



V. V. Kalinchak, O. S. Chernenko, O. K. Kopyyka

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, м. Одеса, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6030-6007> – В. В. Калінчак

<https://orcid.org/0000-0002-3722-0694> – О. С. Черненко

<https://orcid.org/0000-0001-9802-2256> – О. К. Копійка



valerykalinchak@gmail.com

УДОСКОНАЛЕННЯ АНАЛІТИЧНОЇ ОЦІНКИ ТЕМПЕРАТУР ЗАЙМАННЯ РІДИН

Горючим рідинам притаманно, крім температури самозаймання, температура спалаху та займання. Саме по значенням температури спалаху та кипіння зазвичай відбувається класифікація горючих та легкозаймистих рідин. Температура спалаху (в англ. літературі flash point) є найбільш дослідженою характеристикою. В той же час температурі займання (в англ. літературі fire point) приділяється значно менша увага. У вітчизняній літературі для визначення температури займання індивідуальних речовин використовують емпіричні залежності або констатують, що температура займання більша за температура спалаху на 1-5°C для легкозаймистих рідин, на 30-35°C – для горючих рідин.

Запропонована аналітична формула для розрахунку температури займання індивідуальної горючої рідиниметодом краплі. Вона ґрунтується на припущенні, що при займанні на поверхні рідини при температурі займання спостерігається стехіометрія між концентраціями горючої пари рідини і окисника. При виведенні формули враховано залежності тиску насиченої пари рідини та питомої теплоти пароутворення від температури. Проведено порівняння з відомими емпіричними залежностями, експериментальними значеннями для деякої кількості легкозаймистих рідин кожної з трьох категорій та горючих рідин. При врахуванні вищевказаних температурних залежностей отримані значення температури займання рідин значно краще корелюють з іншими результатами.

Кривизна поверхні рідини не входить в отриману залежність для температури займання. Тому її можна використовувати і при займанні плоскої поверхні рідини. Перевагою отриманої формули є можливість знаходити температури займання бінарної суміші горючої з негорючою рідиною, наприклад, водою. В першу чергу це стосується водно-спиртових розчинів та водно-паливних емульсій.

Ключові слова: температура займання, легкозаймиста рідина, крапля, теплота випаровування

V. V. Kalinchak, A. S. Chernenko, A. K. Kopyyka

Odesa I. I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine

IMPROVEMENT OF THE ANALYTICAL DETERMINATION OF FIRE POINT LIQUIDS

Combustible liquids also have a flash and fire point except for the auto-ignition temperature. Flammable liquids are usually classified according to their flash point and boiling point. Flashpoint is the most studied characteristic. At the same time, much less attention is paid to the fire point (in the post-Soviet literature, ignition temperature). In Ukrainian science literature, empirical dependencies are used to determine the fire point of the individual liquid. On the other hand, they often state that the fire point is higher than the flash point by 1-5°C for flammable liquids, and by 30-35°C – for combustible liquids.

In this paper, an analytical formula for calculating the fire point of an individual combustible liquid (drop' method) is proposed. It is based on the assumption that starts burning on the liquid surface at the ignition temperature when there is a stoichiometry between the concentrations of the liquid vapour and the oxidant. When formula derivation, the temperature dependence of saturated vapour liquid pressure and specific heat of evaporation is taken into account. A comparison was made with known empirical dependencies and experimental values for a series of flammable liquids: three categories of flammable liquids and combustible liquids. Taking into account the above-mentioned temperature dependences, the obtained values of liquids fire points correlate much better with other results.

The curvature of the liquid surface is not included in the obtained dependence for the fire point. Therefore, it can be used when igniting a flat liquid surface. The advantage of the obtained formula is the ability to find the fire point of a binary mixture: a combustible with a non-combustible liquid, for example, water. First, this applies to water-alcohol solutions and water fuel emulsions.

Keywords: fire point, flammable liquid, drop, heat of evaporation.

Аналіз літературних джерел. Для кожної горючої рідини існує три характерні температури: спалаху, займання та самозаймання [1]. За температуру спалаху приймають найменшу температуру рідини, при якій спостерігається спалах пари над її поверхнею. Температурою займання називають найменшу температуру поверхні рідини, при короткочасному піднесенні до якої зовнішнього джерела запалювання на поверхні спостерігається стійке горіння.

