

**GRANOVSKIY E.A**

**LYFAR V.A**

**VORONA A.P**

**BARBUCA I.M**

Naukowe Centrum Badania Ryzyka

„Rizikon”, Severodoneck, Ukraina

dr inż. **Wojciech JAROSZ**

Szkoła Główna Służby Pożarniczej

## **MODELOWANIE EWAKUACJI PODCZAS POŻARÓW BUDYNKÓW – ANALIZA RYZYKA**

### **Modelling the evacuation during fires of buildings - the risk analysis**

#### **Streszczenie**

We współczesnych wielokondygnacyjnych budynkach mających złożoną geometrię, trudno jest określić efektywność systemu ochrony przeciwpożarowej. Wynika to z dużej liczby wariantów powstawania i rozwoju pożarów. Skuteczność i niezawodność systemu ochrony przeciwpożarowej określa się poziomem dopuszczalnego ryzyka znajdujących się w budynku ludzi. Podniesienie poziomu bezpieczeństwa wymaga większych nakładów finansowych.

Artykuł przedstawia program komputerowy „Pożaryz” umożliwiający określanie wskaźników ryzyka na podstawie modelowania dużej ilości wariantów powstawania i rozwoju pożarów w budynkach, z uwzględnieniem prawdopodobieństwa zadziałania lub braku działania systemów ochrony przeciwpożarowej. Program składa się z czterech modułów: Redaktor, CFAST, Ewakuacja i Ryzyko.

Moduł REDAKTOR przeznaczony jest do określania, za pomocą narzędzi graficznych, metrycznych i wektorowych, własności przestrzeni i obiektów.

Moduł CFAST wykorzystuje dwustrefowy model pożaru w budynku. Pozwala on na uzyskanie zmian w czasie parametrów pożaru: mocy źródła pożaru, wydzielania ciepła i produktów spalania, z uwzględnieniem konstrukcji pomieszczeń i otworów, możliwych środków oddymiania i otwarcia/zamknięcia wybranych otworów.

Moduł EWAKUACJA pozwala modelować proces ewakuacji ludzi z budynku przez otwarte otwory i drzwi najkrótszą dostępną drogą z uwzględnieniem przeszkód, charakterystyki przemieszczania się grup, powierzchni

przemieszczania się, gęstości strumieni ludzi, przepustowości wyjść ewakuacyjnych, opóźnienia początku ewakuacji z wielu pomieszczeń.

Moduł RYZYKO określa możliwą liczbę ofiar śmiertelnych i umowne prawdopodobieństwo śmierci podczas pożaru z uwzględnieniem prawdopodobieństwa przebywania człowieka w budynku zgodnie z jego dobowym trybem życia i obowiązkami służbowymi.

Wykorzystanie poszczególnych modułów w jednym wzajemnie zintegrowanym programie pozwala na oszacowanie poziomu bezpieczeństwa przeciwpożarowego budynków. Zastosowane moduły obliczeniowe umożliwiają analizę procesu ewakuacji ludzi, dynamiki rozwoju pożaru i na tej podstawie ocenę poziomu ryzyka obrażeń ludzi znajdujących się w budynku. W przypadku przekroczenia dopuszczalnej wartości ryzyka grupowego, program umożliwia poszukiwanie skutecznych rozwiązań ochrony przeciwpożarowej w budynku w celu obniżenia wyliczonej wielkości ryzyka do dopuszczalnej.

### Summary

In modern multi-storey buildings with a rich geometry, it is difficult to determine the effectiveness of fire protection system. The main reason is the large number of variants of the origin and development of fires. The effectiveness and reliability of the fire protection system is defined by the level of acceptable risk for people in the building. Raising the level of safety usually requires greater financial resources.

This paper presents the software "Pożaryz", which allows to determine the indicators of integral risk based on extensive modeling of creation and development of fires in buildings, including the likelihood of adequate response or lack of fire protection systems. The program consists of four modules: Graphic Editor, CFAST, Evacuation, and Risk.

