DCB 2023

II Младежка научна конференция с международно участие
„Проектиране и строителство на сгради и съоръжения“, 09-10 ноември 2023г., София

II Youth Scientific Conference with international participation
„Design and Construction of Buildings and Facilities“, November 09-10, 2023, Sofia, Bulgaria
ISSN 2738-7887 (online); ISSN 2738-7879 (CD-ROM)

ОБЗОР НА ИНЦИДЕНТИ И АНАИЗ НА МЕХАНИЗМА ЗА ВЪЗНИКВАНЕ НА ЯВЛЕНИЕТО BOILOVER

Евгений Иванов [1], Димо Димов [2]

REVIEW OF INCIDENTS AND ANALYSIS OF THE BOILOVER MECHANISM

Evgeniy Ivanov [1], Dimo Dimov [2]

Abstract:
This article defines the boilover phenomenon as a detrimental process observed in the storage of diverse substances such as petroleum products, alternative fuels, food, and essential oils. It delves into the theoretical underpinnings and the mechanism driving its occurrence. Presenting a comprehensive survey of boilover incidents in large-scale reservoirs worldwide and it identifies key factors triggering this phenomenon.

Keywords:
Boilover, Fire, Heat transfer, Mass burn rate

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Суровините, междинните и крайните продукти в рафинериите се съхраняват в резервоари преди да бъдат транспортирани към съответните потребители. Поради присъщите физико-химични свойства на съхраняваните вещества и материали, възможните рискове от пожар са големи. Пожарите в резервоари за съхранение представляват голяма опасност и редица от тях водят до смъртни случаи, материални загуби и замърсяване на околната среда. Пожари в резервоари, съдържащи течни въглеводороди, могат да доведат до явление, което генерира изхвърляне на големи количества гориво а именно boilover. Това явление може да се категоризира като най-опасния сценарий при пожари в резервоари.

Разбирането на явлението boilover и горенето на различни горива и масла е от съществено значение за безопасността и предотвратяването на потенциални последици за населението, икономиката и околната среда. Пожарите, включващи посочените материали, могат да бъдат изключително опасни и унищожителни, затова е важно да се изследват техните механизми и да се разработят адекватни концепции за контрол и гасене на такива

[1] Евгений Иванов, старши преподавател, катедра Управление на безопасността и превенция, факултет Пожарна безопасност и зашита на населението, Академия на МВР, Александър Малинов №1, https://www.mvr.bg/academy;
Evgeniy Ivanov, senior lecturer, Department of Safety Management and Prevention, Faculty of Fire Safety and Civil Protection, Academy of MI, A. Malinov №1, https://www.mvr.bg/academy.
[2] Димо Димов, курсант, факултет Пожарна безопасност и зашита на населението, Академия на МВР, Александър Малинов №1, https://www.mvr.bg/academy;
Dimo Dimov, cadet, Faculty of Fire Safety and Civil Protection, Academy of MI, A. Malinov №1, https://www.mvr.bg/academy.

пожари. Резултатите от изследванията могат да бъдат приложени при проектирането и изграждането на сгради, съоръжения и промишлени инсталации, които съхраняват или работят с такива материали, както и при прогнозирането на инциденти.

Целта на настоящето изследване е да се разгледат и анализират явлението boilover и изгарянето на различни течности като алтернативни горива, нефтени продукти, хранителни и етерични масла. Изследването е фокусирано върху подобряване на безопасността, на база увеличаване на теоретичните познания в областта на изгарянето на течности в резервоари.

Задачите за постигане на целта са дефиниране на явлението boilover, изясняване на механизмите за неговото възникване и анализиране на инциденти с неговото проявление до такава степен, която позволяват наличните знания.

Предмет на изследването е горенето на нефтопродукти, алтернативни горива, хранителни и етерични масла в резервоари при специфични условия, когато е наличен воден подслой.

Методика: Методите на изследване, използвани в работата са информационно проучване, теоретичен анализ, анализ на специализирани литературни източници и експертна оценка.

