

УДК 614.84

*И.Ф. Дадашов, к.т.н., нач. каф., Академия МЧС Азербайджанской Республики,
А.Я. Шаршанов, к.ф-м.н., доцент, НУГЗУ,
А.А. Киреев, д.т.н., профессор, НУГЗУ*

ЗАМЕДЛЕНИЕ ИСПАРЕНИЯ ЖИДКОСТИ СЛОЕМ ГРАНУЛИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА, НАНЕСЕННОГО НА ЕЁ ПОВЕРХНОСТЬ

Проведено моделирование процесса диффузии паров горючих жидкостей сквозь слой лёгкого пористого покрытия, плавающего на поверхности жидкости. Оценена величина коэффициента уменьшения потока паров горючих жидкостей слоем гранул и факторы, влияющие на него.

Ключевые слова: математическое моделирование, пары горючих жидкостей, диффузия, пористое покрытие, гранулированное пеностекло, коэффициент уменьшения потока.

Постановка проблемы. Одной из задач оперативно-спасательных подразделений ГСЧС является тушение пожаров с участием горючих жидкостей. Наибольшую трудность представляет тушение пожаров в резервуарных парках. Такие пожары характеризуются повышенной длительностью, необходимостью привлечения большого количества сил и средств пожаротушения, большим материальным ущербом и нередко человеческими жертвами [1-2]. Существующие средства тушения горючих жидкостей часто не обеспечивают положительный результат даже при полном выполнении нормативных требований [3-4].

Для тушения нефти и нефтепродуктов применяют распыленную и тонкораспыленную воду, порошковые средства, хладоны, газообразную, жидкую и твёрдую углекислоту. В случае воды доминирующим механизмом прекращения горения является охлаждение. Для порошковых средств и хладонов основной вклад в тушение жидкостей вносит эффект ингибирования. Углекислота в основном реализует охлаждающе-разбавляющий механизмы прекращения горения. Рассмотренные выше средства пожаротушения обеспечивают положительный результат в случае небольших по размерам резервуаров с горючими жидкостями. При этом имеется возможность создать аэрозольное облако воды или порошка над всей поверхностью горящей жидкости в случае тушения водой и огнетушащим порошком. В случае применения углекислого газа и хладонов можно создать огнетушащую концентрацию соответствующих газов над всем зеркалом горючей жидкости. Если над частью поверхности горючей жидкости не создаётся огнетушащая концентрация аэрозолей или огнетушащего газа, то над этим участком горение продолжается. После уменьшения концентрации огнетушащих веществ ниже огнетушащей над поверхностями жидкости, где горение первоначально прекратилось, горение возобновляется снова. Для обеспечения одновременного достижения огнетушащей концентрации над всем зеркалом горящей жидкости необходимо обеспе-

чить высокую интенсивность подачи огнетушащего вещества в течение некоторого времени. Это условие трудно обеспечить для резервуаров большого размера.

Наибольшее распространение для тушения горючих жидкостей получили воздушно-механические пены [4]. Они обеспечивают достаточно длительную изоляцию поверхности горючей жидкости от газовой фазы, в которой происходит сам процесс горения. Однако огнетушащие пены имеют ряд недостатков:

- малая устойчивость пен при действии интенсивных тепловых потоков от пламени горящей жидкости и от контакта пены с рядом горючих жидкостей, особенно полярных;

- пены трудно подать на большие расстояния;

- пены загрязняют нефть и нефтепродукты, что затрудняет их дальнейшее использование и переработку;

- в состав пен входят экологически опасные вещества – пенообразователи.

На основании вышесказанного можно заключить, что решение проблемы низкой эффективности существующих методов тушения горючих жидкостей в резервуарах требует разработки новых более эффективных огнетушащих средств.

