov pre QRA. V kombinácii s inými NL budú aj výzvou pre nasledujúce obdobie, nakoľko technológie skvapalňovania sa posúvajú nielen v oblasti horľavých NL. Sú známe už aj z minulosti. Problémom je materiálové inžinierstvo, ktoré si doposiaľ s niektorými výzvami v tejto oblasti neporadilo.

Odporúčaná postup pre selekciu zdrojov pre QRA pre účel ZPH

Skúsenosti s indexovými metódami dávajú obraz o možnom zaradení zdrojov do QRA. sú dobrým predpokladom k prijatiu princípu diverzifikácie a redundancie metód selekcie. Ak sa v podniku vyskytujú prevádzky, stáčanie/plnenie, manipulovanie, výroba organických chemických látok, zmesi a tieto NL majú hodnotu materiálového faktora MF = 21 [7], vzniká dôvod pre preskúmanie okolností v prevádzke a potenciáli zaradenia zdroja do QRA. Zariadenia s vysokými prevádzkovými tlakmi a teplotami je nutné taktiež podrobiť iným postupom, aby do selekcie QRA boli vybrané rizikové zdroje. Použitie dvoch nezávislých metód, tab. 4, 6, 7, umožňujú potvrdiť, vyvrátiť, správnosť zaradenia zdroja do QRA.

Existuje veľa screeningových metód založených na morfológickom porovnaní vlastností NL, napr. požiarne zaťaženosť, Hatayamov index, ap., ktoré dávajú rýchly obraz o povahe potenciálnej havárie aj v rámci ZPH. Druhou skupinou screeningových metód sú metódy založené na procesných prístupoch, ktoré sú využívané pri analýzach kontinuity činností pre krízové režimy v podnikoch. Nejedná sa o postupy pre CBA, ale o analýzy slúžiace k zachovaniu prevádzkovania technologického zariadenia v oblasti kritickej infraštruktúry v oblasti chémie, petrochémie, hutníctva.

Nami používaný postup pre selekciu zdrojov pre QRA pre účel ZPH

Zásadou je poznať prevádzku. Vykoná sa podrobná obhliadka prevádzky s konzultáciou s technológmi. Identifikujú sa vonkajšie hrozby. Používa sa upravený švajčiarsky katalóg hrozieb [16] s kvantifikáciou hrozieb. Použije sa CPR18E. V prípade výrazného rozdielu selektívnych a indikačných čísel sa posudzujú odľahlé hodnoty druhou metódou, napr. FEI, CEI ap.. Ak je cieľom aj vytvorenie havarijného plánu a posúdenia vonkajšieho a vnútorného domino efektu, posúdia sa aj zdroje s potenciálom vonkajšieho a vnútorného domino efektu. Kvantifikované podmienky pre tieto dôsledky sú uvedené v [17]. V úvahu sa berú skoronehody, ktoré boli v konkrétnom podniku a ktoré sa vyskytli za posledných 30 rokov.

Záver

V príspevku je poukázané na problematiku selekcie zdrojov v Seveso podnikoch podľa CPR štandardov. CPR18E, Bevi, SAFETI-NL neriešia postačujúco problematiku chladom skvapalnených plynov s vlastnosťami toxicita-horľavosť, akým je čpavok. CPR štandardy od roku 2017 riešia len chladom skvapalnené plyny s vlastnosťami horľavosť, napr. LNG.

Možnosti sú v úprave indikačného čísla a to parametrov G alebo O₃ pri zachovaní postupu selekcie podľa CPR18E pre čpavok. Druhou možnosťou je úprava koeficientu O₃ ako funkcie množstva Q.

Bolo poukázané na obmedzenia počtu zdrojov pre QRA zhora. Možné je očakávať do 2 % z celkového počtu posudzovaných zdrojov bez rozdielu prevládajúcej vlastnosti NL (horľavosť-toxicita alebo toxicita-horľavosť).

Publikovaný bol postup, ktorý je nami používaný pre riešenie tohoto problému. Spočíva v použití druhej metódy v oblasti, kde sú slabiny CPR18E. Ak sa pri selekcii zdrojov pre QRA vyskytnú zdroje so selektívnym číslom vyšším o jeden rád a súčasne minimálne jeden zdroj s indikačným číslom A o dva rády vyšším ako väčšina zdrojov, je dôvod posúdiť celú selekciu zdrojov aj druhou metódou. Pri takýchto prípadoch najčastejšie sú zo selekcie podľa CPR 18E vylúčené horľavé a toxické NL. Z tohoto dôvodu sa používa aj výpočet FEI. Postup je doplnený aj o identifikáciu hrozieb zvonku, nakoľko CPR18E bola vytvorená za účelom preukázania vplyvu na okolie a nie okolia na podnik. Pre účel ZPH je nutné skúmať aj problematiku vplyvu okolia na podnik.

Použitá literatúra

- [1] Smernica európskeho parlamentu a rady 2012/18/EÚ o kontrole nebezpečenstiev závažných havárií s prítomnosťou nebezpečných látok, ktorou sa mení a dopĺňa a následne zrušuje smernica rady 96/82/ES, [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32012L0018>.
- [2] Nariadenie európskeho parlamentu a rady 1272/2008 o klasifikácii, označovaní a balení látok a zmesí, o zmene, doplnení a zrušení smerníc 67/548/EHS a 1999/45/ES a o zmene a doplnení nariadenia (ES) č. 1907/2006 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32012L0018>.
- [3] Pasman, H. J. "History of Dutch process equipment failure fire and the Purple Book", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 24(3), pp. 208-213, 2011. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2010.08.012>.
- [4] Guidelines for Quantitative Risk Assessment - CPR 18E (Purple Book). First edition. Den Haag. Sdu Uitgevers, 1999, 237 s, ISBN 9012087961.