2. ДЕФИНИЦИЯ НА ЯВЛЕНИЕТО BOILOVER

Пожарът е един от най-разрушителните сценарии на инцидент при съхранение на нефтопродукти, хранителни и етерични масла. Boilover е термин, използван за описание на стихийното проявление на пожари в резервоари при съхранение на такива вещества. Този феномен възниква при специфични условия, когато водният подслой започва да се изпарява, причинявайки внезапно изхвърляне на горящо гориво извън пределите на резервоара. Този разлив може да доведе до разпространение на пожара към съседни резервоари и постройки, създавайки ефект на доминото.

В основата на boilover е наличието на слой вода или друга незапалима течност, който обикновено се намира под слоя на запалимата течност в резервоара (фиг. 1). При пожар, топлината от пламъците се предава към запалимата течност и постепенно достига до водния слой. Тази топлина кара водата да кипи и да се превърне в пара. Важно е да се отбележи, че парата заема много по-голям обем от водата от която произлиза, което създава значително налягане под слоя на горящата течност.

С течение на времето, налягането се увеличава до точка, където вече не може да бъде сдържано. В този момент, слоят от горяща течност над водата може да бъде изхвърлен нагоре и навън от резервоара с голяма сила и скорост. Този процес не само увеличава обема на пожара значително, но и разпръсква горящата течност в широк радиус, което може да доведе до нови огнища на пожар и разпространение на огъня към съседни съоръжения или обекти.

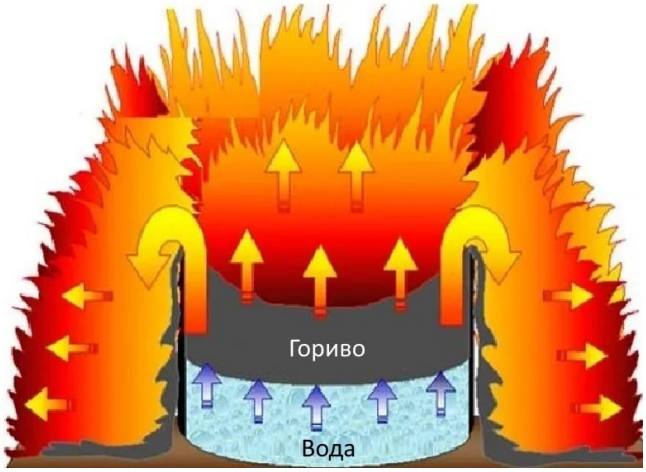
Една от основните опасности на boilover е непредсказуемостта и бързото развитие на ситуацията. Това изисква висока степен на бдителност, прогнозируемост и готовност от страна на службите за пожарната безопасност. Превенцията включва дизайн на резервоари, който предотвратява или ограничава възможността за boilover, предвиждане на безопасни разстояния, редовни проверки за целостта на резервоарите, както и системи за наблюдение и автоматично ликвидиране на пожари. Реакцията на пожарните екипи трябва да бъде изключително прецизна и технически обезпечена, тъй като стандартните методи за гасене на пожари може да не са ефективни и дори да влошат ситуацията.

Boilover представлява сериозна заплаха за безопасността и имуществото, като може да доведе до значителни материални загуби, екологични щети и, за съжаление, и до човешки жертви. Поради тази причина, разбирането, предотвратяването и подготовката за борба с този феномен са критични аспекти на индустриалната безопасност и управление на риска [1].

3. ТЕОРЕТИЧНИ ОСНОВИ И МЕХАНИЗЪМ ЗА ВЪЗНИКВАНЕ НА ЯВЛЕНИЕТО BOILOVER

Boilover е негативно явление при пожари, което може да се наблюдава при горене на нефт, нефтопродукти, алтернативни горива, хранителни и етерични масла както в големи резервоари, така и средни по размер. То се характеризира с внезапното и принудително изхвърляне на гориво, което води до значително интензифициране на пожара и образуването на огнено кълбо.

