

ИНТЕГРИРАН ТЕХНИЧЕСКИ АНАЛИЗ НА МЕРКИТЕ ЗА ИНДУСТРИАЛНА СИГУРНОСТ И ПОЖАРНА БЕЗОПАСНОСТ ПРИ ЕКСПЛОАТАЦИЯ НА СЪДОВЕ ПОД НАЛЯГАНЕ

Доц. д-р Али Чакър

Варненски свободен университет „Черноризец Храбър“ – филиал Смолян

Резюме: Статията разглежда комплексната инженерна защита и техника на безопасност при експлоатация на съдове под налягане, подложени на термично въздействие от външен пожар. Научното изследване се базира на детерминистичен подход и експертен нормативен анализ на техническите и организационни бариери за сигурност, стъпвайки върху реални примери от практиката. Дефинирана е научна хипотеза, според която рискът от катастрофално разрушаване (BLEVE) може да бъде съществено ограничен чрез превантивно управление на топлинното въздействие и координирано действие на активните системи за защита. Анализирана е уязвимостта на конструктивната стомана в горната „суха зона“ на съда и значението на ограничаването на температурата на корпуса за предотвратяване развитието на пластични деформации. Разгледани са надеждността на предпазните клапани (PRV) и ефективността на автоматизирани водно-дренчерни инсталации като взаимосвързани елементи на системата за инженерна защита. Моделът интегрира и външните фактори на средата, като влиянието на подпочвените води и свлачищните процеси върху стабилността на фундаментите. В заключение са предложени практически алгоритми за евакуация на персонала и изисквания към личните предпазни средства (ЛПС), които гарантират сигурността на производствената площадка и на аварийно-спасителните екипи.

Ключови думи: съдове под налягане, техника на безопасност, пожарна безопасност, BLEVE, предпазен клапан (PRV), водно оросяване, евакуация, лични предпазни средства (ЛПС), подпочвени води, индустриален риск

INTEGRATED TECHNICAL ANALYSIS OF INDUSTRIAL SAFETY AND FIRE PROTECTION MEASURES FOR PRESSURE VESSELS OPERATION

Assoc. Prof. Dr. Ali Chakar

Varna Free University "Chernorizets Hrabar" - Smolyan Branch

Abstract: *The paper examines the integrated engineering protection and occupational safety of pressure vessels subjected to thermal stress from external jet fires. The scientific study is based on a deterministic approach and expert normative analysis of technical and organizational safety barriers, drawing on real-world industrial case studies. A scientific hypothesis is formulated according to which the risk of catastrophic failure (BLEVE) can be significantly reduced through preventive management of thermal exposure and the coordinated operation of active protection systems. The vulnerability of structural steel in the upper “dry zone” of the vessel and the importance of limiting the shell temperature to prevent the development of plastic deformation are analyzed. The reliability of pressure relief valves (PRV) and the effectiveness of automated water deluge systems are considered as interconnected elements of the engineering protection system. The model also integrates external environmental factors, such as the impact of groundwater and landslide processes on foundation stability. In conclusion, practical algorithms for personnel evacuation and requirements for personal protective equipment (PPE) are proposed, ensuring the safety of both the industrial site and the emergency rescue crews.*

Key words: *pressure vessels; occupational safety; fire safety; BLEVE; pressure relief valve (PRV); water spray; evacuation; personal protective equipment (PPE); groundwater; industrial risk.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

1.1. Актуалност на проблема: Аварии със съдове под налягане в условия на пожар в химическата индустрия

В съвременната химическа, нефтена и енергийна промишленост се съхраняват и транспортират огромни обеми от втечнени газове под налягане (LPG, LNG, амоняк, хлор). Рискът от възникване на пожар в технологичните площадки е постоянен източник на опасност. Когато съд под налягане бъде обхванат от външен пожар, той е подложен на екстремен топлинен интензитет. Проблемът е силно актуален, тъй като

конвенционалните системи за безопасност често се оказват недостатъчни при т.нар. „ефект на доминото“, където първоначален пожар води до разрушаване на оборудването и последваща масивна експлозия. Изследването на взаимодействието между топлинните потоци и механичната якост на стоманата е критично за предотвратяване на тежки промишлени инциденти. Физическият механизъм и мащабите на последствията при разрушаване на съдове с втечнени пари се дефинират и класифицират на база на утвърдените международни модели за управление на последствията при BLEVE инциденти [1].