В різних країнах використовуються різні класифікації легкозаймистих рідин. Так, на території Сполучених Штатів Америки використовується класифікація національної асоціації протипожежного захисту (NFPA), згідно з якою займисті рідини поділяють на три класи [2]: IA (температура спалаху менша за 22,8 °C, а температура кипіння менша за 37,8°C); IB (температура спалаху менша за 22,8 °C, а температура кипіння не менша ніж 37,8 °C) та IC (температура спалаху не менша ніж 22,8 °C та менша за 37,8 °C). Горючі рідини відносяться до рідин класу II (температура спалаху більша за 37,8 °C та менша ніж 60 °C) та III (температура спалаху більша за 60 °C).

Європейська класифікація легкозаймистих речовин CLP [3] також ділить легкозаймисті рідини на три категорії: 1 – температура спалаху < 23 °C і температура кипіння ≤ 35 °C, 2 – температура спалаху < 23 °C і температура кипіння > 35 °C, 3 – температура спалаху ≥ 23 °C і ≤ 60 °C).

В Україні класифікація таких рідин якісно відрізняється. Так в ДСТУ [4] під легкозаймистою рідиною розуміють рідину з температурою спалаху не більшою за 61 °C у закритому тиглі або 66 °C – у відкритому. Особливо небезпечними називають легкозаймисті рідини з температурою спалаху не більшою ніж 28 °C. Тобто розділ на три класи відсутній. Хоча в ДСТУ [5] при поділі небезпечних речовин і матеріалів під час зберігання неявно використовується виділення в окремі категорії рідин з температурою спалаху: 1) до -18 °C; 2) -18 ÷ 23 °C; 3) 24 ÷ 61 °C.

Тому саме температура спалаху є головною характеристикою для визначення класу рідин. Визначення температури займання в наукових дослідженнях зустрічається значно рідше [6-9]. В західних країнах температуру займання називають «firepoint» – температура виникнення стійкого полум'я при короткочасному піднесенні джерела запалювання. В Україні для визначення температури займання індивідуальних рідин використовується експериментальні дані [10] чи розрахунки за емпіричними формулами [11].

Прийнято, що температура займання (firepoint) не набагато більша за температуру спалаху: для легкозаймистих рідин на 1-5°C, для

горючих – на 30-35°C. Чим менша температура спалаху, тим менша різниця з температурою займання, яку практично важко відрізнити. Аналітичні вирази для визначення температури спалаху доволі широко оглянуті в [11]. Для визначення температури займання декілька емпіричних залежностей, які дають змогу провести оцінки для індивідуальних чистих рідин в повітрі. Вплив інших факторів (наявність домішок – розчини, газовий склад середовища тощо) ці залежності визначити не дають змоги. Активні дослідження горіння мультикомпонентних палив та водопаливних емульсій [12-13], в основі яких лежать легкозаймисті та горючі рідини, спонукає шукати аналітичні методи розрахунку їх характеристик.

Метою роботи стало отримання аналітичної формули для визначення температури займання однокомпонентних рідин, проведення розрахунків, її вдосконалення та аналіз впливу на температуру займання вмісту води в рідині.

Основний матеріал. Зазвичай для аналітичної оцінки температури займання T_{fire} застосовують емпіричні формули. Так в [11] запропоновано таку залежність:

$$T_{fire} - T_0 = -47.78 + 0.882(T_{boil} - T_0) + \sum n_j a_j, \quad (1)$$

де: $T_0 = 273$ К, T_{boil} – температура кипіння, К,

a_j – емпіричний коефіцієнт, що характеризує внесок кожної структурної групи (n_j – їх кількість), а саме: $a(C-C) = 0,027$, $a(C=C) = -8,98$; $a(C \cdots C \text{ аром}) = -2,069$; $a(C-H) = -2,118$; $a(C-O) = -0,111$; $a(C=O) = -0,826$, $a(O-H) = 8,216$.

Широко відома також формула Блинова [11], що дає можливість орієнтовно визначити температуру займання індивідуальної речовини T_{fire} (в К):

$$T_{fire} = \frac{A}{D_{f0} \beta P_s}, \quad (2)$$

де: D_{f0} – коефіцієнт дифузії пари рідини при н.у. в m^2/c ,

β – стехіометричний коефіцієнт кисню в реакції горіння,

P_s – тиск насиченої пари при температурі займання в Па, $A = 45,3 \text{ К} \cdot \text{Па} \cdot m^2/c$ (для органічних сполук) та $133,3 \text{ К} \cdot \text{Па} \cdot m^2/c$ (для фосфорорганічних сполук).

