

Дадашов И.Ф., Киреев А.А., Кириченко И.К., Ковалёв А.А., Шаршанов А.Я.

Моделирование изолирующих свойств двухслойного материала формируемого на поверхности жидкости

Постановка проблемы. При обращении с жидкостями возникает необходимость предотвратить или замедлить их испарение. Потребность в уменьшении потерь жидкостей за счёт испарения возникает при хранении жидкостей в резервуарах. В таких случаях существенно уменьшить их потери за счет испарения удаётся оборудованием их паронепроницаемыми плавающими барьерами. Это реализуется путем создания резервуаров с плавающими крышами и резервуаров с понтонами [1]. В случае аварийных ситуаций, сопровождающихся разливами горючих или токсичных жидкостей, возникает потребность в изоляции их поверхности. Для этого обычно используют пены [2]. Пены также используются как основное средство пожаротушения при ликвидации пожаров с участием жидкостей, благодаря наличию у них изолирующих свойств.

Во всех рассматриваемых выше случаях для уменьшения испарения жидкостей требуется создание на их поверхности слоя с высокими изолирующими свойствами. В случае хранения жидкостей в резервуарах создание таких слоёв закладывается еще на стадии проектирования. В случае аварийных ситуаций изолирующие слои необходимо создать в ходе их ликвидации. Причём создание изолирующих барьеров нужно осуществить дистанционно. Часто при ликвидации разливов высокотоксичных жидкостей и пожаров высокой интенсивности удаление оборудования и персонала, участвующего в ликвидации аварийной ситуации должно составлять десятки метров. Практически единственным изолирующим средством, используемым в таких ситуациях, являются воздушно-механические пены.

Однако пены как изолирующее средство для жидкостей имеют ряд недостатков:

- существуют трудности с их подачей на большие расстояния;
- пены быстро разрушаются при контакте с полярными жидкостями;
- время существования пен ограничено.

В случае применения пен для тушения горючих жидкостей добавляются ещё такие их недостатки:

- они легко уносятся конвективными потоками продуктов горения;

– в пенах в качестве газа–наполнителя используется воздух, который поддерживает горение;

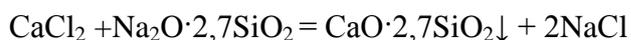
– пены подвергаются деструкция от прямого воздействия факела пламени, а также интенсивного теплового излучения.

Однако критическими параметрами наиболее эффективных в настоящее время плёнкообразующих пенообразователей оказались их экологические характеристики [3–5]. Они оказались в 150 раз токсичнее “биологически жесткого” пенообразователя ПО-6К и в 2500 раз стабильнее к биодegradации в окружающей среде [6]. Подтверждением факта экологической опасности таких пенообразователей стало решение Агентства по охране окружающей среды США объявить программу добровольного прекращения использования таких веществ и отказ фирмы “3М” от их выпуска [7].

Анализ последних исследований и публикаций. Для устранения большинства из перечисленных недостатков воздушно-механических пен было предложено использовать в качестве изолирующего материала гелеобразные слои, которые формируются на слое легкого негорючего носителя [8-9]. Для получения слоя геля были использованы гелеобразующие огнетушащие системы [10]. Они представляют собой два отдельно хранящихся и отдельно-одновременно подаваемых раствора. Компоненты раствора подобраны таким образом, чтобы при их смешении образовывался нетекучий слой геля.

Потеря текучести при смешении компонентов гелеобразующей системы обусловлена образованием непрерывной макромолекулярной сетки, которая выступает в роли каркаса. В пустотах сетки находятся молекулы низкомолекулярных веществ. В случае смешивания раствора хлорида кальция и полисиликата натрия в основном образуются аморфные мицеллы полисиликата кальция, которые по конденсационному механизму быстро образуют каркас [11].

Рассмотрим фазовый состав геля при использовании гелеобразующей системы $\text{CaCl}_2(10\%)+\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2(10\%)$. Для выбранной нами гелеобразующей системы основной реакцией будет:



Одновременно может образоваться некоторое количество кремнегеля [11]. Исходя из стехиометрии реакции рассчитаем массовую долю каркаса геля, хлорида натрия и хлорида кальция, который находится в избытке по сравнению с жидким стеклом. Соответствующие данные представлены в таблице 1.

Табл.1. Состав геля, образовавшегося из гелеобразующей системы $\text{CaCl}_2(10\%) + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2(10\%)$.

