



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.10>

О. С. Черненко, В. В. Калінчак, М. О. Іванов, О. К. Копійка
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
м. Одеса, Україна

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

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

<https://orcid.org/0009-0006-1547-4067> – М. О. Іванов

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

✉ teplophys@onu.edu.ua

ОЦІНЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ЗАЙМАННЯ БІНАРНИХ РОЗЧИНІВ

Дослідженню температури займання рідини (fire point) на відміну від температури спалаху (flashpoint) приділяється вкрай мала увага. Одним із підходів, що використовувався для знаходження аналітичної умови при температурі займання, є встановлення відношення між тиском насиченої пари і стехіометричним значенням тиску. Однак автори для різних класів індивідуальних органічних сполук отримували «характерні» значення цього відношення від 0,6 до 1,5. Для бінарних розчинів подібних досліджень не проводилося.

Метою статті є дослідити вплив стехіометричного відношення між парою та киснем і зміни складу бінарних сумішей на їх температуру займання. У роботі запропоновано аналітичні залежності температури займання від складу бінарного розчину, які ґрунтуються на фізико-хімічних властивостях компонентів розчину (теплота пароутворення, її температурна залежність, критична температура й температура кипіння). Розглядаються окремо водні розчини легкозаймистої речовини (ЛЗР) і розчин двох легкозаймистих речовин.

В основі аналітичної формули лежить припущення, що в момент займання рідини біля її поверхні спостерігається стехіометричне співвідношення між парою легколетючої рідини й киснем повітря. Зменшення концентрації пари біля поверхні водного розчину враховується законом Рауля.

При оцінюванні температури займання бінарних розчинів можливі умовно два випадки: температури займання компонентів розчину 1) суттєво відрізняються або 2) близькі. У першому випадку можна припустити, що важколетючий компонент практично не випаровується за наявності більш летючого компонента, тому його можна вважати інертним компонентом. Однак це припущення можливе при частці легколетючого компонента більше ніж 50%. У більш загальному випадку припускається одночасна участь обох пар у займанні краплі й припускається, що стехіометрія спостерігається для кожної пари.

Спостерігається узгодження отриманої залежності з наявними експериментальними даними (методом відкритого тиглю) за водним розчином ацетону, метанолу, етанолу і пропанолів, а також розчинів н-октану/н-декану й етанолу/бутанолу. Це дає змогу стверджувати, що припущення про досягнення стехіометрії для пари кожного компонента суміші є прийнятним.

Ключові слова: температура займання, бінарний розчин, водний розчин, легкозаймиста рідина.

O. S. Chernenko, V. V. Kalinchak, M. O. Ivanov, O. K. Kopyka
Odesa I. I. Mechnikov National University,
Odesa, Ukraine

DETERMINATION OF FIRE POINT BINARY LIQUID SOLUTION

Very little attention is paid to the study of fire point. One approach used to find the analytical condition for fire point is to fit between the saturated vapor pressure and the stoichiometric value of the pressure. However, different authors for different classes of individual organic compounds identified “characteristic” values of this ratio from 0.6 to 1.5. Similar studies were not conducted for binary solutions. The purpose of this work is to

investigate the influence of the stoichiometric ratio between steam and oxygen and changes in the composition of binary mixtures on their fire point. In this work, analytical dependences of fire point binary solution from his properties are proposed, which are based on the physicochemical properties of the solution components (heat of vaporization, its temperature dependence, critical temperature and boiling point). An aqueous solution of a flammable liquid and a solution of two flammable liquids are considered separately.

The basis of the analytical formula is the assumption that at the moment of liquid ignition near its surface, mass fractions vapor of the light summer liquid and the oxygen of the air is stoichiometrically. The decrease in vapor concentration near the surface of an aqueous solution is taken into account by Raoult's law.

When evaluating fire point of binary solutions there are two cases: fire points of the solution components 1) is significantly different or 2) close. In the first case, it can be assumed that a one component difficult evaporates. And therefore it can be called an inert component. However, this assumption is worse when his part is more than 50%. In the more general case, simultaneous participation of both pairs in droplets ignition is assumed and stoichiometry is assumed to be allowed for each vapor.

The agreement of the obtained dependence with the available experimental data on aqueous solutions of acetone, methanol, ethanol, and propanol, as well as solutions of n-octane/n-decane and ethanol/butanol is observed. This allows us to state that the assumption of achieving stoichiometry for a vapor of each mixture component is acceptable.

Key words: fire point, binary solution, aqueous solution, flammable liquid.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Важливими показниками фізико-хімічних властивостей горючих рідких речовин є температури спалаху й займання, незважаючи на те що ці характеристики зазвичай залежать від методики їх визначення [1]. Однак саме ці температури використовують для класифікації рідин на легкозаймисті й горючі [2].