В резервоарите където се съхраняват течности, които при пожар са склонни към boilover, често се образува воден подслой в долната им част поради различни причини, като например кондензационни ефекти или пожарогасителни действия. При горенето на веществата топлината, освободена от пламъка, загрява в дълбочина незапаленото гориво до точката на кипене на водния подслой. Този слой може да се нарече „горещ слой“. При продължително горене този слой се премества в дълбочина като различни изследвания установяват предаване на енергия равна на 2% от енергията на горене по посока на водния подслой (фиг. 1).



Фигура 1. Принципен механизъм на явлението boilover.

Когато водният подслой акумулира определено количество топлинна енергия, той започва да се изпарява. Интензивното отделяне на водни капчици в зоната на горене води до увеличаване интензивността на горене и площта на масообмен, необходима за процеса на горене. Най-опасният ефект от изпаряването на водния слой е изхвърлянето на гориво от резервоара. Гориво се изхвърля в три основни форми (фиг. 2):

а) „Разпенване“ е непрекъснато отделяне на гориво от пяна от резервоара от едната страна на стената му.

б) „Изплискване“ е непрекъснато отделяне на гориво с ниска интензивност (разливане) от резервоара по стените му, подобно на „ефекта на търкаляне“, възникващ по време на пълненето на резервоара.

в) „Изкипяване“ е принудително изхвърляне на гориво, което води до огромно разширяване на огъня и образуване на огнени кълба.

а) запенване б) изплискване в) изкипяване

Фигура 2. Основни форми на изхвърляне на гориво от резервоара.

Изхвърлянето се отнася до разливане по цялата външна повърхност на съдържание на резервоара. Разсипването на изгарящото гориво създава значителна опасност за околната среда – оборудване и хора. Blinov и Khudyakov [2] в ранните си проучвания съобщават за образуване на гореща зона в горивния слой (суров нефт и керосин) по време на процеса на изгаряне. Механизмът на образуване на такава гореща зона в масления слой разглежда процеса на дестилация на маслените компоненти и топлопроводимостта към водния подслой и стените на резервоара. Явлението е доста сложно и е обект на интензивни изследвания. Първоначално терминът се отнася до пожари в резервоари, но се прилага и за изгарянето на тънки слоеве масло, за да се ограничи разпространението на разлива след случайно изпускане. Сценарият обикновено се нарича тънкослоен boilover. И двата случая са донякъде различни по своята същност, но често срещаният елемент е водата, кипяща на границата гориво/вода, и неконтролираният характер на горивния процес. От друга страна, дебелите слоеве образуват „горещи зони“, което води до нисък разход на гориво. Дебелите изгарящи слоеве провокират експлозивни феномени за разлика от тънкослойните случаи, показващи плавни настъпвания на boilover и висок разход на гориво. Тези постановки генерират общ въпрос относно времето за възникване, т.е. времето, необходимо на термичната вълна да достигне граничещия слой гориво/вода [3, 4].

4. ОБЗОР НА ИНЦИДЕНТИ С ПРОЯВЛЕНИЕ НА BOILOVER В ГОЛЕМИ РЕЗЕРВОАРИ В СВЕТОВЕН МАЩАБ

При анализ на специализирана литература се установява, че пожарите са най-честите инциденти включващи резервоари за съхранение. Въпреки че пожарите в резервоари за съхранение на нефтопродукти, алтернативни горива, хранителни и етерични масла, могат да се считат за редки, се наблюдават характерни случаи, причинили големи екологични замърсявания и опасности за населението (табл. 1) [5, 6, 7].