За определяне на топлинните натоварвания и планиране на защитните зони около подобни високорискови съоръжения съществено значение имат методиките за изчисляване на плътността на топлинното излъчване, времето за запалване при лъчист топлообмен и определянето на безопасни пожарозащитни разстояния спрямо допустимите критични прагове [17, 18, 19, 20].

Реални примери от практиката:

- **Катастрофата в Сан Хуанико, Мексико (1984 г.):** Изтичане на втечнен нефтен газ (LPG) предизвиква огромен пожар в терминал на Pemex (*Petróleos Mexicanos*: държавната нефтена компания на Мексико и една от най-големите корпорации в Латинска Америка). Топлината от пожара обхваща съседните сферични и цилиндрични резервоари. Тъй като водно-оросителните системи се оказват неефективни под деструктивния топлинен поток, се задейства верижна реакция от серия от десетки BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion. На български терминът се превежда като „Взрив на разширяващите се пари на кипяща течност“) експлозии. Инцидентът води до над 500 смъртни случая, хиляди ранени и пълно унищожение на обекта, превръщайки се в най-цитирания пример за необходимостта от пасивна огнезащита.
- **Инцидентът във Фейзин (Feuzyin), Франция (1966 г.):** По време на рутинна операция по вземане на проба от сфера с пропан възниква изтичане и последващ пожар под резервоара. Предпазният клапан се задейства правилно, но пламъците нагряват горната "суха" част на сферата (където няма течност, която да абсорбира топлината). Металът губи част от якостните си свойства и съдът се разрушава с BLEVE приблизително 90 минути след началото на аварията. Този случай променя завинаги правилата за пожарна безопасност, доказвайки, че само предпазен клапан не може да спаси съд под налягане в условия на директен огън.

- **Взривът на жп цистерна във Вейовауега (Weyauwega), САЩ (1996 г.):**
Дерайлиране на влак води до скъсване на релси и пожар, захранван от изтичащ пропан. Три цистерни под налягане остават заклещени в епицентъра на огъня. Благодарение на навременната евакуация на целия град (около 1700 души) няма жертви, но цистерните претърпяват BLEVE експлозии. Осколки от корпусите политат на разстояние от **над 300 метра**, демонстрирайки огромната кинетична енергия, която се освобождава при мигновеното втечняване и разширение на прегретия газ.

1.2. Същност на феномена BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*) и деструктивен потенциал

Феноменът BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*) представлява физически взрив, възникващ при внезапно разхерметизиране на съд, съдържащ прегрята течност под налягане. Основният механизъм се задейства, когато външен пожар нагрее корпуса на резервоара и отслаби механичната якост на стоманата в нейната суха, горна зона. При последващото катастрофално разцепване на съда налягането спада мигновено, което предизвиква взривно кипене и преминаване на цялата течност в газова фаза за милисекунди. Внезапното разширяване на обема на флуида генерира мощна въздушна ударна вълна и изхвърля тежки метални осколки на разстояние от стотици метри. Когато съхраняваният агент е запалим втечен газ, освободените маси се възпламеняват моментално, оформяйки гигантско огнено кълбо с интензивно лъчисто греене.

1.3. Литературен обзор

Инженерното проектиране на съвременни системи за сигурност стъпва върху фундаменталните научно-приложни методи за оценка на професионалния риск и трудовата безопасност. Утвърдените подходи за идентификация на опасностите се прилагат успешно както при автоматизирани процеси в леката промишленост, така и при тежки индустриални производства с висока степен на термичен риск [4, 5]. Особено значение за превенцията на травматизма имат нормативните изисквания за внедряване на лични предпазни средства (ЛПС) и управлението на специфични рискове на работната среда [7, 8].