Анализ последних исследований и публикаций. Для устранения большинства из перечисленных недостатков воздушно-механических пен было предложено использовать гелеобразующие огнетушащие и огнезащитные составы (ГОС) [5-6]. Они представляют собой два раздельно хранящихся и раздельно-одновременно подаваемых в очаг горения раствора. Компоненты раствора подобраны таким образом, чтобы при их смешении образовывался нетекучий слой геля.

Для обеспечения плавучести слоя геля в горючих жидкостях было предложено использовать лёгкий негорючий носитель – гранулированное пеностекло. Предварительные опыты показали, что бинарный слой пеностекло-гель остаётся стабильным на поверхности бензина в течение нескольких суток. Вопрос об изолирующих свойствах гелеобразного слоя был рассмотрен в работе [7]. В работе [8] представлены данные, указывающие на то, что слой гранулированного пеностекла также замедляет испарение горючих жидкостей. Однако соответствующих количественных результатов получено не было.

Постановка задачи и её решение. Целью работы является моделирование процесса переноса паров горючих газов через слой гранулированного материала, нанесенного на поверхность жидкости.

Для демонстрации изолирующего действия пористого слоя, образованного гранулами пеностекла, оценим стационарное значение потока паров горючего сквозь такой слой. Схема анализируемой ситуации изображена на рис. 1.

Перенос паров горючего сквозь пористое покрытие имеет диффузионный характер. Соответствующее уравнение стационарного массопереноса через пористый слой имеет вид

$$j_{\mu.g} = \frac{D_g}{h} (c_s - c_a), \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (1)$$

где $j_{\mu.g}$ – плотность молярного потока паров горючего сквозь слой гранул, в расчете на единицу площади слоя, $\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; D_g – коэффициент диффузии паров сквозь слой гранул, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; h – толщина слоя, м; c_s – равновесной концентрацией паров у поверхности жидкости, $\text{моль} \cdot \text{м}^{-3}$; c_a – концентрация паров в воздухе у границы со слоем гранул, $\text{моль} \cdot \text{м}^{-3}$, (рис. 1). Так как размеры областей между гранулами велики по сравнению с длиной свободного пробега молекул газа, концентрации c_s и c_a совпадают с концентрациями жидкости в слое в пространстве между гранулами вблизи соответствующих границ.

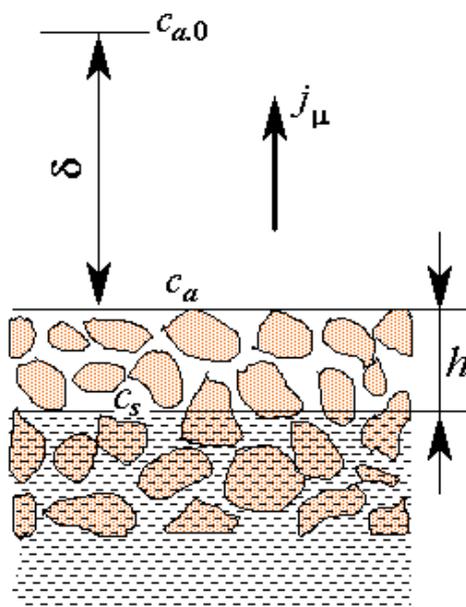


Рис. 1. Пространственная схема задачи переноса паров горючего через слой пористого покрытия. Заштрихована область, в нижней части которой находится жидкость с затопленными гранулами, а в верхней части – гранулы, находящиеся над уровнем жидкости

Коэффициент диффузии паров в воздухе сквозь слой гранул (D_g) пропорционален коэффициенту диффузии паров горючего в воздухе без гранул (D_a), $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. В работе одного из авторов получена оценка

$$D_g \leq D_a \cdot \left(\frac{h}{l_m}\right)^2 \cdot r_v, \quad (2)$$

где r_v – объёмная доля пустот, состоящего из гранул слоя, сквозь которые движутся пары жидкости; l_m – среднее значение длины трубки тока между поверхностями слоя, м (напомним, что образующие трубки тока параллельны векторам плотности потока диффундирующих паров жидкости; отметим также, что отношение $\left(\frac{h}{l_m}\right)$ практически не зависит от толщины слоя (h)).