Таблица 1. Данни за пожари с boilover

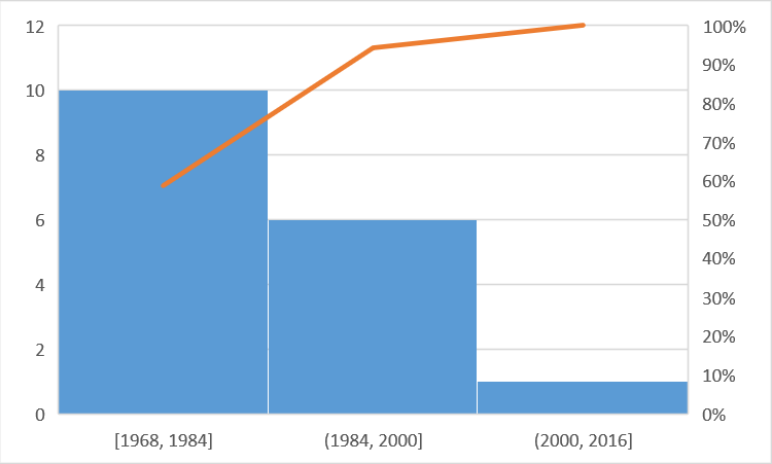
Година	Място на възникване	Обхванати съоръжения	Вид гориво	Причина	Загинали
1968	Пернис, Нидерландия	80 резервоара	*	*	*
1972	Триесте, Италия	4 резервоара с обем 500 000 барела с плаващ покрив	Суров петрол	Саботаж	*
1975	Биг Спрингс, Тексас, САЩ	*	*	*	*
1975	Финдли, Охайо, САЩ	30 000 барела	Суров петрол	Светкавица	*

1975	Филаделфия, Пенсилвания, САЩ	4 резервоара	Суров петрол	Препълване	*
1978	Финдли, Охайо, САЩ	*	*	*	*
1980	Скотсдейл, Луизиана, САЩ	*	*	*	*
1982	Бомон, Тексас, САЩ	13 резервоара за суров петрол	Суров петрол	*	*
1982	Такоа (близо до Каракас), Венецуела	2 резервоара	Мазут	*	150 загинали
1983	Милфорд Хейвън, Великобритания	Резервоар с диаметър 76 m	Суров петрол	*	2 загинали
1986	Солун, Гърция	Множество резервоари, включително с диаметри 40 m и 80 m	Суров петрол	*	*
1987	Лион, Франция	Множество резервоари	Дизел	*	2 загинали
1989	Батуми, Грузия	*	Нефт	*	*
1989	Хуанг Дао, Китай	Стоманобетонен резервоар 72 x 48 m, 23000 m^3	Суров петрол	Светкавица	*
1991	Близкия Изток	235 900 барела, 3 резервоара с плаващ покрив	Суров петрол	Саботаж	*
2000	Самара, Русия	Множество резервоари	Нефт	*	*
2016	Пуерто Сандино, Никарагуа	2 резервоара с диаметър 46 m	Суров петрол	*	*

*- няма данни.

4.1. Честота на възникване на пожари с boilover

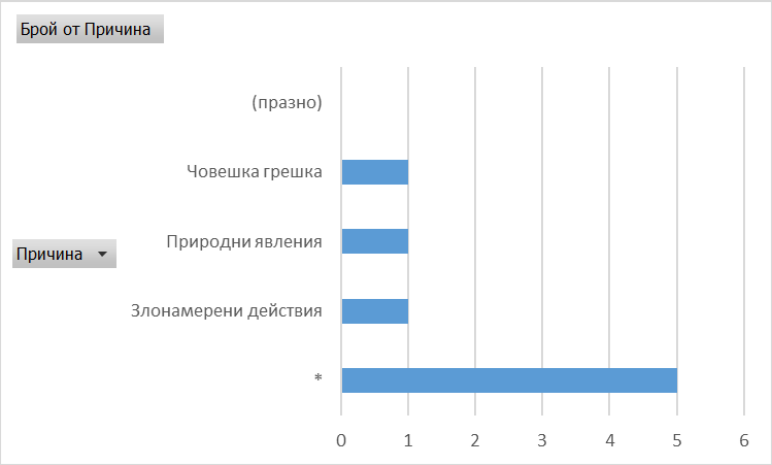
С помощта на диаграмата на Парето или сортирана хистограма, може да се представи кумулативната честота на възникване. Диаграмите на Парето осветяват най-важните фактори в набор от данни и се считат за един от седемте основни инструмента за управление на качеството, тъй като е лесно да се видят най-често срещаните проблеми или въпроси.



Фигура 3. Разпределение на данните за възникване на пожари с boilover в низходящ ред, според честотата, с кумулативна линия върху вторичната ос, като процент от общата сума.