GRAPHIC EDITOR module is designed to create the properties of space and objects using graphical, metric and vector tools.

The CFAST module uses a two-zone model of fire in the building. It allows to track changes in different parameters during the fire depending of baseline parameters such as the power of the fire, creation of the heat and combustion products as well as other variables like construction of the buildings, openings, smoke removal and possible opening/closing some openings.

EVACUATION module allows to model an evacuation from the building through the open door and the shortest available route, with regard possible obstacles, characteristics of the movement of people, the density of the stream of people, capacity of emergency exits, and delay in the beginning of the evacuation from many places in the building.

RISK module determines the possible number of fatalities and the accepted probability of death during a fire, taking into account the probability of presence of people in the building according to their daily behavior and duties.

The use of individual modules in a one integrated program allows to evaluate the level of fire safety of the buildings. Computing modules allow to assess evacuation processes, fire growth dynamics and finally the level of people risk in the building. If the calculated value of the social risk exceeds the acceptable level, the software may help to search for solutions to increase the fire protection in the building to reduce calculated risk to an acceptable size.

**Słowa kluczowe:** ewakuacja, pożar, program komputerowy Pożaryz, ryzyko;

**Keywords:** evacuation, fire, computer program Pożaryz, risk;

### **Wprowadzenie**

Pożary w budynkach charakteryzują się szybkim rozprzestrzenianiem się czynników niebezpiecznych (wysoka temperatura, ograniczenie widoczności, stężenie O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, i in.). Bezpieczeństwo ludzi znajdujących się w budynku w czasie pożaru może być realizowane przede wszystkim poprzez efektywną ewakuację oraz zastosowanie środków zmniejszających szybkość rozprzestrzeniania się niebezpiecznych czynników pożaru i/lub jego lokalizacji i likwidacji. We wszystkich przypadkach, ludzie powinni opuścić strefę niebezpieczną i budynek przed odcięciem dróg ewakuacji.

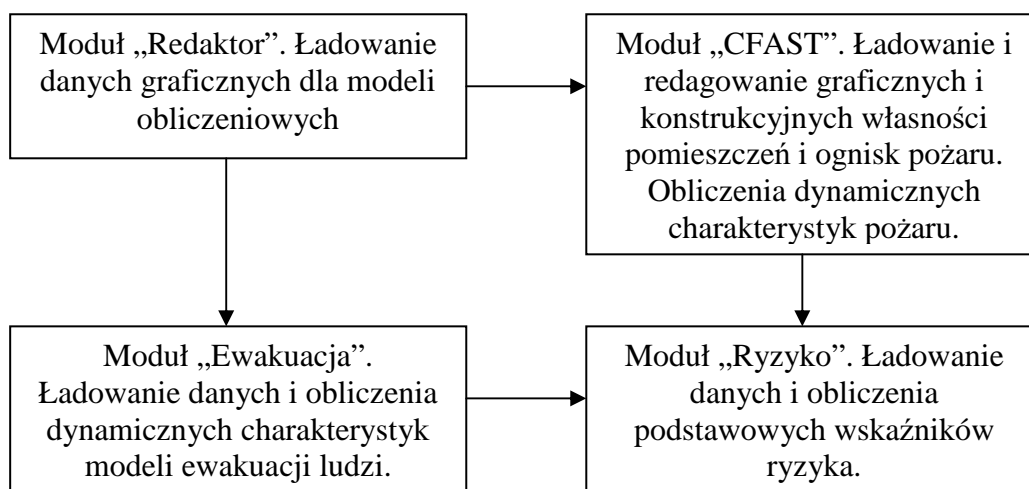
We współczesnych wielokondygnacyjnych budynkach mających złożoną geometrię, zarówno podczas ich projektowania, jak i rekonstrukcji trudno jest określić efektywność systemu ochrony przeciwpożarowej. Wynika to z dużej liczby wariantów powstania i rozwoju pożarów. Skuteczność i niezawodność systemu ochrony przeciwpożarowej określa się poziomem dopuszczalnego ryzyka indywidualnego i grupowego znajdujących się w budynku ludzi [1]. Podniesienie poziomu bezpieczeństwa wymaga niewątpliwie większych nakładów finansowych.

