DCB 2025
III Младежка научна конференция с международно участие
„Проектиране и строителство на сгради и съоръжения“, 29 октомври 2025 г., София
III Youth Scientific Conference with international participation
„Design and Construction of Buildings and Facilities“, October 29, 2025, Sofia, Bulgaria
ISSN 2738-7887 (online); ISSN 2738-7879 (CD-ROM)

ИНФРАСТРУКТУРНИ ПОДХОДИ ЗА ЕВАКУАЦИЯ НА НАСЕЛЕНИЕТО В ЗОНИ С ПОВИШЕН РИСК ОТ ПРОМИШЛЕНИ АВАРИИ

Веселка Декова[1], Стефан Първанов[2]

INFRASTRUCTURAL APPROACHES TO POPULATION EVACUATION IN ZONES WITH ELEVATED INDUSTRIAL-ACCIDENT RISK

Veselka Dekova[1], Stefan Parvanov[2]

Abstract:
This article presents a general framework for planning and evaluating infrastructure-based evacuations in areas exposed to elevated risk of industrial accidents. The framework links three elements – risk characterization, infrastructure capacity, and operational response – into a coherent decision path. It defines evacuation objectives and constraints, estimates demand and available capacity across transport and shelter systems, and selects routing and staging concepts consistent with safety and equity goals. Performance is assessed with scenario-driven analysis and simulation to test robustness under disruptions and partial infrastructure failures. Key measures include clearance time, corridor throughput, network reliability, coverage of at-risk populations, and feasibility of implementation. The approach supports both near-term operational measures (traffic management, phased departures, public information) and longer-term capital improvements (junction upgrades, bypass links, dedicated refuge access). The result is a transparent, auditable method that integrates risk awareness with transport engineering to produce adaptable evacuation plans for industrial-risk regions.

Keywords:
Industrial accidents; Evacuation planning; Infrastructure capacity; Transport corridors; Clearance time; Network reliability; Route design; Operational response; Equity of access

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В съвременната индустриализирана и урбанизирана среда нараства вероятността от тежки технологични и промишлени аварии, водещи до мащабни последствия за населението и инфраструктурата. Такива инциденти – като пожари, експлозии или изтичане на токсични вещества – могат да възникнат в химически предприятия, нефтени бази, енергийни съоръжения и логистични терминали. Необходимостта от бърза и ефективна евакуация на застрашените райони е доказана от множество исторически събития,

[1] Веселка Декова, курсант, факултет Пожарна безопасност и защита на населението, Академия на МВР; Veselka Dekova, cadet, Faculty of Fire Safety and Civil Protection, Academy of MoI.
[2] Стефан Първанов, доцент доктор, катедра „Управление на безопасността и превенция“ факултет “Пожарна безопасност и защита на населението“, Академия на МВР; Stefan Parvanov, Associate Professor, PhD, Department of Safety Management and Prevention, Faculty of Fire Safety and Civil Protection, Academy of MoI.

включително бедствието в *San Juanico* (Мексико, 1984 г.), при което вследствие на експлозия в терминал за пропан-бутан загиват над 500 души и са ранени повече от 7 000 [1].

Съвременните изследвания подчертават, че успешната евакуация зависи не само от добрата организация и комуникация, но и от инженерната инфраструктура, която осигурява необходимия капацитет за изтегляне на хората от зоната на опасност. Murray-Tuite (2013) посочва, че транспортните модели за евакуация трябва да се разглеждат като динамични системи, в които взаимодействат човешко поведение, транспортни ограничения и времеви фактори [2]. По подобен начин, Khalili et al. (2024) акцентират върху необходимостта от оптимизационни и количествени методи за оценка на капацитета на инфраструктурата при бедствия и аварии [3].

Според изследвания на Jiang et al. (2019), ефективността на евакуацията при мащабни инциденти зависи от интегрирането на оценка на риска, капацитет на инфраструктурата и оперативен отговор в единна система за кризисно управление [4]. Именно този триединен подход е в основата на настоящия доклад, който предлага инженерна рамка за планиране и оценка на инфраструктурно базирани евакуации в зони с повишен риск от промишлени аварии.