Поверхностная плотность молярного потока паров жидкости в воздухе $j_{\mu,a}$ удовлетворяет уравнению массоотдачи [9]

$$j_{\mu,a} = \beta \cdot (c_a - c_{a,0}), \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (3)$$

где $c_{a,0}$ – концентрация паров жидкости в воздухе (в ядре газовой фазы) на расстояниях, превышающих ширину переходной области δ (см. рис. 1); β – коэффициент массоотдачи паров горючего в воздухе, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Коэффициент β связан с шириной переходной области δ соотношением [1]

$$\beta = \frac{D_a}{\delta}, \quad (4)$$

в свою очередь ширина переходной области оценивается соотношением

$$\delta = \frac{l}{\text{Nu}_D}, \quad (5)$$

где l – характерный пространственный размер задачи, м; Nu_D – диффузионный критерий Нуссельта (синонимичное название – критерий Шервуда Sh).

Отметим, что всегда $j_{\mu,g} \leq j_{\mu,a}$ и равенство $j_{\mu,g} = j_{\mu,a}$ достигается только при выходе процесса массопереноса на стационарный режим. В этом режиме совместное решение системы уравнений (1)-(5) позволяет получить общее выражение поверхностной плотности молярного потока горючего $j_{\mu,g} = j_{\mu,a} = j_{\mu}$, которое в случае изотермической диффузии имеет вид

$$j_{\mu}(h) = \frac{\beta \cdot (c_s - c_{a,0})}{1 + \frac{\beta \cdot h}{D_g}} = \frac{j_{\mu}(0)}{1 + \frac{h}{\delta} \cdot \frac{D_a}{D_g}}, \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что присутствие слоя гранул уменьшает поток паров горючего не менее, чем в K_g раз

$$K_g = 1 + \frac{h}{\delta} \cdot \frac{D_a}{D_g} \geq K_{g,\min} = 1 + \frac{h}{\delta} \cdot \frac{1}{r_V} \cdot \left(\frac{l_m}{h} \right)^2. \quad (7)$$

Максимальный поток (6) достигается в стационарном режиме, выход на который происходит за время, превышающее характерное время диффузии паров горючего сквозь слой гранул

$$\tau_g = \frac{h^2}{D_g}. \quad (8)$$

Приведем численную оценку параметров K_g и τ_g . В качестве диф-

фундирующего вещества возьмём являющийся основным компонентом бензина октан. Оценка будет соответствовать температуре 20°C.

Коэффициент диффузии паров октана в воздухе будем определять, используя эмпирическое соотношение

$$D_a = D_{a.0} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^2, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}, \quad (9)$$

где $T_0 = 273 \text{ К}$; $D_{a.0}$ – значение коэффициента диффузии при температуре T_0 . В случае октана справочное значение $D_{a.0} = 5.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, в результате при температуре 20°C получаем $D_a = 6.3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Для оценки D_g воспользуемся соотношением (2), приняв в нем $\left(\frac{h}{l_m} \right)^2 = 0.5$ и $r_V = 0.25$. В результате получим $D_g \approx 0.8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Такая величина D_g дает (согласно (8)) характерное время выхода на стационарный режим испарения

$$\tau_g = 1.25 \cdot 10^2 \cdot h^2, \text{ с} \quad (10)$$

(в формуле (10) толщина гелиевого слоя h берется в сантиметрах).

За такие времена величина коэффициента уменьшения потока слоем гранул примет значение

$$K_g \geq K_{g.\min} = 1 + 8 \cdot \frac{h}{\delta} = 1 + 8 \cdot \text{Nu}_D \cdot \frac{h}{l}. \quad (11)$$

Из соотношения (11) следует, что при минимальных значениях $\text{Nu}_D \sim 1$ и характерных размерах поверхностей $l \sim 1 \text{ м}$ ослабляющее действие слоя гранул в стационарном режиме становится заметным при толщинах $h \sim 0,1 \text{ м}$.