Коефіцієнт дифузії пари в повітрі за нормальних умов з достатньою точністю можна розрахувати за формулою [11]:

$$D_{f0} = \frac{10^{-4}}{\sqrt{\sum_i n_i \Delta M_i}}, \quad (3)$$

де: n_i – число атомів i -го типу у складі молекул,

ΔM_i – атомні складові, значення яких наведено в табл. 1

Значення ΔM_i для різних типів атомів[11]

Атом	ΔM	Атом	ΔM	Атом	ΔM	Атом	ΔM	Атом	ΔM
$C(n_c \leq 8)$	$25+3n_c$	$C(n_c > 8)$	50	$C(\text{аром})$	25	O	17	H	1

Формула (2) є трансцендентним рівнянням відносно температури, оскільки від неї залежить тиск насиченої пари. Тому методика розрахунку за цією формулою полягає в

пошуці величини $T_{fire} P_s = \frac{A}{D_{f0} \beta}$, а потім

методом послідовних наближень знаходять температуру займання. При цьому необхідно знати температурну залежність $P_s(T)$ для цієї пари рідини: чи з довідника [10], чи у вигляді формули Антуана [11].

Для аналітичного визначення формули температури займання розглянемо, для прикладу, стаціонарні профілі концентрацій компонентів в газовій фазі поблизу краплі рідини. Стаціонарне рівняння дифузії пари та інших газів для сферичного шару навколо краплі з врахуванням стефанівської течії [14, 15] та відсутності протікання хімічних реакцій з граничними умовами на поверхні краплі та на границі приведеної плівки:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(4\pi r^2 D_i \rho_g \frac{\partial Y_i}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left(4\pi r^2 U \rho_g Y_i \right).$$

$$r = r_s, Y_i = Y_{is}, \quad r = r_f, Y_i = Y_{i\infty}.$$

Тут Y_i – відносна масова концентрація (масова частка) i -го газового компонента в газовій суміші; D_i – коефіцієнт дифузії газового компонента, m^2/c ; ρ_g – густина газового середовища, kg/m^3 ; U – швидкість стефанівської течії, m/c ; r_s, r_f – радіус краплі та приведеної плівки; індекси s та ∞ відповідають поверхні та газовому середовищу. Розв'язок рівняння дає профілі концентрацій будь-якого газового компонента $Y_i(r)$:

$$\frac{Y_i - Y_{is}}{Y_{i\infty} - Y_{is}} = \frac{\exp\left(\xi \frac{Sh}{2} \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)\right) - 1}{\exp \xi - 1}, \text{ де}$$

$$\xi = \frac{I(1 - r_s/r_f)}{4\pi r_s D_i \rho_g} = \ln\left(\frac{1}{1 - Y_{fs}}\right). \quad (4)$$

де: I – масова швидкість стефанівської течії, kg/c .

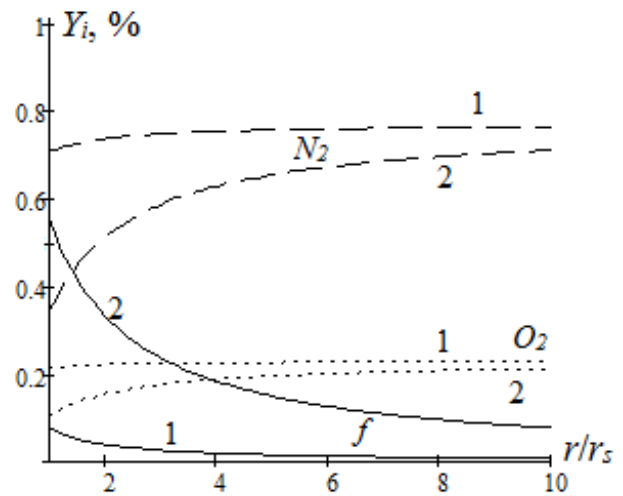


Рисунок 1 – Стаціонарні профілі концентрацій біля краплі етанолу діаметром 2.25 мм в повітрі при температурі краплі: 1) 293 К, 2) 333 К

