

УДК 614.8

О. Є. Басманов, д-р техн. наук, професор, гол. наук. співр.,  
Г. О. Кулакова,  
Національний університет цивільного захисту України

## ОЦІНКА ШВИДКОСТІ ВИСХІДНИХ ПОТОКІВ НАД ОСЕРЕДКОМ ГОРІННЯ ГОРЮЧОЇ РІДИНИ

Побудовано оцінку швидкості висхідних потоків над осередком горіння горючої рідини, яка базується на аналізі надлишкового об'єму повітря і продуктів горіння, що утворюються під час реакції горіння. Отримані результати можуть бути використані для розрахунку теплового впливу конвекційних потоків під час пожежі.

**Ключові слова:** горюча рідина, пожежа, висхідні конвекційні потоки.

**Постановка проблеми.** Пожежі нафтопродуктів в резервуарних парках є одними з найскладніших внаслідок загрози каскадного розповсюдження пожежі на сусідні резервуари, яке здатне призвести до значних матеріальних збитків і загибелі людей. Запобігання каскадному розповсюдженню пожежі потребує прогнозування можливих сценаріїв розвитку пожежі, що неможливо без побудови математичних моделей теплового впливу пожежі на споруди резервуарного парку. Існує три основних типи пожежі в резервуарному парку: пожежа в резервуарі, пожежа в обвалуванні резервуара, одночасне горіння нафтопродукту в резервуарі і обвалуванні. Особливістю пожежі в обвалуванні є близьке розташування осередку горіння і резервуара, внаслідок чого охолодження резервуара за допомогою стандартних зрошувальних кілець може виявитися недостатнім. Іншою відмінністю пожежі в обвалуванні є передача тепла від осередку горіння до резервуара як випромінюванням, так і конвекцією.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Випромінювання є основним видом теплопередачі від відкритої пожежі горючої рідини [1]. В роботах [2, 3, 9] побудовано моделі теплового впливу пожежі нафтопродукту в резервуарі на сусідній резервуар. В [8] розглянуто модель теплового впливу пожежі в обвалуванні на резервуар. Але всі ці моделі виходять лише із променевої складової теплового потоку від пожежі, конвекційна складова не розглядається. Такий підхід є виправданим

для випадку пожежі в резервуарі, оскільки конвекційні потоки розігрітих продуктів горіння і повітря спрямовані вгору. У випадку ж пожежі в обвалуванні, якщо розлив знаходиться поруч із резервуаром, вплив конвекційних потоків, що здіймаються над осередком горіння, може бути істотним. В [4] на основі теорії затоплених струменів розглянуто розподіл швидкостей і температур у висхідних потоках над осередком горіння, але використання цієї моделі потребує оцінки початкової швидкості струменя, утвореного продуктами горіння і розігрітим повітрям. В [5] наведено оцінку максимальної швидкості  $u_{\max}$  висхідних потоків над пропановою горілкою діаметром 0,3 м у вигляді:

$$u_{\max} = 1,9Q^{1/5},$$

де  $Q$  – загальна інтенсивність тепловиділення полум'я, задана в кВт. Перенесення цієї оцінки на випадок горіння рідин у розливах більших діаметрів неможливе внаслідок відмінностей в умовах горіння.

### **Формулювання цілей статті.**

Метою роботи є побудова оцінки швидкості висхідних конвекційних потоків над осередком горіння горючої рідини.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Розглянемо процес горіння розливу горючої рідини (рис. 1): в зону горіння надходять пари горючої рідини, що випаровуються з її поверхні, і повітря, а продукти горіння здіймаються вгору.

«Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»

