

## Снижение испарения углеводородных жидкостей экранирующим слоем гранулированного пеностекла

Евгений Викторович Ширяев ✉, Владимир Петрович Назаров

Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Пожарная опасность открытой поверхности испарения углеводородных жидкостей при их хранении в емкостях (резервуарах), а также при аварийных проливах характеризуется массовой скоростью испарения. Основным способом снижения пожарной опасности углеводородных жидкостей является изоляция поверхности испарения углеводородных жидкостей с помощью различных покрытий, например понтов или плавающих крыш в емкостных аппаратах (резервуарах), а при аварийных проливах — применение воздушно-механической пены и т.п. Одним из эффективных способов снижения испарения углеводородных жидкостей является изоляция поверхности испарения легкими низкогигроскопичными гранулированными материалами, способными удерживаться на поверхности жидкости под действием архимедовой силы. Работа посвящена расчетно-экспериментальной оценке снижения массовой скорости испарения углеводородных жидкостей при экранировании поверхности пролива слоем гранулированного пеностекла.

**Методика расчета и полученные результаты.** Разработана математическая модель снижения скорости испарения углеводородных жидкостей через «сухой» слой гранулированного пеностекла, аналогом которой является закон Бугера – Ламберта – Бера. Разработана «Методика экспериментальной оценки массовой скорости испарения углеводородных жидкостей через экранирующий слой гранулированного пеностекла различной высоты» (Методика). Используя результаты экспериментального исследования параметров испарения легковоспламеняющихся жидкостей (ацетон, бензин АИ-92, гексан, этанол, керосин авиационный, дизельное топливо) через «сухой» слой гранулированного пеностекла марки «Термоизол» (фракции 5–7 мм) по разработанной Методике, были определены коэффициенты экранирования для ряда углеводородных жидкостей и осредненный коэффициент экранирования. Установлены зависимости скорости испарения жидкостей через различную толщину «сухого» слоя гранулированного пеностекла от давления насыщенных паров. Дана расчетно-экспериментальная оценка высоты зоны, ограниченной нижним концентрационным пределом распространения пламени паров при испарении исследуемых жидкостей со свободной поверхности и с экранирующим слоем гранулированного пеностекла марки «Термоизол».

**Выводы.** Разработанная математическая модель и Методика экспериментальной оценки массовой скорости испарения углеводородных жидкостей позволяет определять скорость испарения углеводородных жидкостей различных классов и может быть использована для исследования параметров испарения при экранировании различными по своему гранулометрическому составу материалами.

**Ключевые слова:** пористая среда; легковоспламеняющаяся жидкость; изолирующий слой; скорость испарения; коэффициент экранирования

**Для цитирования:** Ширяев Е.В., Назаров В.П. Снижение испарения углеводородных жидкостей экранирующим слоем гранулированного пеностекла // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 5. С. 14–25. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.14-25

✉ Ширяев Евгений Викторович, e-mail: shiryayev@bk.ru

## Using the screening layer of granulated foam glass to reduce the evaporation of hydrocarbon liquids

Evgeniy V. Shiryayev ✉, Vladimir P. Nazarov

The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The open surface of evaporation of hydrocarbon liquids during their storage in tanks (reservoirs) and in case of emergency spills are the fire hazards characterized by the mass rate of evaporation. The main way

to reduce the fire hazard of hydrocarbon liquids is to isolate the evaporation surface of hydrocarbon liquids using various coatings, such as pontoons or floating roofs in tanks (reservoirs), and in case of emergency spills air-filled foam can be used, etc. An effective way to reduce the evaporation of hydrocarbon liquids is to isolate the evaporation surface using light slightly hygroscopic granular materials capable of being retained on the liquid surface by the Archimedean force. The authors address the analytical-experimental evaluation of a decrease in the mass rate of evaporation of hydrocarbon liquids when a layer of granulated foam glass shields the spill surface.