Використовуючи рівняння Менделєєва-Клапейрона та Дальтона для суміші парів рідини та повітря (азот і кисень):

$$P_f V = \frac{m_f}{\mu_f} RT_g, \quad P_{O_2} V = \frac{m_{O_2}}{\mu_{O_2}} RT_g,$$

$$P = P_f + P_{O_2} + P_{N_2},$$

$$P_{O_2} / P_{N_2} = x_{O_2} / (1 - x_{O_2}) = 21 / 79,$$

масові частки парів рідини та кисню поблизу поверхні краплі дорівнюють

$$Y_{fs} = \frac{\mu_f}{\mu} \exp\left(\frac{L_m \mu_f}{RT_{boil}} - \frac{L_m \mu_f}{RT}\right),$$

$$Y_{O_2s} = \frac{x_{O_2} \mu_{O_2}}{\mu} \left(1 - \exp\left(\frac{L_m \mu_f}{RT_{boil}} - \frac{L_m \mu_f}{RT}\right)\right) \quad (5)$$

Тут L_m – питома теплота пароутворення, $Dж/кг$; x_{O_2} – мольна частка кисню в середовищі, μ_f, μ_{O_2}, μ – молярна маса парів, кисню та суміші, $kg/моль$.

Тут взято $x_{O_2} = 0,21$ (повітря). Тиск насиченої пари на поверхні краплі визначається з рівняння Клаузіуса-Клапейрона в припущенні сталості питомої теплоти пароутворення (в першому припущенні при температурі кипіння):

$$\frac{dP_f}{dT} = \frac{L_m \mu_f}{RT^2} P_f, \quad (6)$$

На рис. 1 представлені профілі (4) масових часток парів, кисню та азоту в газі. Природно, що зі збільшенням температури поверхні краплі, масова частка парів біля поверхні збільшується, а кисню – зменшується. Оскільки крапля перебуваючи в нагрітому повітрі прогривається, то відношення поверхневих концентрацій парів та кисню Y_{fs}/Y_{O_2s} монотонно збільшується. Прийемо, що при температурі займання саме біля поверхні краплі повинно виконуватися стехіометричне відношення між паром та киснем $Y_f/Y_{O_2}|_{cmex}$ для виникнення горіння парів. Якщо прийняти, що $A_f + \beta A_{O_2} \rightarrow \dots$ є брутто-рівнянням хімічної реакції, то $Y_f/Y_{O_2}|_{cmex} = \mu_f/\beta\mu_{O_2}$.

Застосувавши (5), не важко отримати значення для температури поверхні краплі, що і буде температурою займання рідини, в цьому випадку:

$$T_{fire} = T_{boil} \left(1 + \frac{RT_{boil}}{L_m \mu_f} \ln \left(1 + \frac{\beta}{x_{O_2}} \right) \right)^{-1} \quad (7)$$

Проведемо і порівняємо розрахунки за наведеними емпіричними формулами (1), (2) та аналітичною формулою (7).

Результати та обговорення. Для порівняння результатів розрахунків були взяті по декілька рідин з кожного класу. Умовно легкозаймисті та горючі рідини поділимо на такі категорії за значенням температури спалаху:

- Особливо небезпечні (ЛЗР-ОН): температура спалаху нижча за -18°C ;
- Постійно небезпечні (ЛЗР-ПН): температура спалаху $-18 \div 23^\circ\text{C}$;
- Небезпечні при підвищенні температури (ЛЗР-НПТ): температура спалаху $24 \div 60^\circ\text{C}$;
- Горючі рідини (ГР) з температурою спалаху понад 60°C .

Таблиця 2

Вихідні дані для розрахунку [10, 16, 17]