Характеристика фазы	Вещество			
	CaCl_2	$\text{CaO} \cdot 2,7\text{SiO}_2$	NaCl	H_2O
Агрегатное состояние фазы	жидкая	твёрдая	жидкая	жидкая
содержание, мас. %	2,6	4,7	2,7	90

На основании полученных данных можно заключить, что твёрдая фаза, из которой построен каркас геля, составляет всего 4,7 % по массе или 1,7 % по объёму (плотность полисиликатов кальция равна $\sim 2,8 \text{ г/см}^3$). Незначительное содержание твёрдой фазы в составе геля указывает на то, что коэффициенты диффузии веществ растворённых в геле будут мало отличаться от соответствующего показателя водных растворов [12]. Небольшие концентрации хлоридов кальция и натрия в жидкой фазе также не приведут к существенному изменению коэффициента диффузии в гелеобразном слое. Отсюда вытекает, что изолирующие свойства геля будут близкими к изолирующим свойствам такого же по толщине слоя воды.

Однако непосредственное использование геля как изолирующего покрытия для органических жидкостей невозможно, так как его плотность больше плотности большинства жидкостей. Для обеспечения плавучести слоя геля в горючих жидкостях было предложено использовать лёгкий негорючий носитель – гранулированное пеностекло [9]. Предварительные опыты показали, что двухслойный материал пеностекло-гель остаётся стабильным на поверхности жидких углеводородов и их галогенпроизводных, ряда спиртов, аминов и нитросоединений в течение нескольких суток.

Таким образом, предложенная технология изоляции жидкостей, состоит из двух этапов. Первый этап – равномерное нанесение на поверхность жидкости слоя лёгкого носителя – гранулированного пеностекла. Второй этап – нанесение на слой плавающего пеностекла компонентов гелеобразующей системы. В результате образовавшийся бинарный слой лёгкий носитель – гель обеспечивает изоляцию пространства над слоем геля от проникновения паров жидкостей.

Ранее [13-14] были экспериментально установлены высокие изолирующие свойства гелеобразного слоя системы $\text{CaCl}_2(10\%) + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2(10\%)$ по отношению к парам органических жидкостей. Коэффициент замедления

испарения для углеводородов сплошного слоя геля толщиной (1-2) мм составляет (30±5). Также было установлено, что слой пеностекла вносит свой вклад в замедление испарения жидкостей [15]. Так слой пеностекла толщиной 10 см снижает скорость испарения бензина в 5 раз.

В работе [16] было проведено моделирование влияния толщины слоя пеностекла, а в работе [17] влияние толщины слоя геля на скорость испарение жидкостей. В работах [18-19] были разобраны решения схожих задач на других объектах. Моделирование совместного влияния слоя пеностекла и слоя геля на испарение горючих жидкостей проведено не было.

Постановка задачи и её решение. Целью работы является моделирование процесса переноса паров жидкостей через двухслойный материал, состоящий из лёгкого гранулированного носителя, на поверхность которого нанесен слой геля. Задачей является определение характеристик этого процесса в стационарном режиме и оценка времени выхода на этот режим.

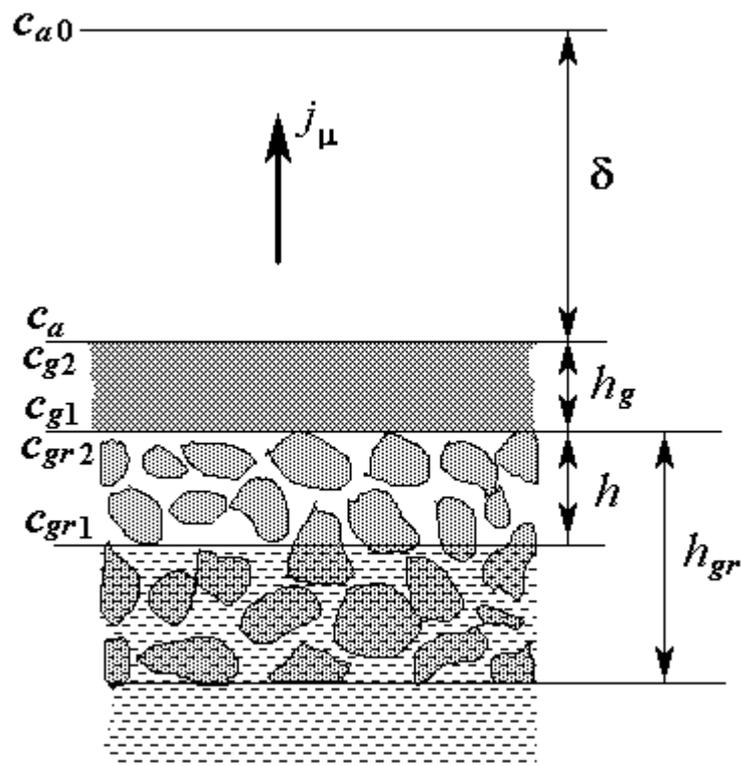


Рис. 1. Пространственная схема задачи переноса паров горючего через слой гранулированного материала и геля.