Выводы. Проведено математическое моделирование процесса испарения паров жидкостей сквозь слой лёгкого гранулированного материала, нанесенного на поверхность жидкости. Показано, что процесс испарения замедляется с ростом толщины слоя гранулированного материала и уменьшением объёмной доли пустот в слое гранулированного материала. Ослабляющее действие слоя гранул в стационарном режиме становится заметным при достижении толщины слоя гранул 10 см.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вогнегасні речовини: посібник / [Антонов А.В., Боровиков В.О., Орел В.П. та ін.]. – К.: Пожінформтехніка, 2004. – 176 с.
2. Шараварников А.С. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов /

А.Ф. Шараварников, В.П. Молчанов, С.С. Воевода, С.А. Шараварников. – М.: Калан, 2002. – 448 с.

3. Боровиков В. Гасіння пожеж у резервуарах для зберігання нафти та нафтопродуктів / В. Боровиков // Пожежна та техногенна безпека. – 2015. – №11(26). – С. 28-29.

4. Ковалишин В.В. Пінне гасіння / В.В. Ковалишин, О.Е. Васильєва, Н.М. Козяр. – Львів.: СПОЛОМ, 2007. – С. 137-138.

5. Пат. 2264242 Российская Федерация, МПК⁷ А 62 С 5/033. Способ тушения пожара и состав для его осуществления / Борисов П.Ф., Росоха В.Е., Абрамов Ю.А., Киреев А.А., Бабенко А.В.; заявитель и патентообладатель Академия пожарной безопасности Украины. – №2003237256/12; заявл. 23.12.2003; опубл. 20.11.10.2005, Бюл. №32. – 4 с.

6. Купка В.Ю. Пути повышения эффективности тушения пожаров класса В / В.Ю. Купка, А.А. Киреев, К.В. Жерноклєв // Проблемы пожарной безопасности. – 2012. – Вып. 31. – С. 105-108. Режим доступа: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol31/23.pdf>.

7. Дадашов И.Ф. Моделирование изолирующих свойств гелеобразного слоя по отношению к парам горючих жидкостей / И.Ф. Дадашов, А.А. Киреев, А.Я. Шаршанов, А.А. Чернуха // Проблемы пожарной безопасности. – 2016. – Вып. 40. – С. 78-83. Режим доступа: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol40/dadashov.pdf>.

8. Дадашов И.Ф. Повышение эффективности тушения горючих жидкостей в резервуарах путем использования гелеобразующих средств / И.Ф. Дадашов, А.А. Киреев // Proceedings of Azerbaijan state marine academy. – 2016. – №2. – С.72-76.

9. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д. А. Франк-Каменецкий – М.: Наука, 1967. – 491 с.

Получено редколлегией 14.03.2017

І.Ф. Дадашов, А.Я. Шаршанов, О.О. Кіреєв

Уповільнення випаровування рідини шаром гранульованого матеріалу, нанесеного на її поверхню

Проведено моделювання процесу дифузії парів горючих рідин крізь шар легкого пористого покриття, нанесеного на їх поверхню. Оцінена величина коефіцієнта зменшення потоку парів горючих рідин шаром гранул і фактори, що впливають на нього.

Ключові слова: математичне моделювання, гелеутворюючі системи, гелеподібні шари, ізолюючі властивості, пари горючих рідин, дифузія.

I. Dadashov, A. Sharsyanov, A. Kireev

Deceleration of liquid evaporation with a layer of granulated material applied on its surface

A simulation of the process of diffusion of vapors of combustible liquids through a layer of light granulated material deposited on their surface is carried out. The value of the coefficient of reduction of the vapor flux of combustible liquids by a layer of granules and the factors affecting it are estimated.

Keywords: mathematical modeling, vapors of flammable liquids, diffusion, porous coating, granular foam glass, coefficient of flux reduction.