Тъй като аварията от типа BLEVE изискват незабавна локализация, алгоритмите за безопасност включват и концепции за защита на аварийно-спасителните екипи в условия на пространствена опасност [9].

Интегрирането на тези общи изисквания позволява създаването на комплексен модел за сигурност, който обвързва техническия контрол на оборудването с индивидуалната защита на персонала. Комплексното разглеждане на инженерните решения във връзка с условията на експлоатация и енергийните процеси намира приложение и при проектирането на индустриални сгради [12]. Освен директното термично въздействие върху металния корпус на съдовете под налягане, от критично значение за цялостната индустриална сигурност е и носимоспособността на носещите стоманобетонни конструкции и фундаменти. Изследването на механичната якост, деформационните характеристики и ограничаването на натисковата зона при стоманобетонни елементи, както и прилагането на съвременни методи за усиление с композитни материали (напр. армиран с карбонови влакна полимер - CFRP), осигуряват необходимата конструктивна устойчивост на съоръженията при извънредни натоварвания и аварийни ситуации [13, 14, 15, 16].

1.4. Цел и задачи на научното изслед

Основната цел на научното изследване е **да се извърши комплексен термодинамичен и механичен анализ на риска от възникване на BLEVE аварии при съдове под налягане, експлоатирани в условия на пожарна опасност.**

За постигането на тази цел първата задача е да се моделира математически процесът на топлинен трансфер от външния източник на огън към корпуса на резервоара и съхранявания в него флуид.

Втората задача е свързана с количествена оценка на изменението в якостните характеристики на конструктивната стомана при екстремно нагряване и определяне на критичното време до разрушаване на съда.

Третата задача предвижда изследване на пропускателната способност на предпазните клапани и ефективността на комбинираните активни и пасивни системи за инженерна защита и пожарогасене.

Крайната приложна задача е разработването на практически препоръки и алгоритми за оптимизация на техниката на безопасност и аварийните инструкции за защита на персонала на производствената площадка.

2. Методология на изследването

Научно-методическата рамка на изследването се базира на системен нормативен и експертен анализ на съществуващите технически бариери за сигурност при съдове под налягане. [5]

Методологията прилага сравнителен подход за оценка на съответствието на производствените площадки спрямо действащите държавни наредби за минимални изисквания за здраве и безопасност на труда. [4], [5].

В изследването се използва детерминистичен метод за анализ на риска, стъпващ на утвърдени в практиката факти за поведението на предпазните клапани и водно-оросителните системи при термично въздействие. [3]

Оперативната сигурност на персонала и аварийните екипи се оценява чрез структуриран анализ на алгоритмите за евакуация и използването на лични предпазни средства. [8], [9].

Този комплексен подход позволява идентифициране на слабите звена в организацията на труда и предлагане на конкретни, организационно достъпни решения за повишаване на пожарната безопасност. [4], [5]

Методологичният модел съобразява и влиянието на външните геодинамични рискове върху целостта на индустриалната инфраструктура. Анализира се деструктивното въздействие на подземните води върху якостно-деформационните свойства на строителните почви, както и динамиката на свлачищните процеси при технологични и сеизмични натоварвания, които могат да компрометират стабилността на фундаментите на съдовете под налягане [10],[11].

3. Анализ на техническите мерки за безопасност и експлоатационна надеждност

Експлоатационната безопасност разчита на предпазни клапани за аварийно изпускане (PRV), автоматизирани системи за детекция на течове, ESD клапани за изолация и пасивна защита чрез обваловки.

3.1. Конструктивна уязвимост на съдовете под налягане

Особено уязвима при външно пожарно въздействие е горната „суха зона“ на съда, където повишаването на температурата на стоманения корпус води до намаляване на якостните характеристики на материала и повишава риска от развитие на пластични деформации. При излагане на външен пожар металът в горната част на резервоара бързо губи своите якостни свойства поради липсата на вътрешна течност, която да абсорбира топлината. Термичният стрес води до прогресиращо изтъняване на стените под натиска