Схема анализируемой ситуации изображена на рис. 1. Заштрихованная область соответствует жидкости, над которой плавает слой гранул пеностекла.

Толщина этого слоя обозначена h_{gr} . Не погруженная в жидкость часть слоя пеностекла имеет толщину h . Слой гранул отделен от внешней (воздушной) среды слоем геля толщиной h_g . Над гелиевым слоем расположен переходной слой толщиной δ , в пределах которого концентрация паров жидкости c (моль·м⁻³) изменяется от своего значения у поверхности геля c_a до значений во внешнем пространстве c_{a0} . На схеме индексы при концентрации соответствуют расположению в пространстве: “a” – воздушное пространство, “g” – гелиевый слой, “gr” – пустоты гранулированного слоя; индексы “1” и “2” отвечают нижней и верхней части соответствующего слоя.

Сразу отметим, что высота h однозначно связана с толщинами слоев h_{gr} и h_g , соотношением

$$h = h_{gr} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{gr}}{\rho_f} \right) - h_g \frac{\rho_g}{(1 - r_v) \cdot \rho_f}.$$

где ρ_{gr} , ρ_g и ρ_f – плотности материала гранул, геля и жидкости, соответственно, кг·м⁻³; r_v – объемная доля пустот в гранулированном материале.

Перенос паров жидкости сквозь пустоты гранулированного материала осуществляется диффузией. Соответствующее уравнение стационарного массопереноса через этот слой имеет вид:

$$j_{\mu.gr} = \frac{D_{gr}}{h} (c_{gr1} - c_{gr2}), \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (1)$$

где $j_{\mu.gr}$ – плотность молярного потока паров сквозь слой гранул, в расчете на единицу площади слоя, моль·м⁻²·с⁻¹; D_{gr} – коэффициент диффузии паров сквозь слой гранул, м²·с⁻¹; c_{gr1} и c_{gr2} – концентрации паров в пустотах гранулированного слоя у нижней и верхней его границы (рис. 1).

Так как размеры областей между гранулами велики по сравнению с длиной свободного пробега молекул газа, то выполняется соотношение

$$c_{gr1} = c_s, \quad (2)$$

где c_s – равновесная концентрация паров у поверхности жидкости, моль·м⁻³.

Коэффициент диффузии паров в воздухе сквозь слой гранул D_{gr}

пропорционален коэффициенту диффузии паров в воздухе без гранул D_a , $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

В работе [20] одного из авторов получена оценка

$$D_{gr} \leq D_a \cdot \left(\frac{h}{l_m} \right)^2 \cdot r_v, \quad (3)$$

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).

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

$$j_{\mu.g} = \frac{D_g}{h_g} (c_{g1} - c_{g2}), \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (4)$$

где $j_{\mu.g}$ - поверхностная плотность молярного потока паров горючего сквозь слой геля, $\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; D_g - коэффициент диффузии паров в геле, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; c_{g1} и c_{g2} - концентрация паров в слое геля у соответствующих его поверхностей, $\text{моль} \cdot \text{м}^{-3}$ (рис. 1).

На границе пустот гранулированного материала с гелиевым слоем выполняется условие равновесия фаз, в связи с чем, концентрации паров у этой границы связаны соотношением

$$c_{g1} = \frac{c_{gr2}}{k_1}, \quad (5)$$

где k_1 - коэффициент распределения.

Аналогичное условие равновесия фаз связывает между собой концентрации паров жидкости у границы геля с воздухом:

$$c_{g2} = \frac{c_a}{k_2}, \quad (6)$$

$\text{моль} \cdot \text{м}^{-3}$, (рис. 1); k_2 - значение коэффициента распределения у соответствующей

границы. Отметим, что коэффициент распределения является функцией температуры, в связи с чем, в случае изотермической диффузии $k_1 = k_2 = k$.