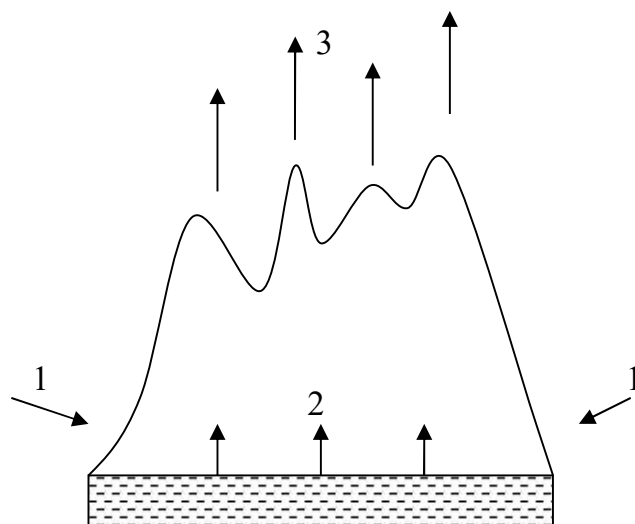
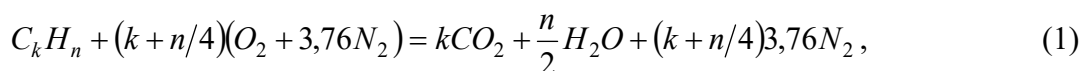


Рисунок 1 – Схема горіння горючої рідини з вільної поверхні: 1 – повітря; 2 – пари горючої рідини; 3 – продукти горіння

Розглянемо витрати газу в об'ємі, в якому відбувається горіння. Будемо описувати нафтопродукт умовною хімічною формулою  $C_kH_n$ , а процес горіння рівнянням:



де враховано молекулярний склад повітря у вигляді  $(O_2 + 3,76N_2)$ . Аналіз рівняння (1) показує, що в реакції бере участь  $4,76(k + n/4)$  молей кисню, азоту і парів горючої рідини, внаслідок чого утворюється  $[k + n/2 + 3,76(k + n/4)]$  молей азоту і продуктів горіння.

В реакцію вступають гази з температурою  $T_1$ , а продукти горіння мають температуру  $T_2$ . Крім того, будемо вважати всі ці гази ідеальними і такими, що задовольняють співвідношення

$$\frac{pV}{T} = const,$$

Аналогічно, об'єм утворених внаслідок реакції продуктів горіння дорівнює:

$$V_2 = 22,4[k + n/2 + 3,76(k + n/4)] \frac{T_2}{T_0}.$$

Тоді приріст об'єму внаслідок реакції горіння (1):

де  $p$  – тиск;  $V$  – об'єм газу;  $T$  – температура. Приймаючи тиск в зоні горіння таким, що приблизно дорівнює атмосферному тиску, отримаємо:

$$\frac{V}{T} = const.$$

Тоді загальний об'єм повітря і парів горючої рідини, що вступають в реакцію, визначається їх кількістю і температурою:

$$V_1 = 4,76 \cdot 22,4(k + n/4) \frac{T_1}{T_0}.$$

$$\Delta V = 22,4[k + n/2 + 3,76(k + n/4)]\frac{T_2}{T_0} - 4,76 \cdot 22,4(k + n/4)\frac{T_1}{T_0}. \quad (2)$$

При цьому відносний приріст об'єму буде складати:

$$\frac{\Delta V}{V_1} = \frac{22,4[k + n/2 + 3,76(k + n/4)]\frac{T_2}{T_0} - 4,76 \cdot 22,4(k + n/4)\frac{T_1}{T_0}}{4,76 \cdot 22,4(k + n/4)\frac{T_1}{T_0}};$$

$$\frac{\Delta V}{V_1} = \frac{1 + n/2k + 3,76(1 + n/4k)}{4,76(1 + n/4k)} \frac{T_2}{T_1} - 1;$$

$$\frac{\Delta V}{V_1} = \frac{1 + \alpha/2 + 3,76(1 + \alpha/4)}{4,76(1 + \alpha/4)} \frac{T_2}{T_1} - 1,$$

де  $\alpha = n/k$ . На рис. 2 показано залежність відносного приросту об'єму від відношень  $\alpha = n/k$  і  $T_2/T_1$ .

