

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗОЛИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ГЕЛЕОБРАЗНОГО СЛОЯ ПО ОТНОШЕНИЮ К ПАРАМ ГОРЮЧИХ ЖИДКОСТЕЙ

Проведено моделирование процесса стационарной диффузии паров горючих жидкостей сквозь слой геля, нанесенного на поверхность легкого носителя, обеспечивающего плавучесть бинарного слоя носитель – гель в углеводородном топливе. Проведена оценка времени достижения равновесного давления пара вблизи поверхности гелевого слоя.

Ключевые слова: математическое моделирование, гелеобразующие системы, гелеобразные слои, изолирующие свойства, пары горючих жидкостей, диффузия.

Постановка проблемы. Проблема тушения горючих жидкостей является одной из сложнейших в пожаротушении. Особенно большие трудности представляет тушение легковоспламеняющихся горючих жидкостей (ЛГЖ) в резервуарах больших размеров [1-2]. По мнению ряда авторов [3] в большинстве случаев не удастся потушить такие пожары даже в случае полного выполнения всех нормативных требований. Подобные пожары наносят большой экономический ущерб и часто приводят к человеческим жертвам. Также они наносят большой ущерб окружающей среде.

Основным огнетушащим средством тушения для тушения ЛГЖ являются воздушно-механические пенные средства пожаротушения. В них реализуется в качестве доминирующего механизма прекращения горения изоляция горючей жидкости от окислителя – кислорода воздуха. Толстый слой пены замедляет проникновение паров жидкости в воздух. Остальные механизмы прекращения горения вносят существенно меньший вклад в огнетушащие характеристики пен.

Однако пены как средство пожаротушения горючих жидкостей имеют ряд недостатков:

- проблемы с их подачей на большие расстояния;
- унос пены конвективными потоками продуктов горения;
- деструкция пен от прямого воздействия факела пламени, а также интенсивного теплового излучения;
- разрушение пен от контакта с горючими жидкостями, особенно содержащих полярные компоненты;
- токсичность поверхностно-активных веществ (ПАВ), входящих в состав пенообразователей.

Все вышеперечисленные факторы приводят к увеличению расхода огнетушащих веществ и нанесению ущерба окружающей среде. Таким образом, решение проблемы невысокой эффективности воздушно-пенных

средств тушения пожаров класса «В» может быть достигнуто путем устранения отмеченных выше недостатков.

Анализ последних исследований и публикаций. Для устранения большинства из перечисленных недостатков воздушно– механических пен было предложено использовать гелеобразующие огнетушащие и огнезащитные составы (ГОС) [4–5]. Они представляют собой два отдельно хранящихся и отдельно-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 пено-стекло-гель остаётся стабильным на поверхности бензина в течение нескольких суток. Вопрос об изолирующих свойствах такого бинарного слоя до настоящего времени не был рассмотрен.

Постановка задачи и её решение. Целью работы является моделирование процесса переноса паров горючих газов через слой геля, нанесенного на слой легкого носителя, и оценка времени достижения равновесного давления пара вблизи поверхности гелевого слоя для октана.

Для демонстрации изолирующего действия слоя геля оценим стационарное значение потока паров горючего сквозь такой слой. Схема анализируемой ситуации изображена на рис. 1.

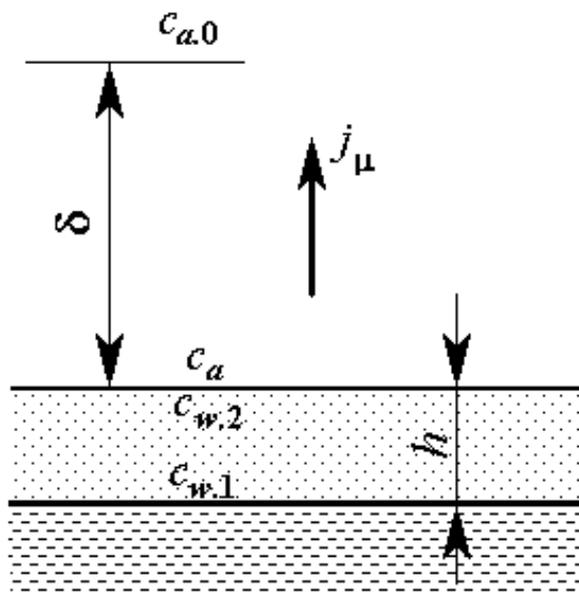


Рис. 1. Пространственная схема задачи переноса паров горючего через слой геля

В связи с пренебрежимо малой текучестью геля перенос паров горючего сквозь гель имеет исключительно диффузионный характер. Соответствующее уравнение стационарного массопереноса в гелиевом слое имеет вид

$$j_{\mu,w} = \frac{D_w}{h} (c_{w,1} - c_{w,2}), \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (1)$$

где $j_{\mu,w}$ – поверхностная плотность молярного потока паров горючего сквозь

слоя геля, $\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; D_w – коэффициент диффузии паров в геле, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; h – толщина слоя геля, м; $c_{w.1}$ и $c_{w.2}$ – концентрация горючего в слое геля у соответствующих его поверхностей), $\text{моль} \cdot \text{м}^{-3}$ (рис. 1).