### **Struktura programu „Pożaryz”**

Podczas modelowania ewakuacji, w celu określenia skuteczności zadanych dróg ewakuacji, wybiera się najgorszy wariant pożaru pod względem miejsca jego powstania [2]. W wielopiętrowych budynkach, w których zazwyczaj przebywa duża liczba ludzi, istnieje też dużo wariantów miejsc powstania pożaru. Każde z nich będzie najgorszym miejscem powstania pożaru tylko dla wybranej jednej grupy ludzi. Dlatego do rzetelnej oceny ryzyka potrzebny jest szczególnie dokładny spis możliwych wariantów powstania i rozwoju pożaru w budynku, jak również potencjalnych wariantów ewakuacji.

W tym celu Naukowe Centrum Badania Ryzyka *Rizikon* opracowało program komputerowy umożliwiający wykonanie modelu budynku, modelowanie w nim wielu ognisk pożaru z możliwością zmiany niebezpiecznych czynników pożaru w czasie i przestrzeni, modelowanie ewakuacji ludzi z uwzględnieniem blokady dróg ewakuacji i wyboru dróg nie

zablokowanych, określanie integralnych wskaźników ryzyka. Niżej na rys. 1. pokazano strukturę programu.



**Ryc. 1.** Struktura programu komputerowego „Pożaryz”

**Fig. 1.** The structure of the computer program "Pożaryz"

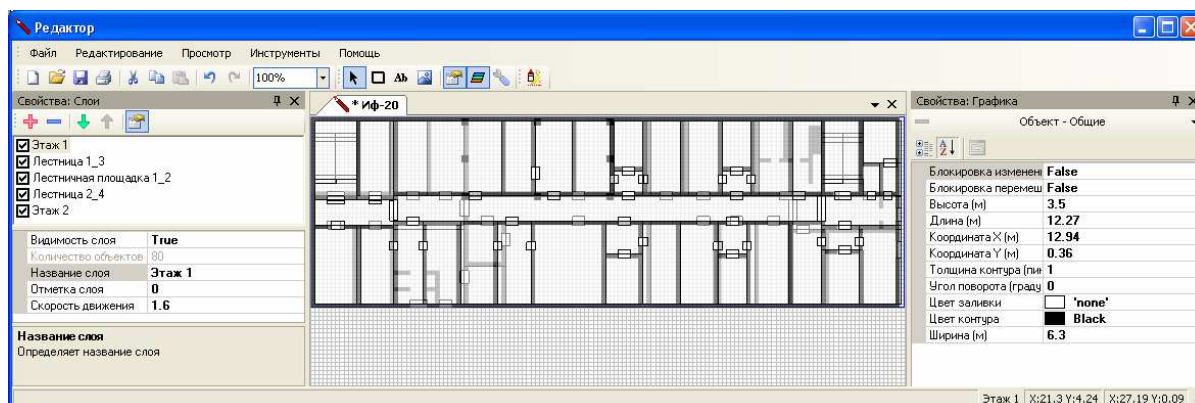
Źródło: Opracowanie własne

Moduł „Redaktor” przeznaczony jest do określania, za pomocą integralnych narzędzi graficznych, metrycznych i wektorowych, własności przestrzeni i obiektów. Umożliwia on:

- utworzenie warstwowych płaskich grup komórek w zadanej metrycznej przestrzeni, w założonym wymiarze i z zadanymi własnościami, drogą dyskredytacji warstwy na podstawie rastrowego obrazu planu warstwy lub wektorowej kombinacji obiektów w przestrzeni 3D,
- utworzenie i redagowanie przestrzeni budynku z możliwością przedstawienia jej w formie wejściowych danych graficznych modelu „CFAST”.