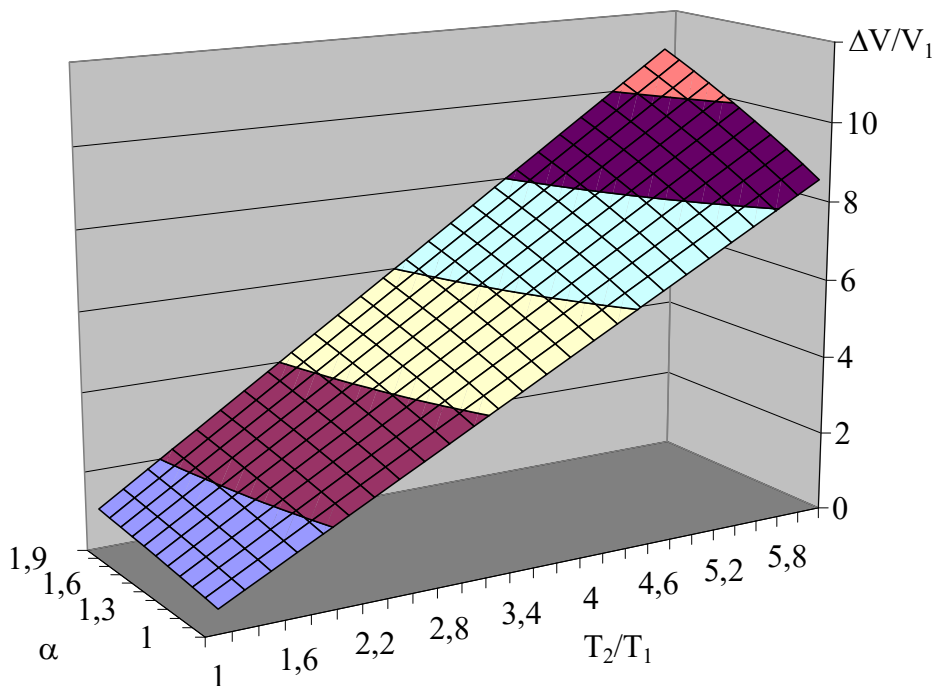


Рисунок 2 – Відносний приріст об'єму продуктів горіння в залежності від відношення кількості атомів водню до атомів вуглецю ( $\alpha$ ) в горючій рідині і відношення температур до і після реакції горіння ( $T_2/T_1$ )

Аналіз графічних залежностей на рис. 2 засвідчує, що більш вагомий вклад в приріст об'єму вносить відношення температур речовин до початку реакції горіння та після неї.

Аналіз рівнянь (1), (2) показує, що при згоранні вуглеводневого палива масою  $m = 12k + n$  утворюється надлишковий об'єм

газу  $\Delta V$ . При горінні нафтопродукту з питомою масовою швидкістю вигорання  $\eta$  з вільною площею  $S$  протягом часу  $\Delta t$  буде вигорати кількість нафтопродукту масою:

$$m_0 = \eta S \Delta t.$$

**«Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»**

При цьому буде утворюватися надлишковий об'єм продуктів горіння:

$$\Delta V = 22,4\eta S \frac{[k + n/2 + 3,76(k + n/4)] \frac{T_2}{T_0} - 4,76 \cdot 22,4(k + n/4) \frac{T_1}{T_0}}{12k + n} \Delta t.$$

Наявність надлишкового об'єму над областю горіння (рис. 1). Витрати газового призводить до утворення висхідних потоків середовища в цих потоках складають:

$$\Delta Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}.$$

Середня швидкість цих потоків над областю горіння складає:

$$u_0 = \frac{\Delta Q}{S} = 22,4\eta \frac{[k + n/2 + 3,76(k + n/4)] \frac{T_2}{T_0} - 4,76 \cdot 22,4(k + n/4) \frac{T_1}{T_0}}{12k + n}.$$

Будемо вважати, що повітря і пари нафтопродукту, які вступають в реакцію, мають температуру кипіння нафтопродукту  $T_{кин}$ , а температура продуктів горіння дорівнює температурі факела  $T_\phi$ . Тоді швидкість висхідних потоків безпосередньо над областю горіння може бути оцінена виразом:

$$u_0 = 22,4\eta \frac{[k + n/2 + 3,76(k + n/4)] \frac{T_\phi}{T_0} - 4,76(k + n/4) \frac{T_{кин}}{T_0}}{12k + n}.$$

або

$$u_0 = 22,4\eta \frac{[1 + \alpha/2 + 3,76(1 + \alpha/4)] \frac{T_\phi}{T_0} - 4,76(1 + \alpha/4) \frac{T_{кин}}{T_0}}{12 + \alpha}.$$