**Calculation methodology and results.** A mathematical model has been developed to describe a reduction in the evaporation rate of hydrocarbon liquids through a “dry” layer of granulated foam glass, similar to the Bouguer – Lambert – Beer law. A method of experimental evaluation of the mass evaporation rate of hydrocarbon liquids through a shielding layer of granulated foam glass of different height has been developed. Screening coefficients for a number of hydrocarbon liquids and the averaged screening coefficient were identified using the results of an experimental research into parameters of evaporation of flammable liquids (acetone, gasoline AI-92, hexane, ethanol, kerosene, diesel fuel) through a “dry” layer of granulated foam glass of the Termoizol brand (fraction 5–7 mm) obtained using the methodology developed by the authors. Dependences between the rates of liquid evaporation through different thicknesses of a “dry” layer of granulated foam glass on the pressure of saturated vapours have been established. The area height, limited by the bottom concentration limit of the vapour flame, spreading during the evaporation of tested liquids from the free surface that may also have a shielding layer of Termoizol granulated foam glass is estimated analytically and experimentally.

**Conclusions.** The developed mathematical model and the method of experimental estimation of the mass evaporation rate of hydrocarbon liquids allows to identify the evaporation rate of hydrocarbon liquids of different classes, and it can be used to study the parameters of evaporation shielded by materials having different granulometric compositions.

**Keywords:** porous medium; flammable liquid; insulating layer; evaporation rate; screening coefficient

**For citation:** Shiryayev E.V., Nazarov V.P. Using the screening layer of granulated foam glass to reduce the evaporation of hydrocarbon liquids. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(5):14-25. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.14-25 (rus).

✉ Evgeniy Viktorovich Shiryayev, e-mail: shiryayev@bk.ru

## Введение

Снижение испарения легких фракций углеводородных жидкостей является важной задачей в сферах экономической, экологической и пожарной безопасности. Борьба с потерями нефти и нефтепродуктов направлена на экономию топливно-энергетических ресурсов, играющих значимую роль в развитии экономики нефтедобывающих стран. По разным оценкам потери углеводородов в результате испарения нефти и нефтепродуктов в атмосферу Земли составляют от 20 до 100 млн т/год, при этом примерно 9 млн т углеводородов выпадает с осадками из атмосферы. С момента добычи до непосредственного использования нефтепродукты подвергаются более 20 переделкам, при этом 75 % потерь легких фракций углеводородов происходит в виде технологических испарений и 25 % при аварийных утечках, разливах [1–3]. С точки зрения пожарной опасности вероятность сценариев развития аварии, связанных с образованием избыточного давления при сгорании горючего паровоздушного облака, значительно выше, чем при мгновенном воспламенении, при этом поражающие факторы взрыва дистанционно превышают другие опасные факторы пожара<sup>1</sup>.

Одним из эффективных способов снижения испарения углеводородных жидкостей является

изоляция поверхности испарения легкими низкогигроскопичными гранулированными материалами, способными удерживаться на поверхности жидкости под действием архимедовой силы. Анализ ряда гранулированных материалов (керамзит, вермикулит, перлит, шлакопемза, шунгизит и др.) показал, что пеностекло марки «Термоизол»<sup>2</sup> обладает сочетанием физических свойств, необходимых для устойчивой изоляции поверхности испарения углеводородных жидкостей: насыпная плотность фракции 5–7 мм (~180 кг/м<sup>3</sup>); теплопроводность (в сухом состоянии) 0,04–0,07 Вт/(м·К) ниже, чем у большинства углеводородных жидкостей; термостойкость (более 700 °C), водопоглощение (не более 8 %).

Процессы испарения и фильтрации углеводородных жидкостей и газов через гранулированные среды (грунт, песок, гравий и др.) широко рассматривались в работах отечественных и зарубежных авторов [4–13]. Влияние геометрических параметров гранулированной среды на снижение испарения углеводородных жидкостей исследовалось в работах [14–17].

В работе [16] гранулированное пеностекло предлагалось использовать в качестве покрытий зеркал резервуаров для сокращения потерь от испарения нефти и нефтепродуктов. Эмпирические данные указывают на то, что абсолют-

<sup>1</sup> Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : утв. приказом МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404 с изм. и доп. от 14 декабря 2010 г.

<sup>2</sup> ТУ 23.19.12-001-91978852-2018. Универсальный пористый материал термоизоляционный УПМ «Термоизол».