Zbudowana, za pomocą modułu „Redaktor”, trójwymiarowa przestrzeń badanego obiektu umożliwia modelowanie ewakuacji ludzi przez otwarte drzwi wykorzystując model indywidualno-strumieniowy. Zadanie to wykonuje kolejny moduł „Ewakuacja” dający możliwość rozmieszczenia w badanej przestrzeni ludzi. Ta przestrzeń importowana do modułu „CFAST” pozwala obliczyć dynamikę rozprzestrzeniania się niebezpiecznych czynników pożaru w budynku.

Poniżej (Ryc. 2.) przedstawiono plan kondygnacji budynku w zakładzie przemysłowym, utworzony do modelowania pożarów.



**Ryc. 2.** Przykładowy budynek utworzony za pomocą modułu „Redaktor”

**Fig. 2.** An example of a building created with the “Graphic editor” module

Źródło: Program “Pożaryz”

Do modelowania pożarów w budynku stosuje się program „Consolidated Fire Growth and Smoke Transport Model” (model CFAST), który, jak pokazano w pracy Kar’kina [3], odwzorowuje model dwustrefowy, przytoczony w [2].

W module CFAST, opartym na wspomnianym wyżej programie, wykorzystano dwustrefowy model pożaru w budynku. Pozwala on na uzyskanie zmian w czasie parametrów wymienionych w tabeli 1: mocy źródła pożaru, zależności w czasie wydzielania ciepła i produktów spalania, konstrukcji pomieszczeń i otworów, możliwych środków oddymiania i otwarcia/zamknięcia wybranych otworów.

Tabela 1.

**Niebezpieczne czynniki pożaru**

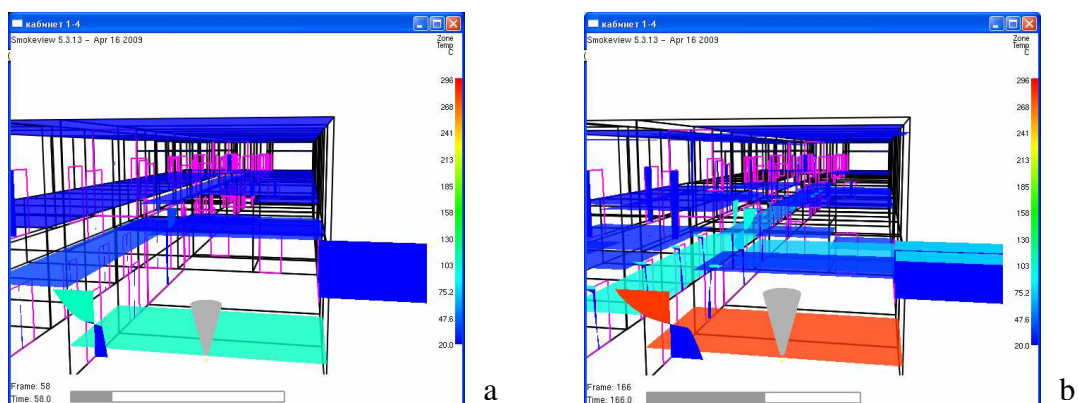
Table 1.

**Dangerous fire factors**

Czynnik niebezpieczny	Znaczenie kryterium
Temperatura	70 °C
Ograniczenie widoczności	0,119 m <sup>-1</sup>
Stężenie O <sub>2</sub>	17,5 %
Stężenie CO <sub>2</sub>	8,5 %
Stężenie CO	1495 ppm
Stężenie HCl	17,8 ppm

Źródło: Model „Consolidated Fire Growth and Smoke Transport Model” (CFAST)

Na Ryc. 3. przedstawiono wyniki obliczeń wielkości temperatur warstw dla różnych czasów trwania pożaru w budynku.