В огляді [1] розглянуто основні моделі оцінювання температури спалаху, які ґрунтуються на температурі кипіння, тиску пару чи молекулярній структурі (дескриптори). Основним підсумком автори вказують, що не існує універсальної моделі для прогнозування температури спалаху індивідуальних горючих сумішей.

Пошук альтернативних палив для економії або заміни традиційних горючих останнім часом привів до активного дослідження займання й горіння сумішей горючих речовин, у тому числі й із додаванням води, наприклад, у вигляді емульсій чи пін [3; 4], температури спалаху бінарних сумішей горючих речовин [5; 6] чи їх водних розчинів [7]. Пошук нових підходів не зупиняється [8; 9].

Якщо кількість різноманітних досліджень температури спалаху (flashpoint) дуже велика, то температурі займання (fire point) приділяється суттєво менше уваги [10]. Це можна пояснити, на нашу думку, тим, що пожежна небезпека виникає вже при температурі спалаху. Крім того, прийнято вважати, що температура займання перевищує температуру спалаху на 1–5 °С для легкозаймистих і на 30–35 °С для горючих рідин.

Одним із цікавих методів, що застосовується для оцінювання температури займання (firepoint), є модель Джонса [11]. У роботі на прикладі чотирьох органічних сполук (м-ксилолу, н-бутанолу, н-декану й н-додекану) температура займання розраховують за принципом, що температура

займання виникає, коли тиск пари перевищує стехіометричне значення (з киснем біля поверхні рідини відповідно до хімічної реакції) в 1,5 раза: $p_s/p_{st} = 1,5$. У роботі Роберта й Вайнса [12], на яку й посилається Джонс, для невеликого ряду органічних сполук указані коефіцієнти p_s/p_{st} від 1,33 до 1,92.

Посилаючись на модель Джонса, у роботах [13; 14] на основі власних експериментів і розрахунків також зроблені оцінки. Так, для температури займання органічних кислот (оцтова, н-пропіонова, н-масляна, мурашина) [13] встановлено середнє значення $p_s/p_{st} = 1,11$. Для гомологічного ряду насичених одноатомних спиртів (від метанолу до октанолу) [14] отримано середнє значення $p_s/p_{st} = 0,78$, причому відношення тисків по мірі збільшення кількості атомів збільшувалося більш/менш монотонно від 0,56 до 1,08. Автори вважали, що значення температури спалаху у відкритому тиглі практично збігалися з температурою займання спиртів.

Отже, одностайної думки про значення тиску насиченого пару при температурі займання немає. Цю відмінність можна пояснити різними методами експериментального визначення температури займання індивідуальних рідин.

При визначенні температури спалаху також існують підходи, в основі яких лежить стехіометрія між компонентами в реакції горіння. Так, існує правило Леслі-Дженіза (Leslie-Geniesse Rule) [15] для відношення тиску насиченого пару рідини до атмосферного тиску: $p_s/p_0 = 1/8\beta$, де β – стехіометричний коефіцієнт у реакції горіння. Це правило виявилось надзвичайно точним при прогнозуванні значень температури спалаху 1062 хімічних речовин.

Варто навести відоме правило Ллойда (the Lloyd's Rule) [16; 17] для визначення температури

спалаху, згідно з яким об'ємна концентрація парів при температурі спалаху становить $C_f \approx 0,55C_{st}$, що лягло в основу «напівстехіометричного правила» $C_f \approx 0,5C_{st}$. Тут C_{st} – стехіометрична концентрація пари.

Це правило з достатньою точністю прогнозує температуру спалаху для великого кола органічних сполук. Винятками є, наприклад, диметилловий ефір, гліцерин, бензойна та мурашина кислоти.

У роботі [18] запропоновано спосіб оцінювання температури займання рідини. Температура запалювання в разі виконання умови самоприскорення (велике значення добутку теплоти горіння на енергію активації) передусім визначається встановленням стехіометричних концентрацій кисню й горючих газів у газовій фазі $Y_{fs} / Y_{O_2s} = \mu_f / \nu \mu_{O_2} \Big|_{cmex}$ поблизу поверхні краплі, які знаходяться з хімічних рівнянь горіння.

Доволі точно визначити температуру займання індивідуальної речовини T_{fire} (в К) дає змогу й відома формула Блинова [19]: $T_{fire} = \frac{A}{D_{f0} \beta p_s}$,

де D_{f0} – коефіцієнт дифузії пари рідини при н.у. в м²/с, $A = 45,3 \text{ К} \cdot \text{Па} \cdot \text{м}^2/\text{с}$ (для органічних сполук).