ные потери бензина в резервуарах с применением гранулированного пеностекла (размерами гранул 3...15 мм, при средней толщине слоя гранул 36 мм) сократились на 5 % (относительные на 14 %) по сравнению с потерями того же бензина на резервуарах с понтонами [15].

В данной работе рассмотрим процесс испарения углеводородных жидкостей через экранирующий слой гранулированного пеностекла (далее — СГП) марки «Термоизол» фракции 5–7 мм.

Целью исследования являлась оценка влияния экранирующего СГП на снижение параметров испарения углеводородных жидкостей. Для достижения поставленной цели решались две основные задачи: 1) построение математической модели испарения углеводородных жидкостей на основе коэффициента экранирования поверхности жидкости СГП; 2) проведение экспериментальной оценки параметров испарения углеводородных жидкостей через СГП и анализ полученных в ходе эксперимента данных.

Основным преимуществом гранулированного пеностекла перед большинством природных гравийных материалов является низкая насыпная плотность, благодаря которой часть СГП может оставаться «сухой» при всплытии объема гранул, например, в результате подъема уровня жидкости. Таким образом, образуется система: «СГП – жидкость», которую условно можно разделить на три зоны: 1) нижняя — гранулы, погруженные в жидкость; 2) средняя — гранулы, смоченные жидкостью; 3) верхняя — «сухие» гранулы, находящиеся выше границы разлива жидкости.

С увеличением общей высоты СГП растет высота «сухого» СГП, за счет этого увеличивается сопротивление потоку паров легких углеводородов и уменьшается высота зоны паров углеводородных жидкостей и, соответственно, масса паров. Схема экранирования СГП поверхности испарения углеводородных жидкостей представлена на рис. 1.

Высота смоченных жидкостью гранул одной фракции зависит от физических свойств жидкости и силы действия капиллярных сил, а высота «сухого» СГП и гранул, погруженных в жидкость, зависит от плотности жидкости, насыпной плотности гранул, пористости СГП и общей высоты СГП.

### Математическая модель снижения скорости испарения углеводородных жидкостей через «сухой» СГП

Процесс испарения углеводородной жидкости через экранирующий «сухой» СГП можно рассмотреть с позиций квантовой теории света, проведя аналогию с законом Бугера – Ламберта – Бера, который определяет ослабление света с начальной интенсивностью  $I_0$  при прохождении его через среду с показателем поглощения  $k$  и толщиной  $l$ :

$$I = I_0 \cdot \exp(-k \cdot l). \quad (1)$$

Снижение скорости испарения легковоспламеняющейся жидкости (ЛВЖ)  $v$  при прохождении пара через «сухой» СГП толщиной  $H_c$ , расположенный выше границы жидкости  $H_{ж}$  с коэффициентом экранирования  $k_c$ , представлено на рис. 2.

Для построения математической модели испарения углеводородной жидкости через «сухой» СГП в системе «СГП – жидкость» запишем граничные условия:

- пористость СГП  $m = \text{const}$ , насыпная плотность СГП  $\rho_{\text{СГП}} = \text{const}$ ;
- пористая среда корпускулярная, изотропная;
- диаметр частиц (гранул)  $d_r$  значительно меньше длины канала  $l \gg d_r$ ;
- на границе раздела СГП, погруженного в углеводородную жидкость, и «сухого» СГП выполняются условия сохранения непрерывности давления и потока массы:  $[p] = 0$ ;  $[\rho \cdot v]$ , где  $p$  — давление;  $\rho$  — плотность среды;