На границе жидкого горючего с гелиевым слоем выполняется условие равновесия фаз, в связи с чем концентрация $c_{w.1}$ связана с равновесной концентрацией паров горючего у поверхности жидкого горючего c_s соотношением

$$c_{w.1} = \frac{c_s}{k_1}, \quad (2)$$

где k_1 – коэффициент распределения.

Аналогичное условие равновесия фаз связывает между собой концентрации паров горючего у поверхности границы геля с воздухом

$$c_{w.2} = \frac{c_a}{k_2}, \quad (3)$$

где c_a – концентрация паров горючего в воздухе у границы с гелем, $\text{моль} \cdot \text{м}^{-3}$ (рис. 1); k_2 – значение коэффициента распределения у соответствующей границы. Отметим, что коэффициент k является функцией температуры, в связи с чем в случае изотермической диффузии $k_1 = k_2 = k$.

Поверхностная плотность молярного потока паров горючего в воздухе $j_{\mu.a}$ удовлетворяет уравнению массоотдачи [6]

$$j_{\mu.a} = \beta \cdot (c_a - c_{a.0}), \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (4)$$

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

Коэффициент β связан с шириной переходной области δ соотношением [6]

$$\beta = \frac{D_a}{\delta}, \quad (5)$$

где D_a – коэффициент диффузии паров горючего в воздухе, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. В свою очередь ширина переходной области оценивается соотношением

$$\delta = \frac{l}{\text{Nu}_D}, \quad (6)$$

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

Отметим, что всегда $j_{\mu.w} \leq j_{\mu.a}$ и равенство $j_{\mu.w} = j_{\mu.a}$ 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 $j_{\mu.w} = j_{\mu.a} = j_{\mu}$, которое в случае изотермической диффузии имеет вид

$$j_{\mu}(h) = \frac{\beta \cdot (c_s - c_{a.0})}{1 + \frac{\beta \cdot h \cdot k}{D_w}} = \frac{j_{\mu}(0)}{1 + k \cdot \frac{h}{\delta} \cdot \frac{D_a}{D_w}}, \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (7)$$

Из формулы (7) следует, что нанесение слоя геля уменьшает поток паров горючего не менее, чем в K раз

$$K = 1 + k \cdot \frac{h}{\delta} \cdot \frac{D_a}{D_w}. \quad (8)$$

Максимальный поток (7) достигается в стационарном режиме, выход на который происходит за время, превышающее характерное время диффузии паров горючего сквозь слой геля

$$\tau_D = \frac{h^2}{D_w}. \quad (9)$$

Приведем численную оценку параметров K и τ_D , в ходе которой воспользуемся тем, что интересующие нас свойства геля мало отличаются от соответствующих свойств воды [7]. В качестве диффундирующего вещества возьмём являющийся основным компонентом бензина октан. Оценка будет соответствовать температуре 20°C.

Значение коэффициента распределения k , можно получить на основании формулы (2). При этом для оценки величины концентрации горючего в воде c_w используется справочное значение коэффициента растворимости октана в воде k_m [8], а для оценки концентрации насыщенных паров горючего c_s – эмпирическая формулу Аррениуса

$$\lg p_s = A - \frac{B}{t + C}, \quad (10)$$

где A , B , C – константы, а t – температура по шкале Цельсия, определяющая давление насыщенных паров p_s , кПа, с дальнейшим пересчетом его в концентрацию на основе уравнения состояния идеального газа.

Так в случае октана $k_m = 1,5 \cdot 10^{-5}$ грамм октана на грамм воды. Данной растворимости соответствует концентрация октана в воде

$$c_w = \frac{k_m \cdot \rho_w}{\mu} = 0.13 \text{ моль} \cdot \text{м}^{-3}. \quad (11)$$

В оценке (11) использовано низкое значение растворимости ($k_m \ll 1$); взяты значения плотности воды $\rho_w = 1000 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ и молярной массы октана $\mu = 114 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$.

В случае октана константы уравнения (10) принимают значение $A = 6,094$, $B = 1379,6$, $C = 211,9$, что при температуре $t = 20^\circ\text{C}$ дает давление насыщенных паров $p_s = 1,40$ кПа. Данному давлению в случае идеального газа соответствует концентрация

$$c_s = \frac{P_s}{R \cdot T} = 0.57 \text{ моль} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (12)$$

где $R = 8,314 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура паров, К.