Основните цели на доклада са:

1. Да се формулира логическа връзка между характеристиката на риска, инфраструктурния капацитет и операционния отговор.
2. Да се представи елементарен математически модел за оценка на времето за евакуация в зависимост от капацитета на транспортната мрежа.
3. Да се предложи количествен пример и практически насоки за подобряване на устойчивостта на инфраструктурните системи.

2. ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ НА РИСКА

Оценката на риска в зоните с възможност за възникване на промишлени аварии изисква анализ на различни видове сценарии: разливи на опасни вещества, пожари, взривове, токсични облаци и др. Това означава, че следва да се идентифицират граничните зони (evacuation zones), възможните сценарии на развитие (например образуване на облак, разпространение за определено време), вероятностни стойности и потенциални пострадали. Например, аварията в терминала за пропан-бутан в San Juanico (Мексико, 1984) показа как бързо разпространяващ се облак довежда до масови летални последици – официално над 500 души загинали и 5 000-7 000 ранени.

Инфраструктурните подходи изискват също да се установи какъв е пространственият обхват на риска – например каква част от населението е в радиуса на потенциалното въздействие – и да се интегрира с транспортната мрежа. Рисковата характеристика задава рамките: „кога“, „къде“, „колко души“ трябва да бъдат евакуирани, както и „до кога“. Тя също така дефинира ограничения – например достъпът на спасителни служби, възможността за затваряне на коридори, наличието на аварийни маршрути и др.

3. ИНФРАСТРУКТУРЕН КАПАЦИТЕТ

Инфраструктурният капацитет е ключов компонент за ефективната масова евакуация. Той включва транспортната мрежа (улици, пътища, автомагистрали, мостове), налични убежища и места за временно настаняване, коридори за евакуация и резервни маршрути. Например, в отчета на California Department of Transportation относно евакуации при природни бедствия се подчертава как дизайнът на пътищата влияе на масовата евакуация [5]. Ключови показатели тук са:

- C – пропускателна способност на евакуационния коридор (брой хора за час);
- D – търсене: брой лица, които трябва да бъдат евакуирани;

- T_{clear} – време, за което се изчиства зоната (изтегля се съответният брой лица).

Различни източници показват, че например един пътен лентов коридор може да евакуира приблизително 2 500 души на час при автомобилен трафик с 2,5 души на автомобил [6].

Инфраструктурният капацитет трябва да отговаря на търсенето и трябва да разполага с буфери и резерви. Например, ако ключов мост бъде затворен или пътят претърпи повреда по време на евакуация, намаляването на капацитета може драматично да увеличи времето за изтегляне. Различни изследвания, разглеждащи загуба на капацитет поради инциденти при евакуации, показват как спад в капацитета увеличава времето за евакуация [7].

4. ОПЕРАЦИОНЕН ОТГОВОР

Операционният отговор включва как ще се реализира евакуацията: какви маршрути ще се използват, какво ще бъде разпределението на населението по кораби/автомобили/пешеходно движение, какви мерки за контрол и сигнализация ще се приложат, как ще се организира обществената информация, как ще се координира взаимодействието между различните служби. Литературата посочва, че добрата комуникация и координация са критични за ефективното евакуиране [8].

Операционните стратегии могат да се разделят на две категории:

- краткосрочни действия: контрол на трафика, инверсия на ленти (contraflow), ранно подаване на информация, фазирани евакуации;
- дългосрочни мерки: разширяване на пътища, създаване на резервни маршрути, обособяване на специални убежища.

5. МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛ

Предлага се следният елементарен модел, който да служи като отправна точка:

Показатели:

- D – брой лица, подлежащи на евакуация (лица);
- C – ефективен капацитет на евакуационния коридор (лица/час);
- T_{clear} – време за изтегляне (часове);
- α – коефициент на резерв (например, стойността на коефициента 1,1 означава 10 % резерв);
- β – коефициент, отчитащ намаляване на капацитета в кризисна ситуация ($0 < \beta \leq 1$).