Для суміші рідин оцінити температуру спалаху чи займання ще складніше, оскільки склад суміші парів над поверхнею рідини змінюється залежно від температури рідини. Для багатокомпонентних рідких сумішей, коли один із компонентів більш летючий, часто припускають, що, наприклад, температура спалаху визначається лише дуже малою концентрацією розчиненого легколеткого компонента. У роботі [20] була спроба теоретично передбачити температуру спалаху й займання рідкої паливної суміші на прикладі н-октану і н-декану, у якій кожен компонент має різну летючість. Припускалося, що рідка суміш є ідеальним розчином, тоді можна застосувати закон Рауля. Загальний рівноважний тиск пари рідкої суміші є сумою парціальних тисків компонентів розчину. Однак умови займання суміші не наводилися.

Таким чином, дослідження займання й горіння бінарних і мультикомпонентних сумішей рідких палив різного складу (емульсії, паливні суміші, піни) активно проводяться. На відміну від температур спалаху й температур самозаймання таких систем, для оцінювання яких є аналітичні або емпіричні підходи, для температур займання інформації вкрай мало. Відсутній аналіз залежності температури займання бінарної суміші рідких палив від її складу та фізико-хімічних властивостей чистих компонентів (температури кипіння, теплоти випаровування, стехіометричні коефіцієнти).

Мета статті (постановка завдання) – дослідити вплив стехіометричного відношення між паром та киснем і зміни складу бінарних сумішей на їх температуру займання. Окремо будуть розглянуті водні розчини горючих легкозаймистих рідин і бінарні розчини горючих рідини.

Методи дослідження. Експериментальні значення температури займання сумішей рідин отримуються методом відкритого тиглю, а саме: визначають найменшу температури суміші, при якій у разі піднесення джерела тепла на її поверхні виникає стійке горіння. Для аналітичного оцінювання використовуються закони тепломасопереносу для краплі рідини в газовому середовищі.

Результати дослідження

Займання водних розчинів. Тиск насиченої пари p_s визначається з рівняння Клаузіуса-Клапейрона. Отримати класичну залежність p_s від температури

$$p_{fs0} = P_0 \exp \left(\frac{L_m \mu_f}{R} \left(\frac{1}{T_{boil}} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (1)$$

можна за умови, що теплота пароутворення є сталою величиною та рівністю тиску насиченої пари й атмосферного тиску при температурі кипіння. Аналогічні степеневі залежності проявляються в емпіричних залежностях у формі Антуана (див. таблицю 1), іноді з різними коефіцієнтами Антуана в різних температурних інтервалах [21]. Водочас теплота пароутворення при зміні температури від стандартної до температури кипіння зменшується приблизно на 10%. У роботі [18] у законі Клаузіуса-Клапейрона запропоновано використовувати лінійну залежність теплоти пароутворення від температури (розклад формули Ватсона):

$$L_m = L_{mb} - B(T - T_{boil}), \quad B = \frac{0,38L_{mb}}{T_{cr} - T_{boil}}. \quad (2)$$

Тут L_{mb} – питома теплота пароутворення рідини при температурі кипіння рідини, T_{cr} – критична температура рідини.

У результаті використання (2) вдалося отримати аналітичну залежність для тиску насиченої пари $p_{fs0}(T)$ для індивідуальної рідини:

$$p_{fs0} = P_0 \cdot \left(\frac{T}{T_{boil}} \right)^{\frac{B\mu_f}{R}} \exp \left(\frac{[L_{mb} + BT_{boil}] \mu_f}{R} \left(\frac{1}{T_{boil}} - \frac{1}{T} \right) \right). \quad (3)$$

Недоліком отриманої залежності тиску насиченої пари від температури є представлення її у вигляді добутку степеневої й експоненти ареніусівського типу, що значно ускладнює її використання в аналітичних розрахунках.

Фізико-хімічні властивості рідин [2; 22]

Рідина	β	L_m , при T_{boil} , кДж/кг	T_{boil} , °C	T_{cr} , °C	IgP_s (P_s в кПа, T в К)	T_{flash} , °C	T_{fire} , °C
Ацетон C_3H_6O	4	502	56,4	235,5	6,38–1282/($T-36$)	-18	-5
Метанол CH_3OH	1,5	1100	64,9	239,5	7,35–1660/($T-27$)	6	13
Етанол C_2H_5OH	3	838	78,4	243,0	7,81–1919/($T-21$)	16	18
2-пропанол C_3H_7OH	4,5	664	82,4	235,6	7,51–1733/($T-41$)	11,7	21
1-пропанол C_3H_7OH	4,5	691	97,2	236,7	7,44–1752/($T-48$)	23	30
1-бутанол C_4H_9OH	6	585	29	288,6	8,72–2265/($T+7$)	29	43
n-октан C_8H_{18}	12,5	299	126	296,0	6,09–1380($T-61$)	14	19
n-декан $C_{10}H_{22}$	15,5	273	174	344,4	6,52–1810($T-45$)	47	66

Відмінність в інтервалі температур ($295 \div T_{boil}$) формули (3) та емпіричної залежності при більш низьких температурах становить до 5%.

