

УДК: 004.942:504.06

В.О. Лифар, О.К. Лифар

МОДЕЛЬ ТА МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ УТВОРЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ АВАРІЯХ НА ОБ'ЄКТАХ З ПЕРЕГРІТОЮ РІДИНОЮ

Лифар Володимир Олексійович

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Київ

orcid: 0000-0002-7860-9663

lifar@snu.edu.ua

Лифар Олена Костянтинівна

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Київ

orcid: 0000-0002-3014-5521

eklyfar@gmail.com

Інформаційна технологія, що розробляється в системі підтримки прийняття рішень при керуванні техногенним ризиком промислових об'єктів підвищеної небезпеки, вимагає розробки детермінованих моделей, завдяки яким можна визначати розрахункові показники процесів утворення аварій, формування небезпечного середовища, реалізації явищ, що мають вражаючі фактори для людей, матеріальних об'єктів, та стохастичних моделей, які дозволяють визначити ймовірність сценаріїв виникнення та розвитку аварій. У роботі представлена одна з моделей, що дозволяє вирахувати основні небезпечні параметри при пароутворенні перегрітих рідин та зріджених газів, що зберігаються ізотермічно або знаходяться під тиском, більшим за атмосферний. При цьому необхідно враховувати, що суміш перегрітої рідини може бути багатокомпонентною. Окремі компоненти суміші мають різні температури кипіння, критичні показники пароутворення та тиск насиченої пари. Оскільки процеси пароутворення по об'єму рідини проходять дуже швидко, немає необхідності враховувати динаміку процесу. Необхідно визначити кількість речовини, що переходить у газову фазу з рідкої для кожної компоненти, та розрахувати закінчення процесу бурхливого пароутворення перегрітої рідини. Кінцева температура кипіння суміші визначається, коли сумарний тиск насиченої пари стає нижчим атмосферного. Модель заснована на врахуванні першого початку термодинаміки та законів Рауля. Обґрунтований теоретичний підхід дає можливість створити розрахункову схему, що працює в межах області визначення. Перевірка розрахунків та верифікація моделі підтверджують область її використання. Модель має самостійну цінність та може використовуватися будь-яким

фахівцем для визначення кількості парової фази, що утворюється при викиді багатокомпонентних перегрітих рідин або зріджених газів.

Ключові слова: алгоритм, фазове перетворення, пароутворення, перегріта рідина, зріджені гази, модель випаровування, промислова аварія.

Вступ

Управління ризиком техногенних об'єктів підвищеної небезпеки вимагає володіння даними та показниками можливих аварійних процесів [1, 2]. Технологічне обладнання таких об'єктів нерідко використовується з обертанням небезпечних вибухових речовин під високим тиском. При цьому на стан таких речовин може впливати перегріта рідина або суміш зріджених газів. При аварійній розгерметизації обладнання під тиском такі суміші можуть викликати явища миттєвого пароутворення (фізичний вибух другого роду) і створювати вибухо- та пожежо-небезпечні середовища [3, 4]. Такі процеси можуть бути найбільш небезпечними та такими, яким важко протидіяти. Вміти оцінювати масштаби формування небезпеки при таких аваріях означає можливість моделювання та прогнозування розвитку подій для визначення наслідків вибухів пароповітряних сумішей. У системах підтримки прийняття рішень планування на базі таких оцінок має важливе значення і повинно бути складовою суцільного процесу управління техногенним ризиком [5–7].

Кількість пожежонебезпечної речовини, що поступає в атмосферу в газовій фазі, може використовуватися як верхня межа участі у вибухові пароповітряної суміші, яка утворює хвилю збиткового тиску, що руйнує матеріальні об'єкти та вражає людей. Найбільш небезпечними при цьому є зріджені гази та перегріті рідини, паливо, органічні речовини. Небезпечними також є деякі отруйні речовини, наприклад аміак при ізотермічному зберіганні або під тиском, хлор, що зберігається в рідкому стані під тиском. До перегріву рідких речовин може призвести також порушення технологічного регламенту або потрапляння обладнання в сферу пожеж. В умовах військових дій деякі аварії можуть виникати при вибухах снарядів, дронів та їх уламків. Тому моделювання процесу пароутворення при розгерметизації обладнання з перегрітими речовинами або зрідженими газами цінне для визначення показників формування небезпечного середовища.

Спираючись на підтримку бази даних небезпечних властивостей речовин [8, 9] та деяких методів і моделей послідовного визначення розвитку сценаріїв аварій [10–12], можна інтегрувати модель пароутворення перегрітих рідин в інформаційну технологію підтримки прийняття рішень з управління техногенним ризиком в умовах військового стану.

Надається можливість удосконалення та створення нових програмних засобів системи підтримки прийняття рішень (СППР) сучасних інформаційних технологій [13].