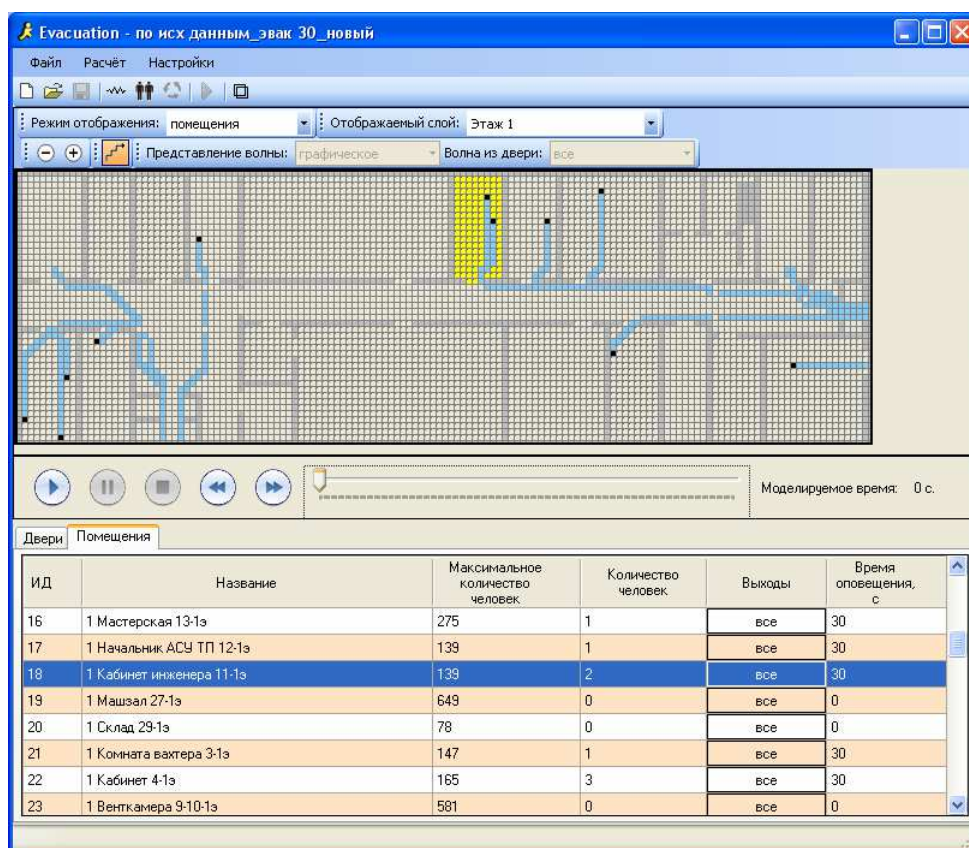


**Ryc. 3.** Wartość niebezpiecznych czynników pożaru w budynku w 58 (a) i 166 (b) sekundzie  
**Fig.** The value of dangerous factors in building a fire in 58 (a) and 166 (b) the second

Źródło: Program „Pożaryz”

Wyniki obliczeń dynamicznych charakterystyk pożaru służą jako podstawa obliczeń różnych wariantów powstania ognisk pożaru w budynkach, zaś moduł „Ryzyko” automatycznie szacuje możliwe obrażenia ludzi drogą synchronizacji dynamiki rozprzestrzeniania się niebezpiecznych czynników pożaru i dynamiki procesu ewakuacji ludzi.

Moduł „Ewakuacja” pozwala modelować proces ewakuacji ludzi z budynku przez otwarte otwory i drzwi najkrótszą dostępną drogą z uwzględnieniem przeszkód, charakterystyki przemieszczania się grup, powierzchni przemieszczania się, gęstości strumieni ludzi, przepustowości wyjść ewakuacyjnych, opóźnienia początku ewakuacji z wielu pomieszczeń. Rezultaty obliczeń mogą być przedstawione w całej przestrzeni budynku w formie dynamicznej (Ryc. 4).