Поверхностная плотность молярного потока паров в воздухе $j_{\mu,a}$ удовлетворяет уравнению массоотдачи [21]:

$$j_{\mu,a} = \beta \cdot (c_a - c_{a0}), \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (7)$$

где c_{a0} - концентрация паров жидкости в воздухе (в ядре газовой фазы) на расстояниях, превышающих ширину переходной области δ (рис. 1); β - коэффициент массоотдачи паров в воздухе, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Коэффициент β связан с шириной переходной области δ соотношением

$$\beta = \frac{D_a}{\delta}, \quad (8)$$

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

$$\delta = \frac{l}{Nu_D}, \quad (9)$$

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

Отметим, что всегда $j_{\mu,gr} \geq j_{\mu,g} \geq j_{\mu,a}$ и равенство потоков достигается только при полном выходе процесса массопереноса на стационарный режим. В этом режиме совместное решение системы уравнений (1)-(7) позволяет получить общее максимально возможное значение поверхностной плотности молярного потока паров жидкости $j_{\mu,gr} = j_{\mu,g} = j_{\mu,a} = j_{\mu}$, которое в случае изотермической диффузии имеет вид

$$j_{\mu}(h_g, h) = \frac{\beta \cdot \left(c_s \cdot \frac{k_2}{k_1} - c_{a0} \right)}{1 + \beta \cdot k_2 \cdot \frac{h_g}{D_g} + \beta \cdot \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{h}{D_{gr}}}, \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (10)$$

Соотношению (10), учитывая формулу (8), можно придать форму

$$j_{\mu}(h_g, h) = \frac{j_{\mu}(0,0)}{1 + k_2 \cdot \frac{h_g}{\delta} \cdot \frac{D_a}{D_g} + \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{h}{\delta} \cdot \frac{D_a}{D_{gr}}} \approx \frac{j_{\mu,0}}{K}, \quad (11)$$

где символом

$$j_{\mu,0} = \beta(c_s - c_{a0}), \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (12)$$

обозначена плотность потока жидкости, испаряющейся со свободной поверхности, а параметр K задается соотношением:

$$K = 1 + k_2 \cdot \frac{h_g}{\delta} \cdot \frac{D_a}{D_g} + \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{h}{\delta} \cdot \frac{D_a}{D_{gr}}. \quad (13)$$

Используя соотношения (7), (10) и (13), можно определить концентрацию паров непосредственно над поверхностью слоя геля

$$c_a = \frac{j_{\mu}}{\beta} + c_{a0} = \frac{c_s \cdot \frac{k_2}{k_1} + (K - 1) \cdot c_{a0}}{K} \approx \frac{c_s}{K}. \quad (14)$$

Из формулы (11) и (14) следует, что нанесение слоев гранулированного материала и геля на поверхность жидкости в K раз уменьшает и стационарный поток паров горючего, и его концентрацию на входе в воздушное пространство.

Поток (10) достигается в стационарном режиме, выход на который происходит за время τ_{st} , превышающее сумму характерных время диффузии паров сквозь слои гранулированного материала τ_{gr} и геля τ_g :

$$\tau_{gr} = \frac{h^2}{D_{gr}}, \quad (15)$$

$$\tau_g = \frac{h_g^2}{D_g}. \quad (16)$$

Приведем численную оценку параметров K , τ_{gr} и τ_g , в ходе которой воспользуемся тем, что интересующие нас свойства геля мало отличаются от соответствующих свойств воды [12]. В качестве диффундирующего вещества возьмём октан. Оценка будет соответствовать температуре 20°C.

Значение коэффициента распределения $k = k_2 \approx k_1$, можно получить на основании формулы (6), беря для концентрации c_a максимально возможное значение c_s . При этом для оценки величины концентрации жидкости в воде c_{g2} используется справочное значение коэффициента растворимости октана в воде k_m [22], а для оценки концентрации насыщенных паров октана c_s – эмпирическая формула Антуана:

$$\lg p_s = A - \frac{B}{t + C}, \quad (17)$$

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

$$c_{g2} = \frac{k_m \cdot \rho_w}{\mu} = 0.13 \text{ моль} \cdot \text{м}^{-3}. \quad (18)$$

В оценке (18) 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 $\mu = 114 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-3}$.