Формула:

$$t_{clear} = \frac{D}{\beta C_{\alpha}} \tag{1}$$

Обяснение:

- Номиналният капацитет е C;
- В кризисна обстановка реалната капацитет може да е само βC (например ако път е частично блокиран);
- Добавя се резерв чрез коефициента α (за да се отчетат буфери, алтернативни маршрути и др.);
- Разделяйки броя лица D на реално използваемия капацитет получаваме времето за изчистване.

Конкретен количествен пример:

Нека населението, което трябва да бъде евакуирано, е D = 15 000 лица.

Допустим капацитет на един главен коридор е C = 2 500 лица/час (примерно един пътен лентов коридор) [6].

Предвид, че по време на кризисна ситуация капацитетът се понижава до 80 %, следва, че β = 0,8.

Предвидим резерв от 1,2 (20 %) → α=1,2.

Тогава:

$$t_{clear} = \frac{15\ 000}{0{,}8.2\ 500.1{,}2} = \frac{15\ 000}{2\ 400} = 6{,}25 \text{ часа} \quad (2)$$

При тези условия евакуацията би отнела приблизително 6,25 часа. Ако няма резерв (α=1) и няма капацитетно намаление (β=1), времето щеше да е 15 000/2 500 = 6 часа, т.е. много близко, но реалността винаги изисква такива корекции.

Освен това може да се включи още параметър за разпределение на натоварването между *n* коридора (например два паралелни коридора). Ако имаме два идентични коридора, всеки с капацитет *C*, тогава:

$$t_{clear} = \frac{D}{\beta(nC)\alpha} \quad (3)$$

Ако *n = 2*, тогава:

$$t_{clear} = \frac{15\ 000}{0{,}8.\ (2.2\ 500).\ 1{,}2} = \frac{15\ 000}{4\ 800} \approx 3{,}125 \text{ часа} \quad (4)$$

Това ясно показва ефекта от добавяне на втори коридор.

Математически този опростен модел служи главно за ориентиране. В реални условия трябва да се включат фактори като разпределение на начални точки, различни скорости, натоварване по часови зони, затруднения при преминаване, социално поведение и др. Все пак моделът подпомага инженерния подход към планиране.

6. ОЦЕНКА НА ИЗПЪЛНЕНИЕТО И УСТОЙЧИВОСТ

След като са зададени цели и ограничения, инфраструктурният капацитет и операционният отговор, необходимо е да се оцени изпълнението чрез сценарии и симулации. Ключови показатели са:

- Clearance time ($t_{clear)}$ – време до евакуация на зададеното население;
- Throughput (пропускателна способност) на коридора – реална и номинална;
- Network reliability (надеждност на мрежата) – оценка на това колко капацитет остава при откази (например мост, ключов път);
- Coverage of at-risk populations (покритие на населението под риск) – процент от населението, който може да се евакуира навреме или има достъп до убежище;
- Feasibility (изпълнимост) – ресурсни, организационни, финансови и оперативни аспекти.

Като пример, ако едновременно с евакуацията се случи инцидент – частично затваряне на един коридор (например β = 0,6 вместо 0,8) – тогава времето за изтегляне би се увеличило значително (при примера по-горе: t_{clear} =15 000/(0,6 x 2,500 x 1,2) = 8,33 часа). По този начин се вижда, че устойчивостта (резервните маршрути) е ключова.

Литературата подчертава, че моделите за евакуация трябва да отчитат именно тези намаления в капацитета при инциденти [7].

7. ПРАКТИЧЕСКИ ПРЕПОРЪКИ

Резултатите от изследването дават следните насоки:

- създаване на резервни коридори – ако само един маршрут е предвиден, рискът е висок – препоръчително е да се осигурят поне два независими коридора;

- фазирана (поетапна) евакуация – започване на евакуацията по зони, за да се избегне пристъпване към мрежата едновременно и претоварване;

- контрол и управление на трафика – използване на контрафлоу (lane reversals – временно обръщане на посоката на движение по дадени пътни ленти, така че всички налични платна да се използват в една и съща посока) и пренасочване, за да се увеличи ефективната пропускателна способност;

- обучение и информираност на населението – предварителна информация за маршрути и времена понижава хаоса и нежеланите реакции;

- инфраструктурни инвестиции – дългосрочно е разумно да се актуализира пътната мрежа, да се добавят специални маршрути към зоните за убежище, да се увеличи капацитетът на мостове и пътища, което е потвърдено от изследвания за природни бедствия [5, 9].