- [5] CPR 18E Guidelines for quantitative risk assessment (PSG3), 2005, [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://content.publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/documents/PGS3/PGS3-1999-v0.1-quantitative-risk-assessment.pdf>.
- [6] Reference Manual Bevi Risk Assessments version 3.2. Netherlands: National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), Centre for External Safety, 2009. 189 s, [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.rivm.nl/documenten/reference-manual-bevi-risk-assessments-version-32>.
- [7] Dow's Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide, 7th Edition, June, 1994, AIChE, ISBN 978-0-8169-0623-9.
- [8] American Institute of Chemical Engineers (AIChE). Dow's Chemical Exposure Index Guide. John Wiley and Sons (Wiley): Hoboken, New Jersey (U.S.), pp. 44, 1998.
- [9] IAEA TECDOC 727, Manual for the classification and prioritization of risks due to major accidents in process and related industries Viena, 1996, Rev.1, ISSN 1011-4289.
- [10] The Times of Israel, Haifa ammonia tank emptied after years-long saga, [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.timesofisrael.com/haifa-ammonia-tank-emptied-after-years-long-saga/>.
- [11] Rupture of a cryogenic ammonia tank, March 20th 1989, Jonova Lithuania (USSR), [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/FD_717_jonova_1989_ang.pdf.
- [12] Kooi, E.S., a kol.: Consequentieonderzoek SAFETI-NL 8 Verschillen in uitkomsten ten opzichte van SAFETI-NL 6.54 en impact daarvan RIVM Rapport 2018-0040. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://rivm.openrepository.com/bitstream/handle/10029/622172/2018-0040.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [13] Notre domaine d'expertise est la construction de réservoirs de GNL. Nous avons participé aux études, à la construction ou à la mise en service de 23 réservoirs cryogéniques dont 21 réservoirs de GNL, [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <http://jmtankconsulting.com/projets-de-nos-consultants/>.
- [14] Tabas, M., Kotek, E.: Využití nového přístupu k selekci zdrojů rizika závažné havárie, [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.bozpinfo.cz/josra/vyuziti-noveho-pristupu-k-selekci-zdroju-rizika-zavazne-havarie>.
- [15] Nico H.W. a kol.: Risk evaluation in Dutch land-use planning, [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.06.002>.
- [16] BABS Rakúsko, Leitfaden KATAPLAN Kantonale Gefährdungsanalyse und Vorsorge, 2013, [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.babs.admin.ch/de/aufgabenbabs/gefaehrdrisiken/ktgefanalyse.html>.
- [17] Kardell, L., Lööf, M.: QRA with respect to domino effects and property damage. Report 5461. Division of Risk Management and Societal Safety, Lund University 2014.

Plán konferencí FBI a SPBI, z.s.

31. leden - 1. únor 2024 Ochrana obyvatelstva

Mezinárodní konference pořádaná ve spolupráci s Fakultou bezpečnostního inženýrství a MV-Generálním ředitelstvím HZS ČR. V programu konference jsou zastoupeny tématické obory: krizový management, ochrana obyvatelstva, ochrana kritické infrastruktury, nebezpečné látky. Cílem konference je vyvolat diskusi mezi odborníky o zapojení moderních technologií do systémů ochrany obyvatelstva.

24. - 25. duben 2024 Bezpečnost a ochrana zdraví při práci

Mezinárodní konference pořádaná ve spolupráci s Fakultou bezpečnostního inženýrství, Ministerstvem práce a sociálních věcí ČR a Výzkumným ústavem bezpečnosti práce, v.v.i. Hlavní témata konference se týkají nových výzev v řízení bezpečnosti práce a procesů.

16. květen 2024 Požární bezpečnost stavebních objektů

Národní konference pořádaná ve spolupráci s Fakultou bezpečnostního inženýrství. Jednání konference je zaměřeno do oblastí týkající se požární bezpečnosti staveb, legislativních postupů při výstavbě, problematiky požárně bezpečnostních zařízení a logických návazností bezpečnostních a protipožárních systémů.

11. - 13. červen 2024 FIRE SAFETY

Požární bezpečnost jaderných elektráren - mezinárodní seminář, který se koná vždy 2 roky v České republice a 2 roky na Slovensku. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, z.s. ho spolupořádá s Fakultou bezpečnostního inženýrství a Slovenskou společností propagace vědy a techniky. Seminář je zaměřený na problematiku požární bezpečnosti jaderných elektráren.

4. - 5. září 2024 Požární ochrana

Mezinárodní konference pořádaná ve spolupráci s Fakultou bezpečnostního inženýrství, Českou asociací hasičských důstojníků, z.s. a MV-Generálním ředitelstvím HZS ČR. Jednání konference je rozděleno do sekcí: Požární ochrana, Technologie pro bezpečnost, Protivýbuchová prevence, Věda a výzkum v požární ochraně, Zkušebnictví v požární ochraně.

Více informací na www.spbi.cz.

VŠB TECHNICKÁ
UNIVERZITA
OSTRAVA

FAKULTA
BEZPEČNOSTNÍHO
INŽENÝRSTVÍ



ZUBOZ
ZNALECKÝ ÚSTAV BEZPEČNOSTI
A OCHRANY ZDRAVÍ, z.ú.