От анализа на данните се установява намаляване на честотата на възникване на boilover след 1989 година, но въпреки това настъпването на събитието не е пренебрежимо.

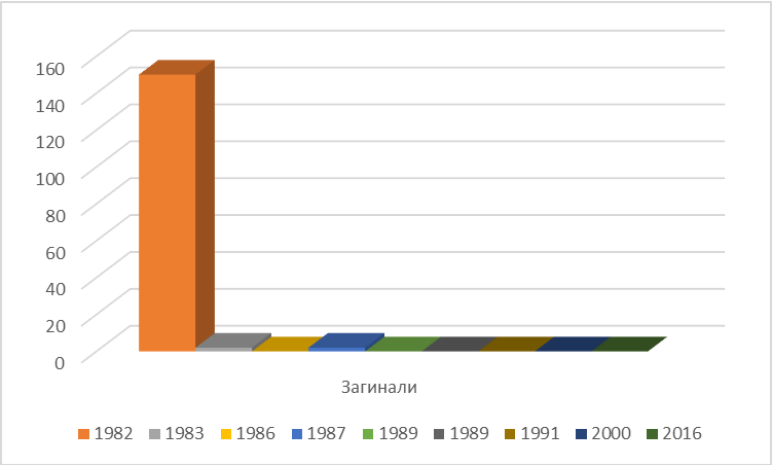
4.2. Причини за възникване на пожари с boilover



Фигура 4. Причини за възникване на пожари с boilover.

От анализа на данните се установяват като най-чести причини за възникване на пожари с boilover природни явления, човешка грешка и саботажи (злонамерени действия, на база терористични актове). Подобни причини се наблюдават и в други индустриални отрасли [8].

4.3. Летални последици при възникване на пожари с boilover

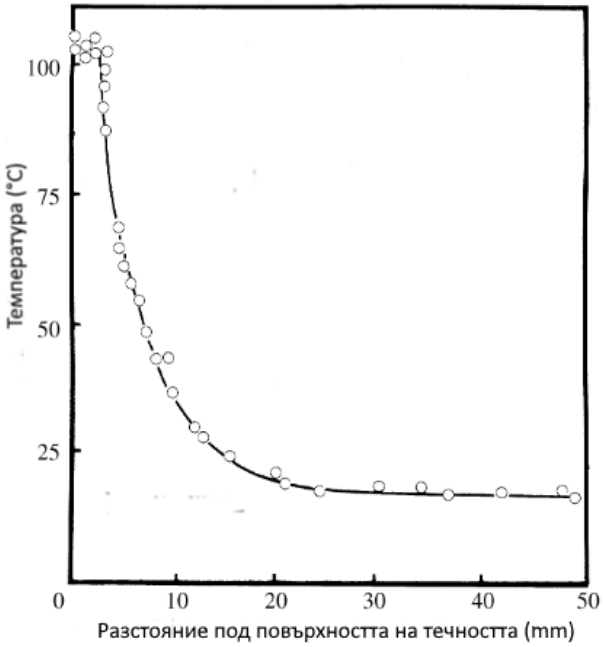


Фигура 5. Разпределение на броя летални последици при възникване на пожари с boilover на база период.

От анализа на данните се установява незакономерен пик, вследствие един от инцидентите и запазваща се устойчивост за възможността за смъртност в останалите периоди.

5. ОСНОВНИ ФАКТОРИ ЗА ПОЯВА НА BOILOVER

Основният фактор за поява на boilover е формирането на „гореща зона“. Горещата зона представлява температурен слой с температура около 100°C, който при процеса на горене, вследствие на топлинния поток от пламъка, загрява слоя гориво в дълбочина и след достигането му до водния подслой води до неговото изкипяване. докладват за разпределение на горещата зона за н-бутанол излгеждащо по начина показан на фиг. 6.



Фигура 6. Разпределение на температурата под повърхността на n-бутанол по време на стабилно горене („басейн“ диаметър 36 mm), (Blinov, Khudiakov, 1961).