Используя результаты (11), (12) получаем оценку коэффициента распределения октана при температуре 20°C

$$k = \frac{c_s}{c_w} = 4.4. \quad (13)$$

Коэффициент диффузии D_w будем оценивать по формуле коэффициента диффузии броуновской частицы (молекулы октана) в жидкости (воде)

$$D_w = \frac{k_B \cdot T}{6 \cdot \pi \cdot \rho_w \cdot \nu_w \cdot r_o}, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}, \quad (14)$$

где $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$ – постоянная Больцмана; ν_w – коэффициент кинематической вязкости воды, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; r_o – эффективный радиус диффундирующей частицы, м.

Воспользовавшись тем, что при температуре 20°C справочное значение $\nu_w = 1.005 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, а оценочное значение $r_o = 3.8 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, из выражения (14) получим $D_w = 5.6 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Коэффициент диффузии паров октана в воздухе будем определять, используя эмпирическое соотношение

$$D_a = D_{a,0} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^2, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}, \quad (15)$$

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 $D_a = 6.3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Подставляя полученные значения величин k , D_w , D_a в формулу (8), используя (6), получим оценку величины минимального значения коэффициента уменьшения потока слоем геля

$$K = 1 + 5.0 \cdot 10^4 \cdot \frac{h}{\delta} = 1 + 5.0 \cdot 10^4 \cdot \text{Nu}_D \cdot \frac{h}{l}. \quad (16)$$

Учитывая, что минимальное значение $\text{Nu}_D \sim 1$, из соотношения (16) получаем, что при характерных размерах поверхностей $l \sim 10 \text{ м}$ ослабляющее действие гелиевого слоя является эффективным уже при толщине $h \sim 1 \text{ мм}$ даже в стационарном режиме. Согласно соотношению (9) выход на это минимальное значение (16) произойдет за времена превышающие

$$\tau_D = 1.8 \cdot 10^3 \cdot h^2, \text{ с} \quad (17)$$

(в формуле (17) толщина гелиевого слоя h берется в миллиметрах).

Выводы. Проведено математическое моделирование процесса испарения паров горючих жидкостей сквозь слой геля нанесенного на поверхность легкого носителя, обеспечивающего плавучесть бинарного слоя носитель – гель в углеводородном топливе. Показано, что процесс испарения замедляется с ростом толщины гелеобразного слоя и уменьшения коэффициента диффузии молекул горючей жидкости в этом слое.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шараварников А.С. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов / А.С. Шараварников, В.П. Молчанов, С.С. Воевода, С.А. Шараварников. – М.: Калан, 2002. – 448 с.
2. Вогнегасні речовини: посібник / [Антонов А.В., Боровиков В.О., Орел В.П. та ін.]. – К.: Пожінформтехніка, 2004. – 176 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. 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.
5. Купка В.Ю. Пути повышения эффективности тушения пожаров класса В / В.Ю. Купка, А.А. Киреев, К.В. Жерноклёв // Проблемы пожарной безопасности. – 2012. – Вып. 31. – С. 105–108.
6. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Давид Альбертович Франк-Каменецкий. – М.: Наука, 1967. – 491 с.
7. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии / Д.А. Фридрихсберг. – Л.: Химия, 1974. – 352 с.
8. Справочник химика / Под ред. Б.Н. Никольского. – [2-е изд.]. – Т-2. – Ленинград: Госхимиздат, 1963. – 1169 с.

Получено редколлегией 10.10.2016

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

Моделювання ізолюючих властивостей гелеподібного шару по відношенню до пари горючих рідин

Проведено математичне моделювання процесу випаровування парів горючих рідин крізь шар гелю нанесеного на поверхню легкого носія, що забезпечує плавучість бінарного шару носій – гель у вуглеводневому паливі. Показано, що процес випаровування сповільнюється зі зростанням товщини гелеподібному шару і коефіцієнта дифузії молекул горючої рідини в цьому шарі.

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

I.F. Dadashov, A.Y. Sharsyanov, A. A. Kireev, A.A. Chernuha

Modeling of insulating properties gel-like layer against the pair of flammable liquids

Mathematical modeling of the process of evaporation vapors of flammable liquids through a layer of gel deposited on the surface of a light carrier that provides buoyancy binary layer media – gel hydrocarbon fuel. It is shown that the process of evaporation is slowed with increasing thickness of the gel-like layer and the diffusion coefficient of the fuel molecules in this layer.

Keywords: mathematical modeling, gelling systems, gel-like layers, insulating properties, vapor flammable liquids, diffusion.