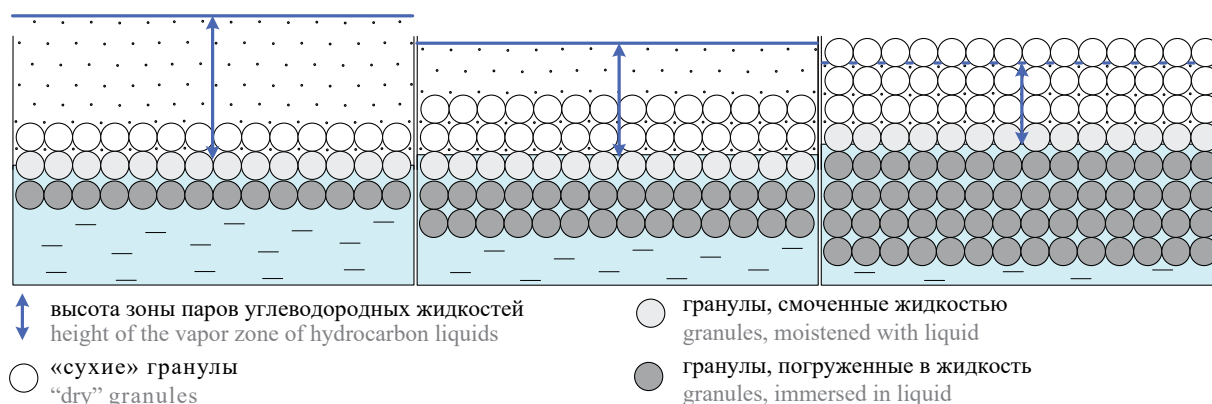
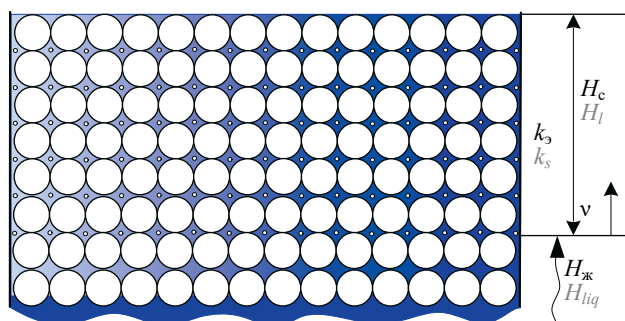


Рис. 1. Схема экранирования поверхности испарения углеводородных жидкостей СГП

Fig. 1. Shielding the surface of evaporation of hydrocarbon liquids by the layer of granulated foam glass (LGFG)



**Рис. 2.** Схема снижения скорости испарения ЛВЖ через «сухой» СГП

**Fig. 2.** Reducing the evaporation rate of highly flammable liquid using the “dry” LGFG

- граница раздела двух сред (жидкости и пара) в пористой среде является поверхностью разрыва, на которой условия сохранения потока массы и непрерывности давления:  $[\rho(m \cdot w - v)] = 0$ , где  $[p] = 0$ ; где  $w$  — скорость поверхности разрыва по нормали к ней;  $v$  — скорость потока;
- на границе СГП в жидкости и «сухого» СГП в условиях капиллярного поднятия соблюдаются условия непрерывности давления и нормальной составляющей скорости:  $[p] = 0$ ;  $[v] = 0$ ;
- скорость испарения в пристеночной области  $v_{пр}$  и на удалении к центральной оси горизонтальной проекции емкости:  $v_{пр} = v = \text{const}$ .

Изменение массовой скорости испарения жидкости зависит от длины участка канала и критерия (коэффициента) экранирования. Снижение скорости потока пара при прохождении через «сухой» СГП можно представить в виде:

$$\Delta v \sim -k_3 \cdot v \cdot \Delta l, \quad (2)$$

где  $k_3$  — коэффициент экранирования;  
 $v$  — массовая скорость испарения жидкости, г/с;  
 $\Delta l$  — длина участка канала, м.

Массовую скорость испарения жидкости, пары которой прошли через гранулированный экранирующий слой пеностекла, представим в виде  $\partial v$  в точке с координатой  $x$  и толщиной (длиной канала)  $\partial x$ :

$$\partial v = -k_3 \cdot v \cdot \partial x. \quad (3)$$

Плотность потока молекул пара можно представить в виде:

$$j = \rho \cdot v_m \cdot S, \quad (4)$$

где  $\rho$  — плотность пара, кг/м<sup>3</sup>;  
 $v_m$  — скорость движения молекул пара, м/с;  
 $S$  — площадь поверхности испарения, м<sup>2</sup>.