В основі знаходження температури займання рідини будемо використовувати припущення, що біля поверхні рідини виконується стехіометричне відношення між паром та киснем $Y_f / Y_{O_2} \Big|_{cmex}$ для виникнення горіння парів. Тут Y_f , Y_{O_2} – відносні масові концентрації горючого газу й кисню. Якщо прийняти, що $A_f + \beta O_2 \rightarrow \nu_1 CO_2 + \nu_2 H_2O$ є брутто-рівнянням хімічної реакції, то $Y_f / Y_{O_2} \Big|_{cmex} = \mu_f / \nu \mu_{O_2}$. Тут прийнято, що окислення є повним і кінцевими продуктами окислення вуглеводнів є вуглекислий газ і вода. Це припущення є прийнятним з огляду на невисокі температури займання, коли спостерігається кінетичний режим окислення.

У цьому випадку ми розглядаємо водний розчин горючої рідини. Використаємо закони Рауля й Дальтона, рівняння Менделєєва-Клапейрона для суміші парів рідини, води та повітря (азот і кисень):

$$p_{fs} = Z_f \cdot p_{fs0}, P_0 = p_f + p_w + p_{O_2} + p_{N_2},$$

$$p_{ws} = (1 - Z_i) \cdot p_{ws0},$$

$$p_{O_2} / p_{N_2} = x_{O_2} / (1 - x_{O_2}) = 21 / 79, p_f V = \frac{m_f}{\mu_f} RT_g,$$

$$p_{O_2} V = \frac{m_{O_2}}{\mu_{O_2}} RT_g, P_0 V = \frac{m}{\mu} RT_g.$$

Зазвичай досліджують такі розчини, де температура кипіння легкозаймистої рідини менша за температуру кипіння води. Тоді вода є інертним компонентом розчину і її частка в газовій суміші Y_{ws} поблизу краплі значно менша за частку легкозаймистої рідини ($Y_{ws} \ll Y_{fs}$).

Тоді відношення масових часток парів рідини та кисню поблизу поверхні краплі при займанні дорівнює:

$$\frac{Y_{fs}}{Y_{O_2s}} \Big|_{cmex} = \frac{Z_f \frac{\mu_f}{\mu} p_{fs0}}{x_{O_2} \mu_{O_2} (1 - Z_f p_{fs0})} = \frac{\mu_f}{\beta \mu_{O_2}}. \quad (4)$$

Тут x_{O_2} – мольна частка кисню в середовищі, μ_f , μ_{O_2} , μ – молярна маса парів, кисню та суміші, кг/моль. Тут узято $x_{O_2} = 0,21$ (повітря), Z_f – молярна частка ЛЗР у суміші, p_{fs0} – тиск насиченої пари над чистою ЛЗР.

Для отримання залежності температури займання рідини від масової частки горючої рідини у водному розчині зручно використати обернену залежність $Z_f(T_{fire})$, яку з (4) з урахуванням (1) представимо у вигляді:

$$Z_f = \frac{P_0}{p_{fs0} \left(\frac{\beta}{x_{O_2}} + 1 \right)} = \frac{\exp \left(\frac{L_m \mu_f}{T_{boil} R} \left(\frac{T_{boil}}{T_{fire}} - 1 \right) \right)}{\left(\frac{\beta}{x_{O_2}} + 1 \right)}. \quad (5)$$

Як об'єкти для порівняння взяті дані Сабрі (Sabri) [11] щодо температури займання (firepoint) водних розчинів ацетону, метанолу, етанолу, 1-пропанолу і 2-пропанолу. Фізико-хімічні властивості, які використовувалися при розрахунку, наведені в таблиці 1. Усі наведені ЛЗР мають температуру кипіння меншу за 100 °C.

На рисунку 1 представлені розрахункові залежності температури займання для вказаних водних розчинів. Загалом динаміка збільшення температури займання зі збільшенням частки води добре узгоджується з наявними експериментальними даними. Для деяких речовин (етанол, метанол) наявні відхилення (біля 5 °C), що можна пояснити впливом методу вимірювання на кількісні характеристики температури займання. Автори [11] наводять результати власних теоретичних розрахунків fire point (криві 1', 2', 4', 5', рисунок 1), але вони узгоджуються з експериментальними результатами значно гірше.