Постановка задачі

Розрахункова модель базується на врахуванні першого початку термодинаміки. Передбачається, що процес пароутворення протікає дуже швидко. При цьому на центрах пароутворення виникає велика кількість областей зі швидко прогресуючими поверхнями фазового переходу. Таким чином створюється можливість не враховувати час змін і переходити до стаціонарної моделі, що значно спрощує алгоритм розрахунків, не порушуючи загальну теоретичну відповідність процесу, що моделюється.

Вхідні параметри (що задаються) наведені в таблиці.

Таблиця

Назва	Одиниці виміру	Позначення змінної у формулі	Область визначення		Значення за замовчуванням
			min	max	
Температура перегріву рідини (на початку часу)	оС	T_0	– 200	1000	30
Молекулярна маса компонентів газу викиду	кг/моль	M_i	0,001	1	0,042
Маса кожної компоненти	кг	m_i	10	100000000	100
Температура кипіння	оС	T_{k0}	– 270	1000	100
Теплоємність рідини	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	c_i	1	10000	2000
Теплота випаровування	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	L_{vi}	100	1000000	300000
Крок маси з перегріву	кг	Δm_i	0.1	10	1

Розглянемо вихідні змінні: маса пари i -ї компоненти суміші: кг становить m_{var} ; температура кипіння суміші оС — T_{ks} .

При витіканні рідин або зріджених газів, при розгерметизації промислових об'єктів необхідно визначити кількість парогазової фази, що викидається в атмосферу протягом часу випаровування до вжиття заходів щодо ліквідації витоку.

Найбільш масштабними є аварії з витоком рідин з герметичних ємностей у піддон або обвалування, а також вільний розлив по підстилаючій поверхні. У будь-якому разі площа дзеркала випаровування може бути суттєвою і значно перевищувати площу бічного контакту з поверхнею.

Якщо рідина є перегрітою для атмосферних умов, то досить швидко (припускаємо, що в цьому разі — миттєво) вся внутрішня енергія перегріву піде на випаровування, а частина рідини, що залишилася, розіллється в початковий момент часу. Температура дорівнюватиме температурі кипіння рідини при атмосферних умовах. Таке припущення частково завищує реальні можливості утворення парогазової фази, оскільки частина киплячої рідини насправді утворює спочатку аерозоль, далі частково конденсується з атмосферними парами води і випадає в протоку. При $T_{boil}^0 < T_{liq}$ масу первинної хмари вважаємо

$$m_{var} = m_{liq} \left(1 - \exp \left(- \frac{c_{pliq} (T_{liq} - T_{boil}^0)}{L_v} \right) \right),$$

де T_{boil}^0 — температура кипіння рідини при атмосферних умовах, оС; T_{liq} — початкова температура перегрітої рідини, оС; m_{var} — маса пари, що утворилася при перегріві, кг; m_{liq} — маса перегрітої рідини, що викидається, кг; c_{pliq} — теплоємність рідини при тиску всередині апарата, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{оС}}$; L_v — питома теплота

випаровування рідини $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ [7].

Частина рідини, що залишилася, проливається по підстилаючій поверхні.

Вирішення поставленої задачі

Випаровування багатокомпонентної суміші. Враховуючи закон збереження енергії, запишемо рівняння енергетичного балансу у різницевій формі для багато-

компонентної суміші з урахуванням переходу за малу масу Δm кожної компоненти в газову фазу:

$$T^{\tau} \cdot \sum_{i=1}^n m_i^{\tau} c_i = T^{\tau+1} \cdot \sum_{i=1}^n m_i^{\tau+1} c_i + T^{\tau} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta m_i c_i + \sum_{i=1}^n \Delta m_i L_{vi},$$

де індекс τ — попередня ітерація, $\tau+1$ — наступна; T^{τ} — температура рідини на попередній ітерації; $T^{\tau+1}$ — температура рідини на наступній ітерації; m_i — масова доля i -ї компоненти; c_i — теплоємність i -ї компоненти; Δm_i — зміна маси рідкої фази i -ї компоненти; L_{vi} — теплота пароутворення i -ї компоненти; n — число компонентів у суміші.

За законом Рауля тиск насиченої пари пропорційний мольним часткам кожної компоненти суміші. Оскільки вихід парів пропорційний тиску насиченої пари, припустимо, що зміна маси рідини кожної компоненти пропорційна відповідним мольним часткам компонентів:

$$T^{\tau} \cdot \sum_{i=1}^n m_i^{\tau} c_i = T^{\tau+1} \cdot \sum_{i=1}^n m_i^{\tau+1} c_i + T^{\tau} \cdot \Delta m \cdot \sum_{i=1}^n (Md_i^{\tau} \cdot c_i) + \Delta m \cdot \sum_{i=1}^n (Md_i^{\tau} \cdot L_{vi}).$$