Рідина	Хімічна формула	β	L_m , при T_{boil} , кДж/кг	T_{cr} , °C	lgP_s (P_s в кПа, T в К)	D_f , $10^{-6}\text{м}^2/\text{с}$ по (3)
Легкозаймисті рідини, особливо небезпечні (ЛЗР-ОН)						
ацетальдегід	CH_3CHO	2,5	585	188,0	6,32-1099/($T-40$)	11,0
ацетон	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	4	502	235,5	6,38-1282/($T-36$)	8,9
гексан	C_6H_{14}	9,5	335	234,5	6,00-1166/($T-49$)	6,1
дітиловий етер	$(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$	6	358	193,4	7,00-1099/($T-41$)	7,6
Легкозаймисті рідини, постійно небезпечні (ЛЗР-ПН)						
бензол	C_6H_6	7,5	394	289,4	5,61-902/($T-95$)	8,0
етанол	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	3	838	243,0	7,81-1919/($T-21$)	10,8
гептан	C_7H_{16}	11	318	267,0	6,08-1295/($T-53$)	5,4
ізопропанол	$\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$	4,5	664	235,6	7,51-1733/($T-41$)	8,9
толуол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$	9	361	320,4	6,05-1328/($T-55$)	7,3
етилацетат	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	5	363	250,4	6,23-1245/($T-55$)	7,6
Легкозаймисті рідини, небезпечні при підвищенні температури (ЛЗР-НПТ)						
пропанол	$\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$	4,5	691	236,7	7,44-1752/($T-48$)	8,9
бутанол	$\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$	6	585	288,6	8,72-2265/($T+7$)	7,6
оцтова кислота	CH_3COOH	2	395	321,6	7,10-1906/($T-17$)	10,0
Горючі рідини						
етиленгліколь	$\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$	2,5	815	372,0	8,14-2753/($T-21$)	9,9
пропіленгліколь	$\text{C}_3\text{H}_6(\text{OH})_2$	4	645	351,0	9,20-3271/ T	8,3
гліцерин	$\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$	3,5	663	577,0	8,35-3263/($T-43$)	7,9

Таблиця 3

Температури займання ЛЗР та ГР

Рідина	T_{boil} , °C	T_{flash} , °C [10]	T_{fire} , °C по (1)	T_{fire} , °C по (2)	T_{fire} , °C по (7)	T_{fire} , °C по (8)	T_{fire} , °C експ [10]
ацетальдегід	20,8	-40	-38,5	-32,5	-36,6	-33,6	-35
ацетон	56,4	-18	-11,5	-11,6	-16,1	-11,8	-5
гексан	68,7	-23	-16,7	-13,9	-25,0	-18,1	
дітиловий етер	35,6	-41	-37,7	-41,0	-40,6	-35,6	
бензол	80,0	-11	-2,3	-3,4	-10,4	-5,0	
етанол	78,4	16,1	18,9	17,2	18,2	21,5	18
гептан	98,4	-4	5,3	9,5	-5,1	3,1	-4
ізопропанол	82,4	11,7	18,2	18,4	15,8	20,0	21
толуол	110,6	7	20,4	16,2	8,4	15,1	
етилацетат	77,1	-3	2,3	4,6	-2,2	2,9	6

Продовження таблиці 3

Рідина	$T_{boil},$ °C	$T_{flash},$ °C[10]	$T_{fire},$ °C по (1)	$T_{fire},$ °C по (2)	$T_{fire},$ °C по(7)	$T_{fire},$ °C по(8)	$T_{fire},$ °C експ[10]
пропанол	97,2	23	31,3	30,1	27,8	32,0	30
бутанол	117,0	29	44,5	29,0	38,1	43,3	43
оцтова кислота	118	40	57,3	48,7	22,6	28,7	61
етиленгліколь	197	111	133,7	116,8	119,4	124,5	
пропіленгліколь	188	96-107	121,6	105,5	100,5	107,1	110
гліцерин	290	174	221,8	188,0	188,3	193,7	187

Всі вихідні дані та параметри представлені в табл. 2.

В табл. 3 представлені результати розрахунку температури займання за формулами (1), (2) та (7), також експериментальні значення [10]. Видно, що розрахункові значення за формулою (7) доволі сильно відрізняються від інших. Це в першу чергу пов'язане з тим, що питома теплота пароутворення достатньо суттєво збільшується при зменшенні температури. А температура займання значно менша за температуру кипіння рідини. В довідниках [10, 16, 17] зазвичай, надаються значення теплоти пароутворення при температурі кипіння рідини, іноді при нормальних чи стандартних умовах. Залежність теплоти пароутворення від температури можна з похибкою 1,78% визначити згідно формули Ватсона[18-19]:

$$L_m = L_{mb} \left(\frac{T_{cr} - T}{T_{cr} - T_{boil}} \right)^{0.38}$$

де: T_{cr} – критична температура рідини, К.