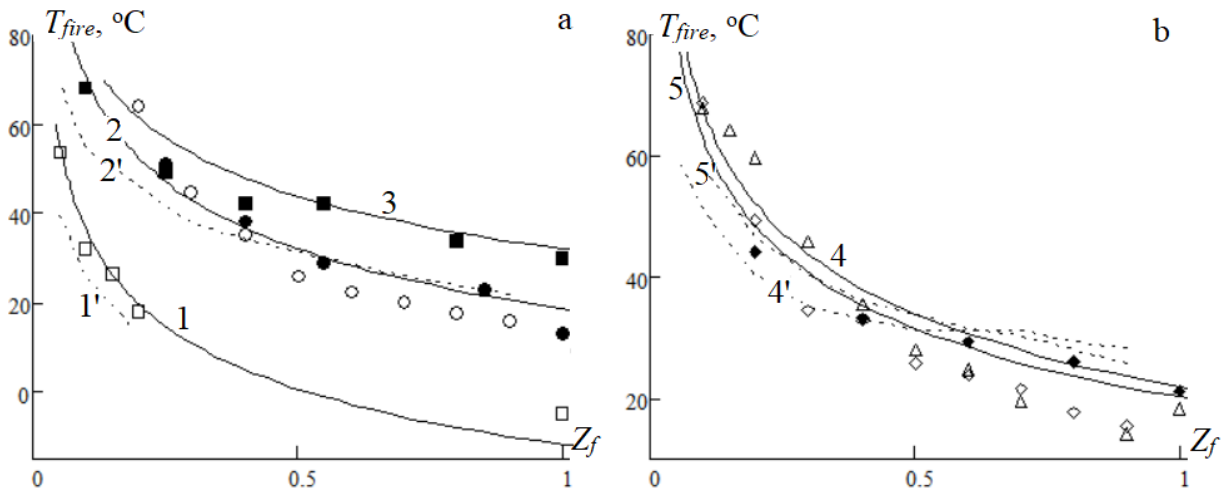
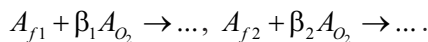


Рис. 1. Залежність температури займання водного розчину ЛЗР від масової частки горючої рідини. Суцільна криві – розрахунок по (5), пунктир – теоретичні значення [11], точки – експеримент: 1 – ацетон, □[11]; 2 – метанол, ●[2], ○[11]; 3 – 1-пропанол, ■[2]; 4 – етанол, ◆[2], ◇[11]; 5 – ізопропанол, △[11]

Загалом можна відмітити, що наявність у розчині 50% води збільшує температуру її займання на 10 °С.

Займання бінарних розчинів. У цьому разі можливі умовно два випадки: температури займання компонентів розчину 1) суттєво відрізняються або 2) близькі. У першому випадку можна припустити, що важколетючий компонент практично не випаровується за наявності більш летючого компонента. Тому його можна вважати інертним компонентом і використати формулу (5) для оцінювання температури займання розчину.

Однак при збільшенні вмісту більш важколетючого компонента його вже не можна вважати інертним компонентом. Він також бере участь к займанні краплі. Аналогічна ситуація відповідає й другому вказаному випадку. Тому для врахування впливу обох компонентів на умови займання прийемо, що два компоненти реагують згідно з брутто-рівняннями:



Припустимо також, як і для індивідуальних рідин, що при температурі займання біля поверхні краплі має виконуватися стехіометричне відношення між паром та киснем для кожного компонента:

$$Y_{1s} / Y_{O_2,1} = \mu_1 / \beta_1 \mu_{O_2} \Big|_{cmex} \text{ та } Y_{2s} / Y_{O_2,2} = \mu_2 / \beta_2 \mu_{O_2} \Big|_{cmex}.$$

При цьому сума $Y_{O_2,1} + Y_{O_2,2} = Y_{O_2s}$ є масовою часткою кисню біля поверхні краплі. У результаті умова стехіометрії набирає вигляду:

$$Y_{1s} \frac{\beta_1 \mu_{O_2}}{\mu_1} + Y_{2s} \frac{\beta_2 \mu_{O_2}}{\mu_2} = Y_{O_2s}. \quad (6)$$

Визначимо масову частку кисню в суміші. Використовуємо рівняння Менделєєва-Клапейрона та Дальтона:

$$p_{f1} V = \frac{m_1}{\mu_1} RT_g, p_{f2} = \frac{m_2}{\mu_2} RT_g, p_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{\mu_{O_2}} RT_g,$$

$$P_0 = p_{f1} + p_{f2} + p_{O_2} + p_{N_2}.$$

У результаті для масової частки кисню в суміші маємо:

$$Y_{O_2s} = \frac{m_{O_2}}{m_g} = \frac{p_{O_2} \mu_{O_2}}{P_0 \mu} = \frac{x_{O_2} \mu_{O_2}}{\mu} \left(1 - \frac{p_{f1} + p_{f2}}{P_0} \right).$$

Спільно із законом Рауля масові частки парів рідин біля поверхні рідини визначаються:

$$Y_{1s} = Z_1 \frac{\mu_1 p_{1s0}}{\mu P_0} \text{ і } Y_{2s} = (1 - Z_1) \frac{\mu_2 p_{2s0}}{\mu P_0}.$$