Таким чином, швидкість висхідних потоків над осередком горіння буде визначатися відношенням  $\alpha$  кількості атомів вуглецю до кількості атомів водню в умовній хімічній формулі горючої рідини, а також температурою факела, температурою кипіння і питомою масовою швидкістю вигорання. Орієнтовні швидкості висхідних потоків для деяких типів нафтопродуктів наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Швидкість висхідних потоків над осередком горіння для деяких горючих рідин

Горюча рідина	Умовна хімічна формула	Питома масова швидкість вигорання [6], $\eta$ , кг/м <sup>2</sup> с	Температура кипіння, $T_{кин}$ , °С	Температура факела [7], $T_\phi$ , °С	Швидкість, $u_0$ , м/с
Бензин	$C_8H_{18}$	0,048	33÷205	1200	2,3÷2,6
Дизельне пальне	$C_{10}H_{20}$	0,055	170÷380	1000	1,6÷2,1
Гас	$CH_{1,95}$	0,038	175÷270	1000	1,3÷1,4

Слід зазначити, що наведені в табл. 1 оцінки швидкості висхідних потоків мають місце в області, розташованій безпосередньо над зоною горіння. Зі збільшенням висоти швидкість висхідних потоків буде зменшуватися внаслідок втягнення нерухомих мас навколишнього повітря, а також внаслідок охолодження продуктів горіння і розігрітого повітря.

**Висновки.** Побудовано оцінку швидкості висхідних конвекційних потоків над осередком горіння горючої рідини. Оцінка

базується на аналізі надлишкового об'єму газу, який утворюється за рахунок хімічної реакції горіння, а також теплового розширення продуктів горіння.

Отримані результати можуть бути використані для розрахунку швидкості і температури висхідних потоків над осередком горіння [4], а також для побудови моделі їх теплового впливу на споруди різного типу.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Mannan S., Lees E.P. Lees' Loss Prevention in the Process Industries (Fourth Edition): hazard identification, assessment and control. Elsevier Butterworth-Heinemann, Amsterdam; London, 2012.

2. Абрамов Ю. А. Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций в резервуарных парках с нефтепродуктами / Ю.А. Абрамов, А.Е. Басманов. – Харьков: АГЗУ, 2006. – 251 с.

3. Абрамов Ю.А. Моделирование нагрева резервуара под действием излучения пожара / Ю.А. Абрамов, А.Е. Басманов // Вісник міжнародного слов'янського університету. – Харків: ТОВ ПКФ „Яна”, 2004. – Т. 7. – №2. – С. 7-9.

4. Басманов О.Є. Розподіл параметрів висхідного конвекційного потоку над палаючим розливом нафтопродукту / О.Є. Басманов, Я.С. Кулик // Проблеми пожарной безопасности. – Х.: НУГЗУ. 2016. – №39. – С. 33-38.

5. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / Д. Драйздейл. – Москва: Стройиздат, 1990. – 424 с.

6. Иванников В.П. Справочник руководителя тушения пожара / В.П. Иванников, П.П. Ключ. – Москва: Стройиздат, 1987. – 288 с.

7. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов и средства их тушения / А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук и др. – М.: Химия, 1990. – 496 с.

8. Улинец Э.М. Математическая модель теплового воздействия пожара разлива нефтепродукта на резервуар / Э.М. Улинец // Проблемы пожарной безопасности. – 2008. – Вып. 24. – С. 27-31.

9. Чернецький В.В. Математичне моделювання та дослідження теплових процесів у вертикальних сталевих резервуарах за умов пожежі / В.В. Чернецький, М.М. Семерак, М.Р. Михайлишин // Пожежна безпека: зб. наук. праць. – 2015. – №27. – С. 151 – 157.

## REFERENCES

1. Mannan S., Lees E.P. Lees' Loss Prevention in the Process Industries (Fourth Edition): hazard identification, assessment and control. Elsevier Butterworth-Heinemann, Amsterdam; London, 2012.

2. Abramov Yu.A. Preduprezhdenye i likvidatsiya chrezvychainykh situatsiy v rezervuarnykh parkakh s nefteproduktami / Yu.A. Abramov, A.E. Basmanov. – Kharkov: ANZU, 2006. – 251 s.

3. Abramov Yu.A. Modelirovanie nahreva rezervuara pod deistviem izlucheniia

pozgara / Yu.A. Abramov, A.E. Basmanov // Visnyk mizhnarodnoho slovianskoho universytetu. – Kharkiv: TOV PKF „Iana”, 2004. – Т. 7. – №2. – С. 7-9.