В температурному інтервалі нижче температури кипіння цю залежність можна з достатньою точністю апроксимувати лінійною залежністю:

$$L_m = L_{mb} - B(T - T_{boil}), \quad B = \frac{0.38L_{mb}}{T_{cr} - T_{boil}}$$

де: L_{mb} – питома теплота пароутворення рідини при температурі кипіння рідини.

Використовуючи отриману температурну залежність питомої теплоти пароутворення, закон Клаузіуса-Клапейрона (6) та температурна залежність тиску насиченої пари набуває вигляду:

$$\frac{dP_f}{dT} = \frac{(L_{mb} - B(T - T_{boil}))\mu_f}{RT^2} P_f$$

$$\text{та } P_{fs} = AT^{-\frac{B\mu_f}{R}} \exp\left(-\frac{B\mu_f T_{boil}}{RT}\right) \exp\left(-\frac{L_{mb}\mu_f}{RT}\right).$$

Повторюючи викладку, можна отримати рівняння для визначення температури займання рідини, яка дорівнює температурі поверхні:

$$\frac{T_{boil}}{T_{fire}} = 1 + \frac{RT_{boil}}{(L_{mb} + BT_{boil})\mu_f} \ln \left(\left(\frac{T_{fire}}{T_{boil}} \right)^{\frac{B\mu_f}{R}} \left(1 + \frac{\beta}{x_{O_2}} \right) \right) \quad (8)$$

Розв'язки цього трансцендентного рівняння для взятих рідин представлені в табл. 3.

Таблиця 4

Залежність температури займання водних розчину етанолу та ацетону від молярної частки води ($Z_w = 1 - Z_f$).

$Z_w, \%$	0	10	20	30	40	50
$T_{flash},$ °C (ацетон) [10]		-18		-14		-11
$T_{fire},$ °C (ацетон) по (8)	-11,8	-10,0	-8,0	-5,6	-2,8	0,6
$T_{flash},$ °C (етанол) [10]		16	18	20-22	22	25
$T_{fire},$ °C (етанол) по (8)	21,5	23,3	25,3	27,6	30,3	33,6

Видно, що отримані значення значно краще корелюють з іншими.

Перевагою отриманих формул (7) та (8) є можливість визначення впливу вмісту води в розчині з легкозаймистою рідиною. Вважаємо, що виконується закон Рауля для парів горючої рідини $P_s = Z_i \cdot P_{s0}$, де Z_f – молярна частка ЛЗР в суміші, P_{s0} – тиск насиченої пари над чистою ЛЗР. Тоді в формулах (7) та (8) під логарифмом треба замінити $(1 + \beta/x_{O_2})$ на $Z_f (1 + \beta/x_{O_2})$.

В табл. 4 представлені розрахунки температури займання для водних розчинів етанолу та ацетону. Отриману динаміку зміни температури займання при збільшенні частки води в розчині можна підтвердити неявно збільшенням температури спалаху.

Якщо припустити, що в невеликому температурному інтервалі різниця між температурами спалаху та займання практично не змінюється, то маємо (табл. 4) практично однаковий темп зростання вказаних температур при збільшенні вмісту води.

Висновки та пропозиції з перспективами подальших досліджень. В даній роботі запропонована аналітична формула для розрахунку температури займання індивідуальної горючої рідини, яка ґрунтується на припущенні, що при займанні на поверхні рідини утворюється стехіометрія між концентраціями горючого газу і окисника. Цей підхід дає змогу врахувати не лише залежність насиченої пари рідини від температури, але і температурну залежність питомої теплоти пароутворення. Остання залежність є суттєвою і важливою при визначенні температури займання, бо, зазвичай, ця температура є суттєво нижчою за температуру кипіння. Порівняння з результати розрахунків за відомими емпіричними залежностями для різних легкозаймистих і горючих рідин дають задовільні результати.

Перевагою отриманих формул (7) та (8) є можливість визначити температури займання бінарної суміші горючої з негорючою рідиною, наприклад, водою.

Важливим питанням залишається аналітичне визначення температур займання водно-паливних емульсій, які є перспективним альтернативним паливом. З іншої сторони, питання аналітичного визначення температур спалаху та займання бінарних чи мультикомпонентних розчинів горючих рідин залишається в розробці.