У результаті (6) представимо у вигляді залежності мольної частки першого компонента в бінарному розчині від температури займання:

$$Z_1 = \frac{1 - \left(\frac{\beta_2 + 1}{x_{O_2}} \right) \exp \left(\frac{L_m \mu_f}{RT_{boil,2}} \left(1 - \frac{T_{boil,2}}{T_{fire}} \right) \right)}{\left(\frac{\beta_1 + 1}{x_{O_2}} \right) \exp \left(\frac{L_m \mu_f}{R} \left(1 - \frac{T_{boil,1}}{T_{fire}} \right) \right) - \left(\frac{\beta_2 + 1}{x_{O_2}} \right) \exp \left(\frac{L_m \mu_f}{RT_{boil,2}} \left(1 - \frac{T_{boil,2}}{T_{fire}} \right) \right)}. \quad (7)$$

Для порівняння вибрані дані Ішіді (Ishida) [20] для розчину октану й декану, а також власні результати для розчину етанолу й 1-бутанолу. У цих двох парах ЛЗР температури займання компонентів суттєво відрізняються, що дасть змогу прослідкувати динаміку впливу складу розчину.

Температури займання розчину спиртів отримували на стандартній установці за визначенням температури займання у відкритому тиглі. Особливістю було використання невеличкого фарфорового тигля (об'ємом 10 мл) для розчину. Він розміщувався в більшому металевому тиглі, який містив пісок і нагрівався електропідією. Для контролю температури використовувався

ртутний контактний термометр, який уставлявся в розчин.

На рисунку 2 представлені результати розрахунку за формулам (5) і (7). Спостерігається монотонна зміна значення температури займання при зміні складу бінарного розчину. При суттєвій відмінності температур займання двох компонентів (більше ніж 20 °C) важколетючий компонент можна вважати інертним при його вмісті в розчині менше ніж 50 %. Чим менша ця різниця, тим більша виникає похибка.

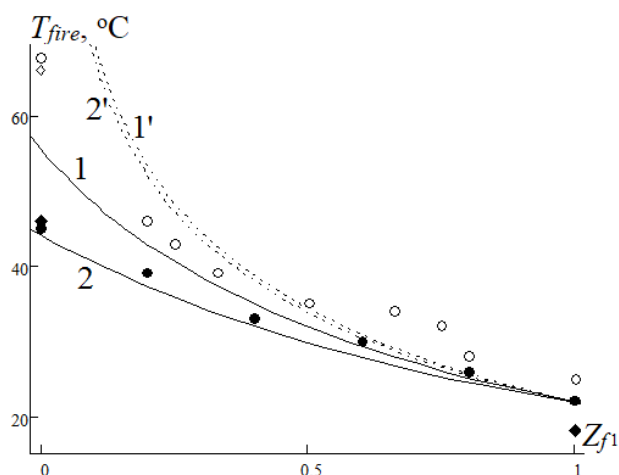


Рис. 2. Залежність температури займання бінарного розчину ЛЗР від масової частки більш летючого (першого) компонента. Суцільна крива – розрахунок за (7), пунктир – розрахунок за (5), точки – експеримент: 1 – н-октан – н-декан, \circ [20], \diamond [2]; 2 – етанол-бутанол, \blacklozenge [2], \bullet

Висновки та пропозиції з перспективами подальших досліджень. У роботі запропоновано методику розрахунку температури займання бінарних розчинів легкозаймистих речовин, у тому числі і їх водних розчинів. Вона основана на припущенні, що при температурі займання біля поверхні краплі має виконуватися стехіометричне відношення між парою та киснем для кожного компонента. Цей підхід дає змогу отримувати аналітичну залежність частки компонента в бінарному розчині від температури займання й так урахувати не тільки залежність насиченого пару рідини від температури, а й температурну залежність питомої теплоти пароутворення. Порівняння з експериментальними результатами дають задовільні результати. Наприклад, при зміні частки води від 0 до 90% і температури займання в межах 60 градусів похибка в її розрахунках могла досягати до 5 °C.

Отримані аналітичні залежності представлені в такому вигляді, що для розрахунку аналогічної залежності можна використовувати температурну

залежність тиску насиченої пари й в іншому вигляді, наприклад, у формі Антуана.

Недоліком аналітичних залежностей є неможливість урахувати особливості саме експериментальних підходів у визначенні температури займання рідин. Доволі часто буває, що для однієї й тієї самої речовини різні автори отримують результати щодо температури займання, що відрізняються на 3–8 °C, як, наприклад, для 1-бутанолу: 50 [12] і 44 °C [2].

Важливим питанням залишається аналітичне визначення температур займання водних розчинів важколетючих горючих рідин, наприклад, емульсій: вода/мазут, вода/масло чи вода/дизельне паливо. Такі водно-паливні емульсії є перспективним альтернативним паливом та активно зараз досліджуються.