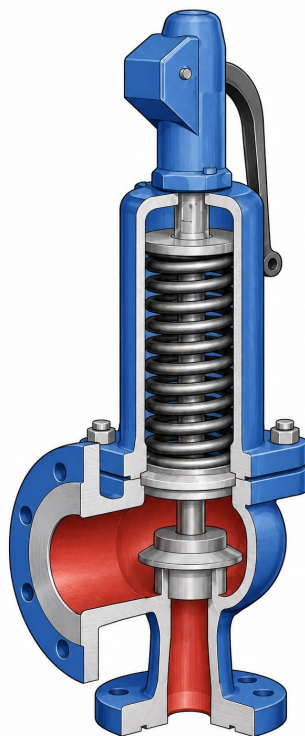
на вътрешното налягане, което налага незабавно инженерно противодействие. Този фундаментален риск от разрушаване на целостта е пряко обвързан с общите индустриални изисквания за експлоатационна безопасност на съоръжения под високо налягане и температура.

3.2. Предпазните клапани за аварийно изпускане (PRV)

Експлоатационната безопасност на съдовете под налягане в пожароопасна среда зависи пряко от правилната настройка, оразмеряване и пропускателна способност на предпазните клапани за аварийно изпускане (PRV: Pressure Relief Valve) (Фиг.1).

На български език терминът се превежда като **предпазен клапан срещу свръхналягане** (или *клапан за освобождаване на налягането*). Това е автоматично защитно устройство, което предпазва съда (резервоар, котел или цистерна) от експлозия, когато вътрешното налягане се покачи над безопасните граници (например в условия на пожар).

Принципът на действие е следният: когато налягането достигне критичната стойност, клапанът се отваря автоматично, изпуска част от флуида (газ или пара) и след понижаване на налягането се затваря.



Фигура 1. Клапан за аварийно изпускане PRV

Техническите изисквания налагат предпазните клапани да се задействат автоматично при превишаване на работното налягане с не повече от 10%, осигурявайки бързо освобождаване на натрупаната енергия в атмосферата. [2, 5]. Критично правило в техниката на безопасност е извеждането на изпускателните тръби на клапаните на безопасна височина и посока, за да се предотврати насочването на излизащия газ към други съоръжения или зони с персонал.

3.3. Автоматизирани системи за ранно откриване на течове

Превантивната защита изисква внедряване на автоматизирани системи за ранно откриване на течове чрез мрежа от газосигнализатори, разположени в най-ниските точки на площадката, където тежките газове се концентрират.