В случае октана константы уравнения (17) 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

$$c_s = \frac{p_s}{R \cdot T} = 0.57 \text{ моль} \cdot \text{м}^{-3}. \quad (19)$$

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

Используя результаты (18), (19) получаем оценку коэффициента распределения октана при температуре 20°C :

$$k = \frac{c_s}{c_{g2}} = 4.4, \quad (20)$$

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

$$D_g = \frac{k_B \cdot T}{6 \cdot \pi \cdot \rho_w \cdot \nu_w \cdot r_o}, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1} \quad (21)$$

где $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹ – постоянная Больцмана; ν_w – коэффициент кинематической вязкости воды, м²·с⁻¹; r_o – эффективный радиус диффундирующей частицы, м. Воспользовавшись тем, что при температуре 20°C справочное значение $\nu_w = 1.005 \cdot 10^{-6}$ м²·с⁻¹, а оценочное значение $r_o = 3.8 \cdot 10^{-10}$ м, из выражения (21) получим $D_g = 5.6 \cdot 10^{-10}$ м²·с⁻¹.

Согласно соотношению (16) характерное время диффузии в гелиевом слое составляет

$$\tau_g = 1.8 \cdot 10^3 \cdot h_g^2, \text{ с.} \quad (22)$$

(в формуле (22) толщина гелиевого слоя h берется в миллиметрах).

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

$$D_a = D_{a,0} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^2, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}, \quad (23)$$

где $T_0 = 273$ К; $D_{a,0}$ – значение коэффициента диффузии при температуре T_0 . В случае октана справочное значение $D_{a,0} = 5.5 \cdot 10^{-6}$, м²·с⁻¹, в результате при температуре 20°C получаем $D_a = 6.3 \cdot 10^{-6}$ м²·с⁻¹.

Для оценки D_{gr} воспользуемся соотношением (3), приняв в нем $\left(\frac{h}{l_m} \right)^2 = 0.5$ и $r_v = 0.25$. В результате получим $D_{gr} \approx 0.8 \cdot 10^{-6}$ м²·с⁻¹.

Такая величина D_{gr} дает (согласно (15)) характерное время выхода на стационарный режим испарения

$$\tau_{gr} = 1.25 \cdot 10^2 \cdot h^2, \text{ с} \quad (24)$$

(в формуле (24) толщина слоя гранулированного материала h берется в сантиметрах).

Подставляя полученные значения величин $k = k_2 \approx k_1$, D_g , D_{gr} , D_a в формулу (13), используя (9), получим оценку величины минимального значения коэффициента уменьшения потока слоями гранулированного материала и геля

$$K = 1 + 5.0 \cdot 10^4 \cdot \frac{h_g}{\delta} + \frac{h}{\delta} \cdot \frac{1}{r_v} \cdot \left(\frac{l_m}{h} \right)^2 = 1 + Nu_D \cdot \left(5.0 \cdot 10^4 \cdot \frac{h_g}{l} + 8 \cdot \frac{h}{l} \right). \quad (25)$$

Учитывая, что минимальное значение $Nu_D \sim 1$, из соотношения (25) получаем, что при характерных размерах поверхностей $l \sim 1$ м ослабляющее действие гелиевого слоя является эффективным уже при толщине $h_g \sim 0,1$ мм даже в стационарном режиме. Аналогичный ослабляющий эффект соответствует величинам h большим на 4 порядка.

В проведенных ранее экспериментальных исследованиях [13-14] установлено, что минимальная толщина сплошного гелеобразного слоя, нанесенного на горизонтальную поверхность должна быть не менее 1 мм. В работе [15] показано, что наиболее эффективно свойства пеностекла реализуются при его толщине более 5 см. Примем эти толщины за минимальные. Рассчитанное значение коэффициента уменьшения потока паров октана для таких толщин изолирующих слоёв по уравнению (25) составит 51,4. При толщине слоя геля 2 мм значение K будет равно 101,4. Такие свойства изолирующего двухслойного материалы делает целесообразным использовать их в случае аварийных ситуаций связанных с разливом токсичных и горючих жидкостей, а также при тушении пожаров с участием горючих жидкостей.

Выводы. Проведено математическое моделирование процесса испарения паров жидкости через бинарный изолирующий слой, состоящий из геля, нанесенного на поверхность пеностекла. Проведена оценка коэффициента уменьшения скорости испарения октана при наступлении стационарного режима. Для толщины слоя геля 2 мм и толщины слоя пеностекла 5 см скорость испарения октана уменьшается более, чем в 100 раз по сравнению со скоростью испарения со свободной поверхности жидкости. Предложено использовать двухслойные изолирующие материалы для ликвидации чрезвычайных ситуаций связанных с разливом токсичных и горючих жидкостей, а также при тушении пожаров с участием горючих жидкостей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рубцов Д.Н. Особенности пожарной опасности нефтяных резервуаров с плавающей крышей / Д.Н. Рубцов, В.В. Рубцов // Безопасность жизнедеятельности. – 2014. – № 9. – С. 56-61.