Интегрируя выражение (3), получим:

$$v(H_c) = v_0 \cdot \exp(-k_3 \cdot H_c), \quad (5)$$

где  $v_0$  — массовая скорость испарения жидкости без экрана СГП, г/с.

Из выражения (5) следует:

$$\ln \left( \frac{v}{v_0} \right) = -k_3 H_c, \quad (6)$$

из выражения (6) можно выразить коэффициент экранирования:

$$k_3 = \frac{1}{H_c} \cdot \ln \left( \frac{v_0}{v} \right). \quad (7)$$

### Методика экспериментальной оценки массовой скорости испарения углеводородных жидкостей через экранирующий слой гранулированного пеностекла

Основными критериями, позволяющими оценить пожарную опасность при проливе углеводородной жидкости или при испарении ее из открытых емкостей, являются: масса паров, скорость или интенсивность испарения. Для оценки эффективности экранирования СГП поверхности испарения углеводородных жидкостей применялся гравиметрический метод [18, 19], основанный на точном измерении убыли массы горючих паров.

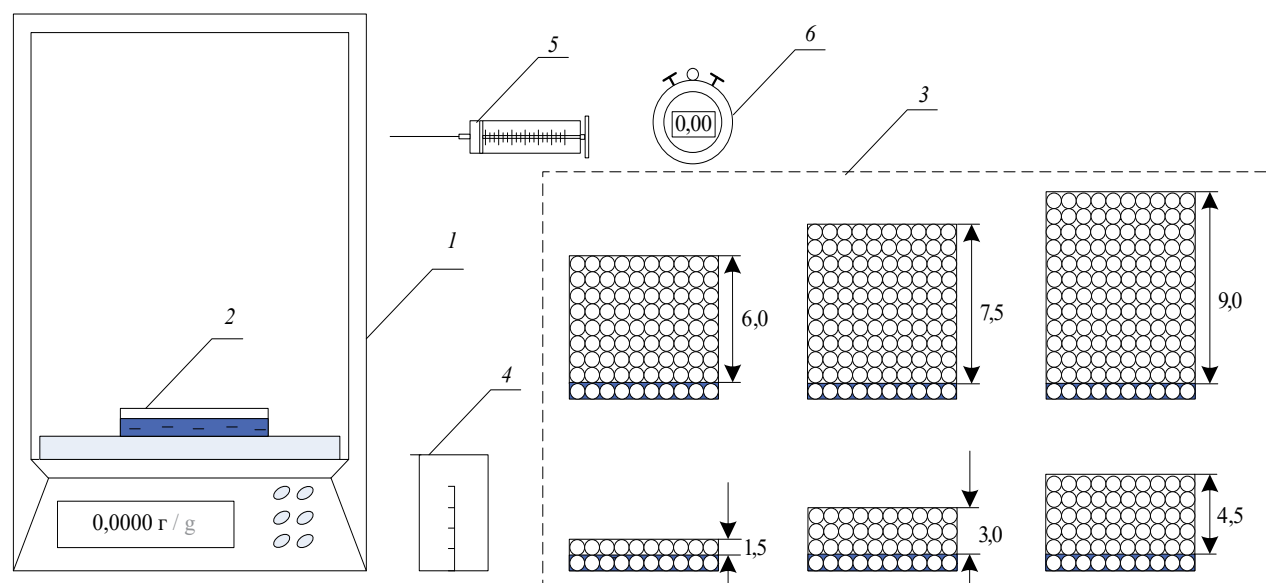
### Применяемые приборы, лабораторная посуда, горючие жидкости

Аналитические весы *GR-300* с ценой деления 0,0001 г, класс точности по ГОСТ OIML R 76-1-2011 — I, габаритные размеры 327 × 249 × 330 мм. Мерный цилиндр объемом 100 см<sup>3</sup>. Цилиндры (емкости) пропиленовые химически стойкие диаметром 115 мм, с толщиной стенки 2,0 мм. Высота стенок цилиндров соответствовала высоте гранулированных подложек с шагом 1,5 см. Гранулированное пеностекло марки «Термоизол» фракции 5–7 мм. Термоанемометр *TESTO 425* с разрешением 0,1 °C (± 0,5) и скоростью воздушного потока 0,01 м/с (± 0,03). Шприц стеклянный медицинский. Секундомер *TORRES SW-002* с точностью измерения 0,01 с. Исследования проводились на ЛВЖ различных классов: ацетон; гексан (ч); этиловый спирт (этанол); бензин АИ-92, керосин авиационный, дизельное топливо [20].