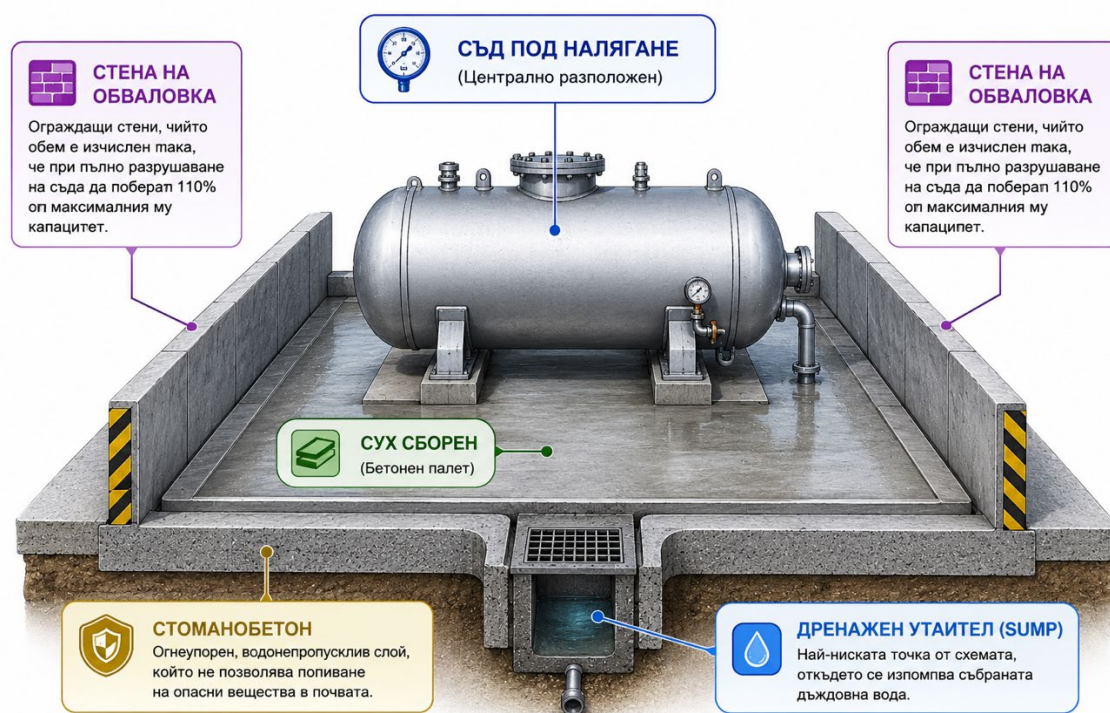


Фигура 2. Принципна технологична схема на автоматизирана дренчерна инсталация с дренчерен клапан (Deluge Valve) за охлаждане и защита на индустриални съдове под налягане

При засичане на опасна концентрация, системите за безопасност трябва мигновено да активират автоматични спирателни кранове (ESD), които да изолират компрометирания съд и да спрат притока на горими флуиди.

3.4. Пасивни мерки за пожарна защита

Като пасивна конструктивна мярка около съдовете задължително се изграждат стоманобетонни защитни стени или диги (обваловки), проектирани да задържат евентуални разливи и да ограничат мащаба на външния пожар.



Фигура 3. Принципен конструктивен разрез на защитна стоманобетонна обваловка за пасивна пожарна защита на съдове под налягане

4. Системи за пожарна безопасност и техника на безопасност

4.1. Организация на активното водно оросяване чрез автоматизирани водно-дренчерни инсталации

Автоматизираните водно-дренчерни инсталации представляват основен елемент на активната пожарна защита на съдове под налягане срещу термично въздействие [3]. Системата следва да се задейства възможно най-бързо след регистриране на пожара,

така че да ограничи нагряването на корпуса още в началния етап на аварийното развитие. Необходимият интензитет на водното оросяване се определя в зависимост от характеристиките на защитавания съд, пожарното натоварване и проектните изисквания, като в практиката се прилагат стойности от порядъка на 10 l/min/m². Приоритетно значение има охлаждането на горната „суха зона“ на резервоара, където липсата на вътрешна течност води до по-бързо нагряване на металния корпус.

4.2. Алгоритъм за действие, евакуация на персонала и лични предпазни средства (ЛПС)

При получаване на автоматичен сигнал за пожар или критично налягане, целият неангажиран персонал незабавно преустановява работа и се евакуира по предварително разчертани и осветени безопасни маршрути.

Сборните пунктове за евакуация се разполагат на открито, извън зоната на потенциално термично излъчване от евентуално огнени кълба и извън обсега на летящи осколки.

Техниката на безопасност изисква дежурните оператори да задействат дистанционно системите за безопасност и да потвърдят пълното хидравлично изолиране на аварийния участък.

Аварийно-спасителните екипи, които извършват локализация на пожара, задължително използват специализирани ЛПС, включително тежки топлозащитни костюми от алуминизиран плат срещу лъчиста топлина.

Задължително е използването на автономни дихателни апарати със сгъстен въздух (изолиращи противогази) за защита на белите дробове от токсични газове и продукти на горенето.

Ръководителят на аварийно-спасителната акция координира действията си с екипите на ПБЗН, като следи непрекъснато показателите за налягане до пълното охлаждане на корпуса на съда.

5. Анализ на ефективността на мерките за индустриална сигурност и пожарна безопасност на съдове под налягане

Ефективността на защитата при съдове под налягане изисква паралелно интегриране на активни и пасивни инженерни бариери.