Список літератури

- Li Yee Phoon, Azizul Azri Mustafa, Haslenda Hashim and Ramli Mat. A Review of Flash Point Prediction Models for Flammable Liquid Mixtures. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2014. № 53. P. 12553–12565. dx.doi.org/10.1021/ie501233g.
- NFPA 30 Flammable and Combustible Liquids Code 2021 Edition. 167 p. URL: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=30>.
- Pei X., Guida P., AlAhmadi K. M., Al Ghamdi I. A., Saxena S., Roberts W. L. Cenosphere formation of heavy fuel oil/water emulsion combustion in a swirling flame *Fuel Processing Technology*. 2021. 216. P. 106800 <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106800>.
- Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A., Ivanov M. Effect of ultrasonic emulsification on the combustion of foamed emulsions. *Fuel Processing Technology*. 2018. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.10.001>.
- Hristova M., Damgaliev D. Flash point of organic binary mixtures containing alcohols: experiment and prediction. *Open Chemistry*. 2013. № 11 (3). doi: 10.2478/s11532-012-0171-6.
- Vazquez V., Migvia del C. Binary mixture flammability characteristics for hazard assessment Texas A&M University. 2005. 102 p. URL: <http://hdl.handle.net/1969.1/2536>.
- Skřínský J., Dolníček P., Skřínská M., Marek J., & Lukešová P. Flashpoint Prediction for Binary Mixtures of Alcohols with Water in Order to Improve their Safety *Chemical Engineering & Technology*. 2015. № 38 (4). P. 727–733. doi: 10.1002/ceat.201400663.
- Cao W., Pan Y., Liu Y., Jiang J. A novel method for predicting the flash points of binary mixtures from molecular structures. *Safety Science*. 2020. № 126. P. 104680. doi: 10.1016/j.ssci.2020.104680.
- Torabian E., Sobati M. A. New models for predicting the flash point of mixtures containing

different alcohols Process Safety and Environmental Protection. 2017. № 111. P. 439–448. doi: 10.1016/j.psep.2017.07.020.

10. Jones J. C. A Means of Calculating the Fire Points of Organic Compounds. *Journal of Fire Sciences*. 2001. № 19 (1). P. 62–68. doi: 10.1106/wpr5-59cg-x75u-gqcd.

11. From Flash and Fire Points of Water Miscible Flammable Liquid Mixtures to a Novel Method of Membrane Characterization. *Waseem Sabri*. Thesis. Ottawa, Canada, 2022. 92 p. URL: <http://dx.doi.org/10.20381/ruor-28545>.

12. Roberts A. F., Wuince B. W. A Limiting condition for the burning of flammable liquids Combustion and Flame. 1973. № 20 (2). P. 245–251. doi: 10.1016/s0010-2180(73)80178-6.

13. Dong-Myeong Ha, Jong-Geun Han, Sung-Jin Lee A Study on Flash Points and Fire Points of Acids Using Closed Cup and Open-cup Apparatus Journal of Korean Institute of Fire Sci. & Eng. 2006. № 3.

14. Dong-Myeong Ha, Dong-Myeong Ha, Lee Sung-Jin, Song Young-Ho. Measurement of Fire Point and Flash Point for Alcohols Using Tag Open-Cup Apparatus Journal of the Korean Society of Safety. 2004. № 19 (4).

15. Thomas D. S. Critical Analysis and Review of Flash Points of High Molecular Weight Poly-Functional C, H, N, O Compounds: Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science. Texas A&M University, 2011. 115 p.

16. Britton L. G. Using heats of oxidation to evaluate flammability hazards. *Process Safety Progress*. 2002. № 21 (1). P. 31–54. doi: 10.1002/prs.680210108.

17. Martel B. Chemical Risk Analysis: A Practical Handbook. L. : Kogan Page Science, 2004. 528 p.

18. Калінчак В. В., Черненко О. С., Копійка О. К. Удосконалення аналітичної оцінки температур займання рідин. *Пожежна безпека (Fire Safety)*. 2023. № 4. С. 43–49. DOI: 10.32447/20786662.42.2023.05.

19. Теорія розвитку й припинення горіння : практикум / О. В. Тарахно, Д. Г. Трегубов, К. В. Жернокльов та інші. Харків : НУЦЗУ, 2010. Частина II. 314 с.

20. Ishida H., Iwama A. Some Critical Discussions On Flash And Fire Points Of Liquid Fuels. *Fire Safety Science*. 1986. № 1. P. 217–226. doi: 10.3801/IAFSS.FSS.1-217.

21. Stephenson, R. M., Malanowski, S. Handbook of the Thermodynamics of Organic Compounds, 1987. doi: 10.1007/978-94-009-3173-2.

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

References

1. Li Yee Phoon, Azizul Azri Mustafa, Haslenda Hashim, & Ramli Mat (2014). A Review of Flash Point

Prediction Models for Flammable Liquid Mixtures Ind. Eng. Chem. Res. 53, 12553–12565. [dx.doi.org/10.1021/ie501233g](https://doi.org/10.1021/ie501233g). [in English].

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>. [in English].