Враховуючи, що $m_i^{\tau+1} = m_i^{\tau} - \Delta m \cdot Md_i^{\tau}$, отримаємо

$$\begin{aligned} T^{\tau} \cdot \sum_{i=1}^n m_i^{\tau} c_i &= T^{\tau+1} \cdot \sum_{i=1}^n ([m_i^{\tau} - \Delta m \cdot Md_i^{\tau}] \cdot c_i) + \\ &+ T^{\tau} \cdot \Delta m \cdot \sum_{i=1}^n (Md_i^{\tau} \cdot c_i) + \Delta m \cdot \sum_{i=1}^n (Md_i^{\tau} \cdot L_{vi}) \end{aligned}$$

або

$$T^{\tau+1} = T^{\tau} - \frac{\Delta m \cdot \sum_{i=1}^n (Md_i^{\tau} \cdot L_{vi})}{\sum_{i=1}^n ([m_i^{\tau} - \Delta m \cdot Md_i^{\tau}] \cdot c_i)}.$$

У початковий момент часу температура рідини дорівнює температурі перегріву (початковій температурі рідини в ємності) $T^0 = T_0$.

Спочатку необхідно визначити число та назву кожної компоненти, молекулярну масу кожної компоненти M_i , початкові масові частки кожної компоненти m_i^0 , теплоту пароутворення, температуру кипіння та теплоємність рідкої фази кожної компоненти.

Згідно з другим законом Рауля температура кипіння суміші залежить від її мольного складу. Іншими словами, можемо припустити, що температура кипіння суміші дорівнює

$$T_{ks}^{\tau} = \sum_i T_{k0i} \cdot Md_i^{\tau},$$

де T_{k0i} — температура кипіння чистої i -ї компоненти при атмосферному тиску, Md_i^{τ} — поточна мольна доля i -ї компоненти в розчині.

Мольна доля кожної компоненти визначається як

$$Md_i^{\tau} = \left(\frac{m_i^{\tau}}{M_i} \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n \frac{m_i^{\tau}}{M_i} \right)^{-1}.$$

При ітераційному рішенні на кожному кроці необхідно відстежувати зменшення маси кожної компоненти та перераховувати мольну частку кожної компоненти, а також температуру кипіння суміші.

До проведення розрахунку необхідно визначити температуру кипіння суміші за її початковим складом. Якщо для i -ї компоненти маса дорівнює 0, необхідно перестати враховувати її втрату із загальної маси шляхом прирівнювання в подальшому її теплоту пароутворення і поточну масу до нуля. Припускаємо, що рідини змішуються без утворення азеотропної суміші. При цьому, якщо температура рідини знижується до температури кипіння i -ї компоненти, то її маса фіксується на останньому отриманому значенні і температура випаровування набуває значення, що дорівнює 0 (для виключення виходу перегріву даної компоненти).

Розрахунок припиняється, якщо температура рідини стає рівною поточній температурі кипіння суміші T_{ks}^{τ} або менше її.

Частина рідини, що залишилася, розливається по поверхні протоки при останній розрахунковій температурі. Вихідними параметрами розрахунку є: маса компонентів, отримана через перегрів, загальна температура суміші до моменту закінчення виходу через перегрів, загальна маса суміші, що залишилася, і її масові частки всіх компонентів, що залишилися.

Для даної моделі проведена верифікація розрахунків для пропан-бутанової суміші, що часто використовується як паливо для автомобілів. На рис. 1 представлені вхідні дані для контрольного розрахунку двокомпонентної моделі для суміші 50х50 % пропан-бутанової фракції.

Наименование	Масс. состав, кг	Мол. масса	Температура кипения	Теплоемкость Дж/кг*град	Теплоемкость пара Дж/кг
Пропан	100	0.042	-42	2150	427000
Бутан	100	0.058	-0.5	1500	386560

температура перегретой жидкости: 30 Шаг массы по перегреву: 0.1

Рис. 1

Розрахунок за вказаною моделлю показує (рис. 2, розрахункові показники контрольної задачі), що для 200 кг загальної суміші при температурі перегріву до 30° С розгерметизація ємностей зберігання призводить до випаровування близько 24 кг пропану та 11 кг бутану. Залишок пропан-бутанової суміші охолоджується до – 23°С, після чого може випаровуватись з поверхні проливу.

Входные данные		Результат
Наименование	Масса пар.	
▶ Пропан	23.87435654755...	
Бутан	10.75630260532...	
*		
		Температура кипения смеси: -22.715937260272

Рис. 2

Такі дані не суперечать загальному теоретичному підходу та відповідають даним, отриманим при подібних аваріях.