- *Автоматичното водно оросяване* е най-надеждното средство за предотвратяване на деформация в сухата зона на съда, съгласно спецификациите за проектиране [3].
- *Пропускателната способност на предпазните клапани (PRV)* гарантира сигурността на съоръжението само при своевременно ограничаване на външния топлинен интензитет [2].
- *Внедряването на бързодействащи ESD кранове* елиминира риска от разрастване на аварията и блокира преноса на флуиди по тръбопроводите.
- *Организационната готовност* на персонала и правилният избор на ЛПС минимизират влиянието на човешкия фактор по време на инцидент, съобразно общите изисквания за безопасност [5, 6].
- *Комбинираното прилагане* на тези технически мерки осигурява надеждна защита на критичната индустриална инфраструктура и ограничава риска от катастрофални взривове [1].

6. Научна хипотеза

Изследването се основава на научната хипотеза, че рискът от катастрофално разрушаване от типа BLEVE при съдове под налягане може да бъде съществено ограничен чрез превантивно управление на топлинното въздействие и координирано действие на активните системи за защита.

Хипотезата предполага, че своевременното задействане на автоматизираните водно-дренчерни инсталации ограничава повишаването на температурата на металния корпус и забавя загубата на якост в горната „суха зона“ на съда.

Поддържането на температурата на корпуса под критичните за конструктивната стомана стойности намалява вероятността от развитие на пластични деформации и последващо разрушаване на съда.

В рамките на разглеждания модел се приема, че съвместното действие на водното охлаждане, бързодействащите ESD клапани и правилно оразмерените предпазни клапани (PRV) позволява ограничаване на топлинното и хидравличното натоварване върху съоръжението.

Проведеният анализ има за цел да оцени доколко комбинираното прилагане на тези технически мерки може да ограничи развитието на аварийния процес и да повиши безопасността на персонала и индустриалната инфраструктура.

7. Заключение

Анализът на индустриалната практика показва, че самостоятелното действие на предпазните клапани не е достатъчно за осигуряване на надеждна защита на съдовете под налягане в условия на директен пожар.

Практическият опит потвърждава, че своевременното водно оросяване на горната „суха зона“ на резервоара е ефективна мярка за ограничаване на нагряването и намаляване на риска от структурна деформация на метала.

Своевременното задействане на автоматизирани водно-дренчерни системи има съществено значение за ограничаване на термичното въздействие върху съоръжението.

Изграждането на бетонни обваловки и защитни диги представлява важна пасивна мярка за ограничаване на разливите, разрастването на пожара и риска от последващи аварийни събития.

Внедряването на бързодействащи ESD клапани осигурява технологично изолиране на аварийния участък и ограничава преноса на опасни флуиди.

Редовното практическо обучение на персонала за евакуация и осигуряването на подходящи специализирани ЛПС допринасят за намаляване на риска за персонала и аварийно-спасителните екипи при промишлен инцидент.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Abbasi T., Abbasi S.A. The Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE): Mechanism, Consequence Assessment, Management. Journal of Hazardous Materials, Vol. 141, No. 3, 2007, pp. 489–519. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.09.056;
2. Birk A.M. Hazards from Propane BLEVEs: An Update and Proposal for Emergency Responders. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 9, No. 2, 1996, pp. 173–181. DOI: 10.1016/0950-4230(95)00046-1;