В изследването си Khudiakov извежда емпиричната зависимост:

$$\frac{T-T_\infty}{T_S-T_\infty} = \exp(-kx) \quad (1)$$

където: X е дълбочината, T_S и T_∞ са съответно температурите при x = 0 и x = ∞.

Това е решението на уравнението на топлопроводността в едно измерение, където t = x/R_∞. Тогава константата k е равна на $R_\infty \rho c/\lambda$, като R_∞ е масовата скорост на изгаряне представена като степен на регресия (mm/min) а $\rho c/\lambda$ е температуропроводното число α (m^2/s). В последните зависимости c е специфичен топлинен капацитет, λ - коефициент на топлопроводност, а ρ - плътност

Следователно уравнението за определяне на разпределението на „горещата зона“ може да се запише като:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{R_\infty}{\alpha}\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) \quad (2)$$

В уравнение 2 това, което е неизвестно и подлежи на доплънителен анализ е степента на регресия (mm/min), която може да бъде да бъде преобразувана сравнително лесно като масова скорост на изгаряне (kg/m^2.s):

$$\dot{m}' = \frac{\rho . R_\infty . 10^{-3}}{60} \quad (3)$$

Освен чрез използване на степента на регресия, скоростта на изгаряне може да се определи и като се изрази количеството гориво, което се консумира, спрямо времето.

$$\dot{m}' = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (4)$$

където: $\dot{m}'$ е масовата скорост на изгаряне в единици маса на време (например кг/с или кг/ч), $\Delta m = (mi - mf)$, mf е крайната маса на горивото след изгарянето в единици маса, mi е началната маса на горивото преди изгарянето в единици маса, Δt е времето, през което се изгаря горивото.

Горене на съдове до 0,03 m е в ламинарен режим и при увеличаване на диаметъра регресия намалява до достигането на диаметър от 1m, при който пламъка е в напълно турболентен режим. При диаметри между 0,03 и 1m се наблюдава преминаване от ламинарен в турболентен режим.

Масовата скорост на горене в ламинарен режим може да се запише като:

$$\dot{m}" = \frac{\dot{Q}_F^{"} - \dot{Q}_L^{"}}{L_v} \quad (5)$$

където: $\dot{Q}_F^{"}$ – топлинен поток от пламъка, $\dot{Q}_L^{"}$ – енергията използвана за изпарение, L_v – специфична топлина на изпарение.

Горенето спрямо диаметъра на съда, може да се разграничи в 3 режима:

$$\dot{Q}_F^{"} = \dot{Q}_{\text{проводимост}}^{"} + \dot{Q}_{\text{конвективен}}^{"} + \dot{Q}_{\text{лъчист}}^{"} \quad (6)$$

Частта проводимост се отнася до пренос на топлина през ръба на резервоара:

$$\dot{Q}_{\text{проводимост}}^{"} = k_1 \pi D (T_F - T_l) \quad (7)$$

където: T_F и T_l са съответно температурите на пламъка и течността, а k_1 е константа, която включва допълнителни условия за пренос на топлина и ефективна височина на контейнера (под ръба), през която топлината се пренася към течността.

Вторият режим представя конвективния топлообмен:

$$\dot{Q}_{\text{конвективен}}^{"} = k_2 \frac{\pi D^2}{4} (T_F - T_l) \quad (8)$$

където k_2 е коефициентът на конвективен топлообмен.

Третият режим представя лъчистия топлообмен:

$$\dot{Q}_{\text{лъчист}}^{"} = k_3 \frac{\pi D^2}{4} ({T_F}^4 - {T_l}^4)(1 - \exp(-k_4 D)) \quad (9)$$

където: k_3 съдържа константата на Стефан-Болцман (σ) и конфигурационния фактор за пренос на топлина от пламъка към повърхността на горивото (ϕ), докато $(1 - \exp(-k_4 D))$ е ефективната излъчвателна способност на пламъка (ε).

При проверка може да се установи, че k_4 трябва да съдържа не само фактор на пропорционалност, свързващ средната дължина на излъчването (физически средната дължина на излъчването може да бъде интерпретирана като необходимия радиус на еквивалентна полусфера на средата, така че потокът, получен от центъра на нейната основа да е равен на средния поток, излъчван към интересуващата ни област от действителен обем на средата) с диаметъра на басейна, но също така концентрациите и емисионните коефициенти на пламъка.