2. Довідник рятувальника. / За загальною редакцією В.І. Балоги. – Львів: СПОЛОМ, 2012.– 712 с.

3. Buck R.C., Franklin J., Berger U., Conder J.M, Cousins I.T, Voogt P., et al. Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Environment: Terminology, Classification, and Origins // Integrated Environmental Assessment and Management. – 2012. – No. 4. Vol. 7. P. 513–541.

4. Martin J.W., Smithwick M.M., Braune B.M., Hoekstra P.F., Muir D.C., Mabury S.A. Identification of long-chain perfluorinated acids in biota from the Canadian Arctic // Environ Sci. Technol. – 2004. – No. 38. – P. 373–380.

5. Kannan K., Corsolini S., Falandysz J., Fillmann G., Kumar K.S., Loganathan B.G., Mohd M.A., Olivero J., van Wouwe N., Yang J.H., Aldous K.M. Perfluorooctanesulfonate and related fluoro-chemicals in human blood from several countries // Environ Sci. Technol. – 2004. – No. 38. – P. 89–95.

6. Бочаров В.В. Использование перфторированных ПАВ в пенообразователях – “второе пришествие”. Галогенорганика с наихудшим сценарием развития для обитателей земли / В.В. Бочаров // Пожаровзрывобезопасность. – 2013.– Т. 22. – № 10.– С. 75-82.

7. J. Seam. Fire fighting foams with perfluorechemicals. Environmental revieve. 2013. – 86 p.

8. 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.

9. Дадашов И.Ф. Выбор лёгкого силикатного носителя для гелевого огнетушащего слоя при пожаротушении / И.Ф. Дадашов, А.А. Киреев, Л.А. Михеенко // Керамика: наука и жизнь. – 2016. – № 2. – С. 44-51.

10. Абрамов Ю.А. Гелеобразующие огнетушащие и огнезащитные средства повышенной эффективности применительно к пожарам класса А / Ю.А. Абрамов, А.А. Киреев. – Харьков.: НУГЗУ, 2015. – 254 с.

11. Айлер Р. Химия кремнезёма / Р. Айлер. – М.: Мир, 1982. – ч.1 и 2, 712 с.

12. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии / Д.А. Фридрихсберг. – Л.: Химия, 1974. – 352 с.

13. Дадашов И.Ф. Экспериментальное исследование изолирующих свойств гелеобразных слоёв по отношению к парам органических токсичных жидкостей / И.Ф. Дадашов // Проблемы гражданского захисту. – 2017. – Вып. 25. – С. 22-27.

14. Дадашов И.Ф. Экспериментальное исследование влияния характеристик гелеобразного слоя на его изолирующие свойства по отношению к парам токсичных и горючих жидкостей / И.Ф. Дадашов, А.А. Киреев, А.Я. Шаршанов, А.В. Савченко, А.А. Ковалёв // Проблемы гражданского захисту. – 2017. – Вып. 26. – С. 43-48.

15. Дадашов И.Ф. Экспериментальное исследование испарения бензина через слой гранулированного пеностекла / И.Ф. Дадашов // Проблемы пожарной безопасности. – 2017. – Вып. 42. – С. 27-32.

16. Дадашов И.Ф. Замедление испарения жидкости слоем гранулированного материала, нанесённого на её поверхность / И.Ф. Дадашов, А.А. Киреев, А.Я. Шаршанов // Проблемы пожарной безопасности. – 2017. – Вып. 41. – С. 53-58.

17. 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.

18. Баренблатт Г. И. Движение жидкостей и газов в природных пластах / Г.И. Баренблатт, В.М. Ентов, В.М. Рыжик. – М.: Недра, 1984, – 211 с.

19. Баренблатт Г. И. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа / Г.И. Баренблатт, В.М. Ентов, В.М. Рыжик. – М.: Недра, 1972 – 288 с.

20. Шаршанов А.Я. Замедление массопереноса зернистой средой / А.Я. Шаршанов // Проблемы пожарной безопасности. – 2017. – Вып. 41. – С. 206-210.

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

22. Справочник химика / Под ред. Б.Н. Никольского – [2-е изд.]. – Т. 2. – Ленинград: Госхимиздат, 1963. – 1169 с.