**Рис. 4.** Modelowanie ewakuacji w budynku przemysłowym

**Fig.4.** Modelling evacuation in an industrial building

Źródło: Program „□n□ary”

Moduł „Ryzyko” określa możliwą liczbę ofiar śmiertelnych i umowne prawdopodobieństwo śmierci podczas pożaru z uwzględnieniem prawdopodobieństwa przebywania człowieka w budynku zgodnie z jego dobowym trybem życia i obowiązkami służbowymi. Zakłada się, że prawdopodobieństwo jego obecności w dowolnej komórce przestrzeni budynku jest równe. Warunki prawdopodobieństwa śmierci człowieka podczas każdego pożaru można oszacować (i) jako stosunek powierzchni pomieszczeń, z których ludzie nie zdążyli się ewakuować i zginęli, do całkowitej powierzchni budynku lub (ii) jako stosunek liczby ofiar śmiertelnych do ogólnej liczny ludzi w budynku. Prawdopodobieństwo pożaru w każdym z potencjalnych miejsc jego powstania w ciągu jednego roku określa się stosując zasadę, że sumaryczne prawdopodobieństwo powstania choćby jednego pożaru w ciągu jednego roku jest równe statystycznemu prawdopodobieństwu powstania pożaru w budynkach jednego typu. W obliczeniach dla każdego pożaru uwzględnia się czas rozpoczęcia ewakuacji, miejsce powstania pożaru, systemy alarmowania i prawdopodobieństwa zadziałania zastosowanych środków ochrony (oddymiania, gaszenia

pożaru i □n.). Niżej w tabelach 2. i 3. przytoczono wyniki analizy wpływu niektórych środków ochrony na wskaźniki indywidualnego ryzyka podczas pożarów w budynkach produkcyjnych.

Tabela 2.

**Wpływ skuteczności systemu alarmowania w budynku na indywidualne ryzyko pożarowe**

Tabel. 2.

**Influence the effectiveness of the alarming in the building at the individual risk of fire**

Wskaźnik	Czas ewakuacji, s	Liczba poszkodowanych ludzi	Ryzyko indywidualne
System alarmowania, typ 2	222,4	104	1,686E-3
System alarmowania, typ 3	164,5	44	7,133E-4

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 3.

**Przykład wpływu systemu oddymiania na indywidualne ryzyko pożarowe.**

Tabel. 3.

**An example of the impact of smoke exhaust system on the individual risk of fire**

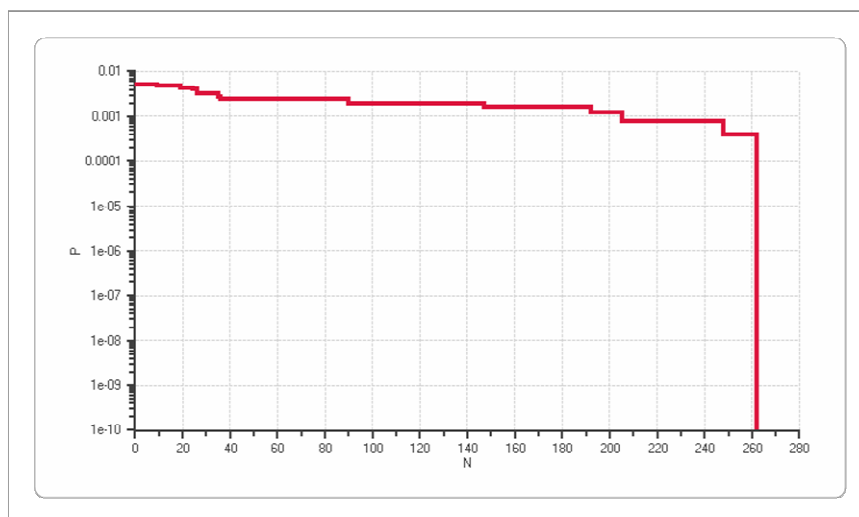
System oddymiania	Liczba poszkodowanych ludzi	Ryzyko indywidualne
7-krotnej wymiany powietrza	0	0,000E+0
5-krotnej wymiany powietrza	7	1,135E-4
Brak systemu oddymiania	44	7,133E-4

Źródło: Opracowanie własne

W ten sposób program pozwala, używając listy technicznych i organizacyjnych rozwiązań zastosowanych w danym budynku, określać minimalną liczbę tych rozwiązań, przy której ryzyko indywidualne będzie niższe niż przyjęte dopuszczalne.