Список літератури:

1. Федоровський В. В., Веселівський Р. Б. Підходи до визначення температур спалаху та займання горючих рідин : Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека: № 2. 2016. С. 49-54.
http://nbuv.gov.ua/UJRN/sbcpefs_2016_2_10
2. NFPA 30 Flammable and Combustible Liquids Code 2021 Edition. 167 p.
www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=30
3. DRAFT Guidance on the Application of the CLP Criteria (Public) DRAFT Version 5.0 – July 2016. 183 p.
https://echa.europa.eu/documents/10162/17235/clp_guidance_draft_v5_part2_en.pdf
4. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2016. 34 p
https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759
5. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Вид. офіц. Київ: ДП «Укр НДНЦ». 2020. 87 с.
https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_8828_2019.pdf
6. Abdulkadir Isa, Alhassan H. M. (2020) Impact of Climate Change on Rheological Properties of Bitumen. *Open Journal of Civil Engineering*, 10, pp. 93-104. DOI: 10.4236/ojce.2020.102009.
7. Supan Wang, Yu Zhang, Xinyan Huang (2021) Ignition of EPS foam by a hot moving hollow particle: Threshold, auto-ignition, and fire point. *Combustion and Flame*, 232, p. 111524
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111524>
8. Babu D., Anand R. (2019) Influence of fuel injection timing and nozzle opening pressure on a CRDI-assisted diesel engine fueled with biodiesel-diesel alcohol fuel. *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment Woodhead Publishing Series in Energy*, pp. 353-390.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102728-8.00013-9>
9. Thangarasu Vinoth, Anand R. (2019) Physicochemical fuel properties and tribological behavior of aeglemarmeloscorrea biodiesel. *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment Woodhead Publishing Series in Energy*, pp 309-336
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102728-8.00011-5>
10. Баратов А.Н., Корольченко А.Я., Кравчук Г.Н. и др. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочн. изд. : в 2 книгах М., Химия, 1990. 496 с.
11. Тарахно О.В., Трегубов Д.Г., Жернокльов К.В., Шепелева А.І., Коврегін В.В. Теорія розвитку й припинення горіння. Практикум. Частина II: Х.: НУЦЗУ, 2010. 314 с.
12. Karmakar, S., Som, S.K., Rao, D.C.K. (2018) Combustion of Multi-component Fuel Droplets. In: Basu, S., Agarwal, A., Mukhopadhyay, A., Patel, C. (eds) *Droplets and Sprays. – Energy, Environment, and Sustainability*. Springer, Singapore, pp. 77-114.
https://doi.org/10.1007/978-981-10-7449-3_4
13. Strizhak P. A., Piskunov M. V., Volkov Roman S., Legros J. C. (2017) Evaporation, boiling and explosive breakup of oil-water emulsion drops under intense radiant heating. *Chemical engineering research and design* . 127. pp. 72–80.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2017.09.008>.
14. Sazhin S. *Droplets and Sprays*. London: SpringerVerlag, 2014. 345 p. DOI:10.1007/978-1-4471-6386-2
15. Черненко О. С., Калінчак В. В., Дараков Д.С., Копійка О.К. Вплив підвісу на кінетику випаровування краплі рідкого палива. *Фізика аеродисперсних систем*. № 52. 2015. С. 47-62. DOI: <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2015.52.159698>
16. David R.Lide *CRC Handbook of Chemistry and Physics* 85 ht ed. CRC Press, Jun 29, 2004. Science, 2712 p.
<https://doi.org/10.1021/ja041017a>
17. Рабинович В.А., Хавин З.Я. *Краткий химический справочник*. Л.: Химия, 1991. 432с.
18. Watson K. M. (1943) Thermodynamics of the Liquid State. Generalized prediction of properties. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 35, 4, pp. 398 – 406. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie50400a004>

19. Poling Bruce E., Prausnitz John M., O'Connell John P. Properties of Gases and Liquids, 5th Edition. McGraw-Hill Education, 2001. 803 p. DOI: 10.1036/0070116822

References:

1. Fedorovskyi V.V., Veselivskyi R.B. Approaches to determining flash and fire points of flammable liquids / *Naukovyi visnyk: tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*: № 2. 2016. pp. 49-54. http://nbuv.gov.ua/UJRN/sbcpsc_2016_2_10 (in Ukr)

2. NFPA 30 Flammable and Combustible Liquids Code 2021 Edition. 167 p. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=30>