Висновок

У даній роботі запропонована, теоретично обґрунтована та верифікована модель пароутворення для перегрітих рідин або зріджених газів при аваріях на технологічному обладнанні. Алгоритм розрахунків може використовуватися при розробці програмних засобів для систем підтримки прийняття рішень. Така модель має самостійну цінність та може використовуватися для оцінок рівня небезпеки при утворенні пароповітряних сумішей пожежонебезпечних речовин. Дана модель доповнює низку моделей, що служать для оцінки процесів розвитку аварій та формування небезпечного середовища. Крім вибухонебезпечних показників, які можуть бути визначені завдяки запропонованій моделі, вона може сприяти аналізу поведінки процесів при викиді отруйних речовин у газовій фазі.

V. Lyfar, O. Lyfar

MODEL AND METHOD OF DETERMINING INDICATORS OF THE FORMATION HAZARDOUS ENVIRONMENT IN CASE OF ACCIDENTS AT FACILITIES WITH OVERHEATED LIQUID

Volodymyr Lyfar

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Kyiv

lifar@snu.edu.ua

Olena Lyfar

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Kyiv

eklyfar@gmail.com

Information technology, which is being developed in the decision-making support system for man-made risk management of high-risk industrial facilities, requires the development of deterministic models, thanks to which it is possible to determine the calculated indicators of the processes of the formation of accidents, the formation of a dangerous environment, the realization of phenomena that have impressive factors for people and material objects and stochastic models that allow to determine the probability of scenarios of the occurrence and de-

velopment of accidents. The work presents one of the models that allows to calculate the main dangerous parameters during the process of vaporization of overheated liquids and liquefied gases stored isothermically or under pressure of more atmospheric. It should be borne in mind that a mixture of overheated liquid can be multicomponent. The individual components of the mixture have different boiling points, critical vaporization and saturated vapor pressure. Since the processes of vaporization by the volume of the liquid are very quickly, there is no need to take into account the dynamics of the process. It is necessary to determine the amount of substance that goes into the gas phase from the liquid for each component and to calculate the end of the process of rapid vaporization of overheated liquid. The final boiling point of the mixture is determined when the total pressure of the saturated vapor is below the atmospheric pressure. The model is based on taking into account the first beginning of thermodynamics and Raoult's laws. A well-founded theoretical approach makes it possible to create a calculation scheme that works within the scope of the definition. The conducted verification of calculations and verification of the model confirms the scope of its use. The model has independent value and can be used by any specialist to determine the amount of vapor phase formed during the emission of multicomponent superheated liquids or liquefied gases.

Keywords: algorithm, phase transformation, vapor formation, superheated liquid, liquefied gases, evaporation model, industrial accident.

ПОСИЛАННЯ

1. Бесчастнов М.В., Соколов В.М., Кац М.И. Аварии в химических производствах и меры их предупреждения. М. : Химия, 1976. 367 с.
2. Бегун В.В., Науменко І.М. Безпека життєдіяльності (забезпечення соціальної, техногенної та природної безпеки). Київ : КІП, 2004. 328 с.
3. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Фугасные эффекты взрывов. СПб. : Полигон, 2002. 266 с.
4. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Газовые взрывы. СПб. : Астерион, 2007. 238 с.
5. Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах. Сборник документов. 2-е изд., испр. и доп. 2002. Сер. 27. Вып. 2. 208 с.
6. CPR 14E. Methods for the calculation of physical effects. «Yellow book» by ed. C. J. H. van den Bosch, R. A. P. M. Weterings. Hague : Gevaarlijke Stoffen. 2005. 870 p.
7. Лифар В.О. Моделі, методи та інформаційні технології управління техногенним ризиком об'єктів підвищеної небезпеки. Міжнародна науково-практична конференція «Ольвійський форум 2016: Стратегії країн Причорноморського регіону в політичному просторі». Том 5. Інформаційні технології у розвитку суспільства. Миколаїв : Вид-во ЧДУ імені Петра Могили, 2016. Р. 24–26.
8. Лыфарь В.А. Методы определения входных данных опасных свойств веществ. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2012. Том 188, № 17. С. 148–153.
9. Lyfar V. Database of hazardous substances properties. TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture: Polish Academy of sciences. 2012. Vol. 12, N 3. 5 p.
10. Kawamura P.I., MacKay D. The Evaporation of volatile liquids. J. of Hazardous Materials. 1987. Vol. 15. P. 365–376.
11. Methods for the calculation of physical effects. «Yellow Book». CPR 14E (Part 1). Sdu Uitgevers. Committee for the Prevention of Disasters. Third edition, 1997. Chapter 3.
12. Братсерт У.Х. Испарение в атмосферу. Л. : Гидрометеиздат, 1985. 350 с.
13. Грановский Э.А., Лыфарь В.А., Ворона А.П. Моделирование случайных и детерминированных процессов возникновения и развития техногенных аварий с использованием программного комплекса «ризэкс-2». Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: Труды Международной научной школы (МА БР). СПб. : ГУАП, 2007. 540 с.

Отримано 19.10.2023