Dla wielu możliwych rozwiązań ustala się znaczenie indywidualnego ryzyka śmierci od pożaru w budynku w ciągu jednego roku. Uwzględniając prawdopodobieństwo realizacji każdej sytuacji buduje się wykres F-N, umożliwiający oszacowanie ryzyka grupowego (Ryc. 5).





**Ryc. 5.** Wykres F-N śmierci ludzi podczas pożaru w budynku administracyjnym

**Fig. 5.** Figure F-N social risk during a fire in the office building

Źródło: Opracowanie własne

## Podsumowanie

Program ma strukturę modułową. Wykorzystanie poszczególnych modułów w jeden wzajemnie zintegrowanym program, pozwala na oszacowanie poziomu bezpieczeństwa przeciwpożarowego budynków. Zastosowane moduły obliczeniowe umożliwiają analizę procesu ewakuacji ludzi, dynamiki rozwoju pożaru i, na tej podstawie, ocenę poziomu ryzyka obrażeń ludzi znajdujących się w budynku. Jeśli określona wartość ryzyka grupowego przekracza dopuszczalną, na przykład liczba szacunkowa ofiar śmiertelnych przekracza 10 osób, program umożliwia poszukiwanie skutecznych rozwiązań ochrony przeciwpożarowej w budynku w celu obniżenia wyliczonej wielkości ryzyka do dopuszczalnej.

## Literatura

1. Federalnyj zakon Rossijskoy Federacii Nr 123-F3 „Tekhnicheskij reglament o trebovaniakh pozharnoy bezopasnosti”
2. Metodyka opredelenia raschotnykh welichin pozharnowo riska w zdaniyakh, sooruzheniakh i stroyeniakh pazlichnykh klassov funkcyonalnoy pozharnoy opasnosti, utw. prikazom MCS Rossyi ot 30.06.2009 Nr382

3. Kar'kin I.N, Kontap' N.A., Gpachev V.J., CITIS 2-09. Metodicheskiye rekomendaczi po ispolzowaniiy programmy CFAST.-OOO „SISIS”, 2009, s. 63.

**Edward A. Granovsky**, Ph.D, Ukraine. In 1965 graduated from Kazan Chemical Technology Institute. In 1978 dissertation on "Investigation of flame propagation and its limits in the gases that form soot". From 1968 to 1993 he worked at the All-Union Scientific Research Institute for Safety in the chemical industry. From 1986 to 1993 - head of the laboratory to prevent explosions and crash protection process in this institute. From 1993 the present Director General of the Scientific Center of Risk Investigations "Rizikon".

**Alexander Vorona**, Ukraine. In 1998 graduated from East Ukraine Volodymyr Dahl National University. Since 1998, the programmer, and from 2011 Head department of modeling and software development in the Scientific Center of Risk Investigations "Rizikon". Specialization - the development of software systems and information technologies in the field of industrial safety and risk analysis.

**Vladimir Lyfar**, Ph.D., Ukraine. In 1984 graduated from Odessa State University named after I. I. Mechnikov. From 1992 to 1996, lecturer of the East Ukraine Volodymyr Dahl National University. From 1996 to 2011 worked as Head of department of modeling and software development of the Scientific Center of Risk Investigations "Rizikon".

**Igor Barbutsa**, Ukraine. Graduated in 1986 Vinnitsa Polytechnic Institute. From 1994 to 2002 he worked in Vinnitsa Regional Association for the Protection of Labour. In 2000, the qualification: a technical expert on industrial safety. From 2003 to date Deputy Director of the Scientific Center of Risk Investigations "Rizikon".

**Wojciech Jarosz**, PhD, fire officer. In 1993 graduated from The Main School of Fire Service in Warsaw. In 2006 dissertation on *Environmental hazards caused by the phenomena slopover and boilover during fires of tanks containing hydrocarbon liquids* in Warsaw University of Technology. From 1993 to present has worked at The Main School of Fire Service as assistant, laboratory head and deputy dean.

#### Recenzenci

prof. dr hab. Mirosław Kosiorek

dr inż. Paweł Oleszczak