3. NFPA 15. Standard for Water Spray Fixed Systems for Fire Protection. National Fire Protection Association, Quincy, MA;
4. Тризлова Н.Д., А.Киров, Особенности на техниката на безопасност на станция "Калцинация" на Solvey - SODI - гр.Девня при производство на калцинирана сода, Научен алманах на ВСУ "Ч.Храбър", серия Архитектура и строителство, 2010, Варна, ISSN 1311-9222 (кн.4);
5. Киров А., Н.Д. Тризлова, Проблеми при обезпечаване безопасни условия на труд при експлоатация на системи и съдове, работещи при високо налягане и температура, Научен алманах на ВСУ "Ч.Храбър", серия Архитектура и строителство, 2010, Варна, ISSN 1311-9222 (кн.4);
6. Мустафа Йоздоган, Нели Тризлова, Изследване техниката на безопасност на труда в производството на пластмасови изделия чрез шприцоване, VII Международна научна конференция "АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО – СЪВРЕМЕННОСТ", 2015 г., Варна, България; ISSN 2367-7252;
7. Ali Cinar, Neli Trizlova, Safety engineering in the construction sector, VII international scientific conference, "Architecture, civil engineering – modernity", 2015, Varna, Bulgaria, ISSN 2367-7252;
8. Özdemir D., Demir M., Hocaoglu I.H., Turgut O., Panicharov G., Kirov A., Georgieva A., Trizlova N., Chakar A. Study on Asbestos Dismantling and Personal Protective Equipment Usage in Construction. International Scientific Conference "Architecture, Civil Engineering – Modernity", Varna, 2017, pp. 440–446.
9. Osman Turgut, Neli Trizlova, Safety at the work of rescue crews in GSM base stations, International conf. of civil engineering, IX, Варна, 2016, ISBN 978-954-92866-7-0;
10. Пейчев. В., Д.Димитров, А.Киров, Н.Тризлова, Влияние на подземните води върху якостно – деформационните свойства на свързани строителни почви, V-та международна научна конференция Архитектура, строителство – съвременност, 2011, Варна, ISSN1314-3816;
11. Паничаров Г., Н.Тризлова, Динамика на свлачищни процеси при динамични въздействия, 6-та международна научно – приложна конференция: „Архитектура, строителство – съвременност”, ВСУ „Ч.Храбър”, Варна, 2013, ISSN: 1314-3816;
12. Ениманев И. Физически начала на енергоефективно индустриално строителство. Сборник доклади, Академия за иновации и развитие – АИР, с. 206–218, ISBN 978-619-91298-9-0.

13. Михалева, Д., Павлов, Ив., Игнатиев, Н., Носеща способност на срязване при усиляване на стоманобетонни греди със странични вертикални ивици от армиран с карбонови влакна полимер съгласно БДС EN 1998-3:2005 и ACI 440.2R-08, Научен алманах на ВСУ "Черноризец Храбър", серия „Архитектура и строителство“, кн. 5, Варна, стр. 36-45, 2011, ISSN: 1311-9222, 1313-7239.
14. Павлов, Ив., Михалева, Д., Игнатиев, Н., Носеща способност на срязване при усиляване на стоманобетонни греди с U-образни вертикални ивици от армиран с карбонови влакна полимер съгласно БДС EN 1998-3:2005 и ACI 440.2R-08, Научен алманах на ВСУ "Черноризец Храбър", серия „Архитектура и строителство“, кн. 5, Варна, стр. 46-56, 2011, ISSN: 1311-9222, 1313-7239.
15. Михалева Д., Павлов Ив., Еквивалентна правоъгълна работна диаграма на ограничен бетон, VIII Международна научна конференция по архитектура и строителство ArCivE 2017, Варна, стр. 308-314, 2017, ISSN: 2535-0781.
16. Павлов Ив., Михалева Д., Носимоспособност на огъване на стоманобетонни греди с правоъгълно напречно сечение и ограничена натискова зона, VIII Международна научна конференция по архитектура и строителство ArCivE 2017, Варна, стр. 315-319, 2017, ISSN: 2535-0781.
17. Прешелков Б., Анализ на методиките за сравнително определяне плътността на топлинното излъчване спрямо допустимата плътност. - Актуальные проблемы обеспечения безопасности в российской федерации [часть 4], ГОУ ВПО Уральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург, 2010, с. 43÷45.
18. Прешелков Б., Време на запалване на горимите материали при лъчист топлообмен - литературен преглед. – Факултет „Пожарна безопасност и защита на населението“, Бюлетин брой 23, София, АМВР, 2016, с. 61÷75.
19. Прешелков Б., Номограма за определяне на пожарозащитни разстояния. - Научен алманах на ВСУ "Черноризец Храбър", 6/2006, Варна, 2006, с. 153÷159.
20. Прешелков Б., Денчев Н., Димитров С., Обобщен подход за определяне безопасни разстояния от въздействието на топлинно излъчване. – Втора научна конференция "Пожарната и аварийната безопасност`2003" [Сборник доклади], София, 2003, с. 133÷139.