4. Basmanov O.Ie. Rozpodil parametrov vyskhidnoho konveksiinoho potoku nad palaiuchym rozlyvom naftoproduktu / O.Ie. Basmanov, Ya.S. Kulyk // Problemy pozharnoi bezopasnosti. – Kh.: NUHZU. 2016. – №39. – С. 33-38.

5. Draizdeil D. Vvedenie v dinamiku pozharov / D. Draizdeil. – Moskva: Stroiiizdat, 1990. – 424 s.

6. Ivannikov V.P. Spravochnik rukovoditelia tusheniya pozhara / V.P. Ivannykov, P.P. Klius. – Moskva: Stroizdat, 1987. – 288 s.

7. Pozharovzryvobezopasnost veshchestv i materialov i sredstva ih tusheniya / A.N. Baratov, A.Ia. Korolchenko, H.N. Kravchuk i dr. – M.: Khimia, 1990. – 496 s.

8. Ulynets Э.М. Matematicheskaia model teplovoho vozdeistviia pozhara razliva

nefteprodukta na rezervuar / Э.М. Ulynets // Problemy pozharnoi bezopasnosti. – 2008. – Vyp. 24. – S. 27-31.

9. Chernetskyi V.V. Matematychno modeliuvannia ta doslidzhennia teplovykh protsesiv u vertykalnykh stalevykh rezervuarakh za umov pozhezhi / V.V. Chernetskyi, M.M. Semerak, M.R. Mykhailyshyn // Pozhezha bezpeka: zb. nauk. prats. – 2015. – №27. – S. 151 – 157.

*A. E. Басманов, д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотр., А. О. Кулакова,  
Национальный университет гражданской защиты Украины*

### **ОЦЕНКА СКОРОСТИ ВОСХОДЯЩИХ ПОТОКОВ НАД ОЧАГОМ ГОРЕНИЯ ГОРЮЧЕЙ ЖИДКОСТИ**

*Построена оценка скорости восходящих потоков над очагом горения горючей жидкости, основывающаяся на анализе избыточного объема воздуха и продуктов горения, образующихся в ходе реакции горения. Полученные результаты могут*

*быть использованы для расчета теплового воздействия конвективных потоков во время пожара.*

**Ключевые слова:** *горючая жидкость, пожар, конвективные потоки.*

*O.E. Basmanov, Dr. Sci. (Tech.), Prof., Chief Researcher, G.O. Kulakova,  
National University of Civil Protection of Ukraine*

### **ESTIMATION OF THE VELOCITY OF THERMAL PLUME FROM BURNING SPILLED OIL**

*Fires of petroleum products in tank storages is one of the most difficult situations, because of the threat of cascading fire spreading to the next tanks, which can lead to significant material damage and death of people. There are three main types of fires in the tank storages: fire in the tank, fire in the tank dike, burning the petroleum products in the tank and dike. The feature of a fire in the dike is close location of combustion chamber and tank. So, cooling the tanks using standard irrigation rings may be insufficient. Another difference is the fire in the dike is transfer of heat from the combustion chamber to the tank by radiation and convection.*

*Accounting the convective heat transfer requires obtaining the estimation of the speed and temperature of the air streams rising above the hearth point.*

*The purpose of the work is construction of speed estimation ascending convection flows above the combustion area of the combustible liquid. The construction was based on the analysis of excess gas volume which is formed due to the chemical*

*reaction of combustion, as well as the thermal expansion of combustion products. In this work we can watch the rate of ascending flows over the combustion cell which is determined by the ratio  $\alpha$  the number of carbon atoms to the number of hydrogen atoms in the conventional chemical formula of the combustible liquid, as well as the temperature of the flame, the boiling point and the specific mass burn rate. Calculations made for some combustible liquids show that the approximate speed of ascending flows is 1.3-2.6 m/s. The resulting estimates of the rate of ascending flows occur in the area located directly above the combustion zone. As the height increases, the rate of ascending flows will decrease as a result of drawing of stationary masses of the surrounding air, as well as by cooling the combustion products and the heated air.*

*The obtained results can be used to construct a model of their thermal influence on different types of structures.*

**Keywords:** *flammable liquid, fire, convective flows.*