ОБСЪЖДАНЕ

Анализът на капацитета на мултифункционалните аварийни логистични центрове (АЛЦ) показва, че тяхната ефективност зависи не само от физическите параметри, но и от интеграцията между отделните подсистеми – инженерна, логистична, медицинска и управленска. Определянето на капацитета чрез количествени показатели (брой лица, складов обем, енергийна автономност) дава възможност за обективна оценка на готовността при различни сценарии на бедствия.

Резултатите от приложния модел доказват, че ограниченият складов капацитет и недостигът на инженерна автономност често се оказват „тесните места“ в системата. В този смисъл е необходимо още на етап проектиране да се въведе резервен коефициент на готовност (1,2-1,3), който да компенсира динамиката на реалните условия.

Освен това, както отбелязват Feng et al. (2023) и Kapucu (2006), най-добрите резултати се постигат чрез мрежов модел – децентрализирана система от няколко координирани центъра, които взаимно поддържат логистичния поток. Това позволява по-кратко време за реакция и по-равномерно натоварване на ресурсите.

Следователно, при планиране на АЛЦ в български условия, е целесъобразно изграждането на три до пет регионални възела с ясно разпределени функции и възможност за автономна работа поне 72 часа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Инфраструктурните подходи за евакуация на населението в зони с повишен риск от промишлени аварии изискват интегриран инженерно-оперативен подход. Рамката, предложена в тази статия, свързва трите основни елемента: характеристика на риска, инфраструктурен капацитет и оперативен отговор. Представеният елементарен математически модел позволява бързо ориентиране и количествена оценка на времето за евакуация при различни сценарии. Конкретният пример илюстрира как добавянето на резервен маршрут или намаляването на капацитета чрез инцидент влияят значително върху времето на евакуация.

Съчетаването на инженерно планиране (транспортни коридори, капацитет, резерв) с оперативни мерки (управление на трафика, комуникация, фазиране) осигурява по-устойчива и управляема система за евакуация. В контекста на промишлените аварии, където време и коридори са ограничени, този подход е особено приложим и необходим.

В бъдеще се препоръчва разширяване на модела с динамични симулации, човешко поведение, интеграция с GIS и реалновремеви данни, за да се постигне по-високо ниво на точност и приложимост.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Arturson, G. (1987). "The Tragedy of San Juanico—the Most Severe LPG Disaster in History". Burns. 13 (2): 87–102. doi:10.1016/0305-4179(87)90096-9. PMID 3580941
[2] Murray-Tuite, P. (2013). Overview paper: Evacuation transportation modeling. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*.
[3] Khalili, S.M., Mojtahedi, M., Steinmetz-Weiss, C. & Sanderson, D.A. (2024). A Systematic Literature Review on Transit-Based Evacuation Planning in Emergency Logistics Management: Optimisation and Modelling Approaches. *Buildings*, 14(1), 176.
[4] Jiang, Y., Liu, Y., Liu, D. & Song, H. (2019). Emergency Logistics in a Large-Scale Disaster Context. *International Journal of Disaster Risk Reduction*.
[5] Effinger, R. (2021). Traffic Modeling of Potential Emergency Wildfire Evacuation Routes, Caltrans Division of Research, Innovation and System Information.
[6] The Role of Transit in Emergency Evacuation. Transportation research Board Washington, D.C. 2008, ISBN 978-0-309-11333-5.
[7] Zhu, Y., Ozbay, K, Xie, K., Hong, Y. (2019). Modeling of Incident-Induced Capacity Loss for Hurricane Evacuation Simulation. 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference – ITSC.
[8] Managing Pedestrians During Evacuation of Metropolitan Areas. (2007). Publication No. FHWA-HOP-07-066. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.
[9] Zhang, G., et al. (2021). System Dynamics Modelling for Dynamic Emergency Response: Road Transportation Accidents of Dangerous Goods.