3. DRAFT Guidance on the Application of the CLP Criteria (Public) DRAFT Version 5.0 – July 2016. 183 p.

https://echa.europa.eu/documents/10162/17235/clp_guidance_draft_v5_part2_en.pdf

4. DSTU Б В.1.1-36:2016 Determination of categories of premises, buildings and external installations according to explosion and fire hazard. Ed. officer. Kiev: Minregion of Ukraine, 2016. 34 p. https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759

5. DSTU 8828:2019 Fire safety. Ed. officer. Kiev: UkrNDIPB». 2020. 87 p. https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_8828_2019.pdf

6. Abdulkadir Isa, Alhassan H. M. (2020) Impact of Climate Change on Rheological Properties of Bitumen. *Open Journal of Civil Engineering*, 10, pp. 93-104. DOI: 10.4236/ojce.2020.102009.

7. Supan Wang, Yu Zhang, Xinyan Huang (2021) Ignition of EPS foam by a hot moving hollow particle: Threshold, auto-ignition, and fire point. *Combustion and Flame*, 232, p. 111524 <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111524>

8. Babu D., Anand R. (2019) Influence of fuel injection timing and nozzle opening pressure on a CRDI-assisted diesel engine fueled with biodiesel-diesel alcohol fuel. *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment Woodhead Publishing Series in Energy*, pp. 353-390. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102728-8.00013-9>

9. Thangarasu Vinoth, Anand R. (2019) Physicochemical fuel properties and tribological behavior of aeglemarmeloscorrea biodiesel. *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment Woodhead Publishing Series in Energy*, pp. 309-336. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102728-8.00011-5>

10. Baratov A.N., Ivanov E.N., Korolchenko A.Ya. *Pozharnaia bezopasnost. Vzrvobezopasnost [Fire safety. Explosion protection]*. reference Ed. / M.: Khimiya, 1987. 269 p.

11. Tarakhno O.V., Trehubov D.H., Zhernoklov K.V., Shepeleva A.I., Kovrehin V.V. *Teoriia rozvytku y pryypynennia horinnia. [Theory of development and cessation of combustion.] Practicum Part II: / Kh.*, 2010. 314 p.

12. Karmakar, S., Som, S.K., Rao, D.C.K. (2018) Combustion of Multi-component Fuel Droplets. In: Basu, S., Agarwal, A., Mukhopadhyay, A., Patel, C. (eds) *Droplets and Sprays. – Energy, Environment, and Sustainability*. Springer, Singapore, pp. 77-114. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7449-3_4

13. Strizhak P. A., Piskunov M. V., Volkov Roman S., Legros J. C. (2017) Evaporation, boiling and explosive breakup of oil-water emulsion drops under intense radiant heating. *Chemical engineering research and design*. 127. pp. 72–80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2017.09.008>.

14. Sazhin S. *Droplets and Sprays*. London: SpringerVerlag, 2014. 345 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-6386-2

15. Chernenko O.S., Kalinchak V.V., Darakov D.S., Kopyyka O.K. Effect of suspension on the kinetics of liquid fuel droplet evaporation: Physics of aerodisperse systems Черненко О. С., Калінчак В. В., Дараків Д.С., Копійка О.К. Вплив підвісу на кінетику випаровування краплі рідкого палива. *Fizyka aerodypersnykh system*. № 52. 2015. pp. 47-62. DOI: <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2015.52.159698>

16. David R. Lide *CRC Handbook of Chemistry and Physics* 85 th ed. CRC Press, Jun 29, 2004. Science, 2712 p. <https://doi.org/10.1021/ja041017a>

17. Rabynovych V.A., Khavyn Z.Ia. *Brief chemical reference book [Kratkyi khymycheskyi spravochnyk]*. / L.: Khymyia, 1991. 432 p.

18. Watson K. M. (1943) *Thermodynamics of the Liquid State. Generalized prediction of properties*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 35, 4, pp. 398 – 406. DOI: doi.org/10.1021/ie50400a004

19. Poling Bruce E., Prausnitz John M., O'Connell John P. Properties of Gases and Liquids, 5th Edition. McGraw-Hill Education, 2001. 803 p. DOI: 10.1036/0070116822

© В. В. Калінчак, О. С. Черненко,
О. К. Копійка, 2023

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 14.03.2023.

Прийнято до публікації 16.05.2023.