3. Pei, X., Guida, P., AlAhmadi K. M., Al Ghamdi I. A., Saxena S., & Roberts W. L. (2021). Cenosphere formation of heavy fuel oil/water emulsion combustion in a swirling flame Fuel Processing Technology. 216. 106800 <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106800>. [in English].

4. Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A., Ivanov M. (2018). Effect of ultrasonic emulsification on the combustion of foamed emulsions Fuel Processing Technology. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.10.001>. [in English].

5. Hristova, M., & Damgaliev, D. (2013). Flash point of organic binary mixtures containing alcohols: experiment and prediction. Open Chemistry. 11(3). doi: 10.2478/s11532-012-0171-6. [in English].

6. Vazquez V., Migvia del C. (2005). Binary mixture flammability characteristics for hazard assessment Texas A&M University. 102 p. <http://hdl.handle.net/1969.1/2536>. [in English].

7. Skřínský, J., Dolníček, P., Skřínská, M., Marek, J., & Lukešová, P. (2015). Flashpoint Prediction for Binary Mixtures of Alcohols with Water in Order to Improve their Safety Chemical Engineering & Technology. 38 (4), 727–733. doi: 10.1002/ceat.201400663. [in English].

8. Cao, W., Pan, Y., Liu, Y., & Jiang, J. (2020). A novel method for predicting the flash points of binary mixtures from molecular structures Safety Science. 2020. 126, 104680. doi: 10.1016/j.ssci. 104680. [in English].

9. Torabian, E., & Sobati, M. A. (2017). New models for predicting the flash point of mixtures containing different alcohols Process Safety and Environmental Protection. 111, 439–448. doi: 10.1016/j.psep.2017.07.020. [in English].

10. Jones, J. C. (2001). A Means of Calculating the Fire Points of Organic Compounds. Journal of Fire Sciences. 19(1), 62–68. doi: 10.1106/wpr5-59cg-x75u-gqcd. [in English].

11. From Flash and Fire Points of Water Miscible Flammable Liquid Mixtures to a Novel Method of Membrane Characterization *Waseem Sabri* Thesis. (2022). Ottawa, Canada, 92 p. <http://dx.doi.org/10.20381/ruor-28545>. [in English].

12. Roberts, A. F., & Wuince, B. W. (1973). A Limiting condition for the burning of flammable liquids Combustion and Flame. 20 (2), 245–251. doi: 10.1016/s0010-2180(73)80178-6. [in English].

13. Dong-Myeong Ha, Jong-Geun Han, Sung-Jin Lee. (2004). A Study on Flash Points and Fire Points of Acids Using Closed Cup and Open-cup Apparatus Journal of Korean Institute of Fire Sci. & Eng. 2006. 20, № 3. [in English].

14. Dong-Myeong, Ha, Dong-Myeong, Ha, Lee, Sung-Jin, & Song, Young-Ho. (2004). Measurement of Fire Point and Flash Point for Alcohols Using Tag Open-Cup Apparatus Journal of the Korean Society of Safety. 19 (4). [in English].
15. Thomas D. S. (2011). Critical Analysis and Review of Flash Points of High Molecular Weight Poly-Functional C, H, N, O Compounds: Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science. Texas A&M University, 115 p. [in English].
16. Britton, L. G. (2002). Using heats of oxidation to evaluate flammability hazards. Process Safety Progress. 21 (1), 31–54. doi: 10.1002/prs.680210108. [in English].
17. Martel B. Chemical Risk Analysis: A Practical Handbook. L. : Kogan Page Science, 2004. 528 p. [in English].
18. Kalinchak V. V., Chernenko A. S., Kopyika O. K. (2023). Udoshkonalennia analitychnoi otsinky temperatur zaimannia ridyn [Improvement of the analytical determination of fire point liquids: *Fire Safety Fire Safety*. № 4. 43–49. doi: 10.32447/20786662.42.2023.05. [in Ukrainian].
19. Tarakhno O. V., Trehubov D. H., Zhernoklov K. V., Shepeleva A. I., Kovrehin V. V. Teoriia rozvytku y pryrynennia horinnia. [Theory of development and cessation of combustion.] Practicum Part II: /Kh., 2010. 314 p. [in Ukrainian].
20. Ishida, H. & Iwana, A. (1986). Some Critical Discussions On Flash And Fire Points Of Liquid Fuels. *Fire Safety Science*. 1: 217–226. doi: 10.3801/IAFSS.FSS.1-217. [in English].
21. Stephenson, R. M., & Malanowski, S. Handbook of the Thermodynamics of Organic Compounds, 1987. doi:10.1007/978-94-009-3173-2 [in English].
22. David R. (2004). Lide CRC Handbook of Chemistry and Physics 85 hted. CRC Press, Jun 29, Science, 2712 p. <https://doi.org/10.1021/ja041017a>. [in English].

© О. С. Черненко, В. В. Калінчак, М. О. Иванов, О. К. Копійка, 2024.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 13.09.2024.

Прийнято до публікації 18.12.2024.