След заместване на уравненията получаваме Уравнение 10, и че масовата скорост на изгаряне зависи от количеството на отделената топлина.

$$\dot{m}" = \frac{k_1 \pi D (T_F - T_l) + k_2 \frac{\pi D^2}{4} (T_F - T_l) + k_3 \frac{\pi D^2}{4} ({T_F}^4 - {T_l}^4)(1 - \exp(-k_4 D)) - \dot{Q}_L^{"}}{L_v} \quad (10)$$

Количеството отделена топлина представлява енергията, която се отделя или генерира при горенето на гориво или горим материал. То представлява скоростта, с която се освобождава топлина за единица време.

Този параметър е най-същественият при изследването на горивни процеси и проучването на поведението на пожари. Той се използва за определяне на енергийната мощност, която се отделя от горенето, и може да бъде измерен в различни единици, като киловати (kW) или калории в секунда (cal/s). В най-опростен вид последният може да се представи по следния начин:

$$\dot{Q}_c = \chi . \dot{m}" . A_f . \Delta H_c \quad (11)$$

където: χ – фактор на ефективност на горенето, $\dot{m}"$ – масова скорост на горене, A_f – площ на горене, ΔH_c – топлина на изгаряне.

Въпреки наличието на по-надеждни методи за определяне на количеството на отделената топлина (HRR), като използването на конусен калориметър, при ограничена или липсваща информация, може да се използва дадената закономерност, като достатъчно обективна [9].

6. ИЗВОДИ

Представените модели не успяват напълно да отговорят на реалните условия, тъй като не се взема предвид загубата на топлинна енергия през стените на контейнера. Това обуславя и нужда от подобряване на закономерностите, чрез представяне на термин определящ загубата на топлина.

При определянето на „горещата зона“, енергията предадена чрез конвекция има пренебрежимо малка роля, а установяването на коефициентът на конвективния поток е изключително сложен и труден процес. Поради тези причини в почти всички модели тази част от определянето на отделената енергия от пламъка бива изключвана.

Докладът представя резултатите от етап от изпълнение на проект „Горене на течности в резервоари за съхранение на нефтопродукти, хранителни и етерични масла. Топлообмен и масова скорост на изгаряне. Изследване на явлението “Boilover”, финансиран от фонд научни изследвания на основание договор с рег. № КП-06-М6718 от 15.12.2022 г.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Първанов С. Аварии в строителството. Причини, последици, защита, монография, 2022, 180 стр.
[2] Blinov V., G Khudyakov, Diffusion burning of liquid, Academy of Science, Moscow, Russia (in Russian) 1961,pp. 149-155 The book is available as an English translation: Diffusion burning of liquid, T-1490 ASTIA AD 296762, 1961.
[3] Hristov, J., E. Planas-Cuchi, J. Arnaldos, etal., Accidental burning of a fuel layer on a waterbed: a scale analysis of the models predicting the pre-boilover time and tests to
[4] Hristov, J. An Inverse Stefan Problem Relevant to Boilover: Heat Balance Integral Solutions and Analysis, Thermal Science 11 (2) (2007), 141-160.
[5] Persson H., Lönnermark A., 2004, Tank Fires Review of fi re incidents 1951–2003, BRANDFORSK Project 513-021.
[6] Riecher A., 2016, Boilover in Nicaragua Dies Unchallenged, Industrial Fire World
[7] Riecher A., David White, July 1, 2001 , Milford Haven, U.K.: Aug. 30, 1983.
[8] Първанов С., Л. Хрисчев, Аварии по време на строителството. Състояние и проблеми, Сборник доклади от XII Международна научна конференция „Проектиране и строителство на сгради и съоръжения“, 08-10 септември 2022 г, Варна, 131 стр.
[9] Drysdale D., 1998, “An Introduction to Fire Dynamics”, John Wiley & Sons, Ltd., Publication.