Условия проведения испытаний: температура воздуха 20,0 ± 0,1 °C; давление 99–102 кПа; относительная влажность воздуха 40–60 %.

Испытания проводились при начальной высоте «сухого» СГП  $H_c$  от 1,5 до 9 см с шагом 1,5. Подготовленные, взвешенные образцы СГП размещались в цилиндрах пропиленовых диаметром 115 мм, исследуемая жидкость наливалась через





**Рис. 3.** Схема лабораторного оборудования: 1 — электронные весы; 2 — емкость с жидкостью; 3 — емкости с СГП и жидкостью; 4 — мерный стакан; 5 — шприц; 6 — секундомер

**Fig. 3.** Diagram of laboratory equipment: 1 — electronic scales; 2 — container with liquid; 3 — containers with LGFG and liquid; 4 — measuring cup; 5 — syringe; 6 — timer

шприц в центр емкости под слой СГП до уровня 10 мм от основания емкости, затем емкость устанавливалась на аналитические весы GR-300. Показания весов снимались через каждые 60 с в течение 900 с [20].

Такие условия проведения эксперимента обусловлены тем, что на начальном этапе (в первые минуты) скорость испарения жидкостей максимальна, и при отсутствии воздушного потока возможно образование взрывоопасных концентраций над поверхностью ЛВЖ с температурой вспышки ниже температуры воздуха. Схема лабораторного оборудования для исследования процесса испарения жидкостей представлена рис. 3.

Размещение на аналитических весах емкости с углеводородной жидкостью, покрытой экранирующим СГП, представлено на рис. 4.

### Результаты эксперимента и их обсуждение

Осредненные значения массовой скорости испарения исследуемых ЛВЖ через экранирующий СГП сведены в табл. 1.

Обработка экспериментальных данных производилась с использованием методов математической статистики в соответствии с ГОСТ Р 8.736–2011. «Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений»<sup>3</sup>. Общая методическая погрешность результатов эксперимента не превышала 12 %. Графики зависимости массовой скорости испарения углеводородных



**Рис. 4.** Измерение убыли массы при испарении ацетона через СГП на аналитических весах

**Fig. 4.** Using analytical scales to measure the mass loss during acetone evaporation through the LGFG

<sup>3</sup> ГОСТ Р 8.736–2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.

жидкостей от высоты «сухого» СГП представлены на рис. 5.

Экспериментальная оценка испарения углеводородных жидкостей при экранировании поверхности испарения «сухим» СГП показала снижение скорости испарения по экспоненциальной зависимости. Динамика снижения массовой скорости испарения углеводородных жидкостей с увеличением толщины «сухого» СГП выше у более летучих углеводородных жидкостей. По убыванию скоростного показателя испарения с указанием давления насыщенных паров при температуре воздуха, равной 20 °С, исследуемые жидкости выстроились в следующий ряд: бензин АИ-92 (25,56 кПа); ацетон (24,65 кПа); гексан (16,20 кПа); этанол (5,85 кПа); керосин авиационный (4,67 кПа); дизельное топливо (1,33 кПа). Анализ полученных данных позволил построить зависимости скорости испарения углеводородных жидкостей с экраном в виде СГП от давления насыщенных паров, рис. 6.

На основе осредненных значений массовой скорости испарения углеводородных жидкостей (см. табл. 1) определялся коэффициент экранирования  $k_3$  по формуле (7), результаты расчета сведены в табл. 2.

Осредненный коэффициент экранирования  $k_3$  для группы исследуемых углеводородных жидкостей  $\sim 0,385$ . При этом стоит отметить тот факт, что полученное значение близко к значению пористости фракции «Термоизол» (5–7 мм). Наиболее точно зависимость коэффициента экранирования от высоты «сухого» СГП описывается полиномиальной регрессией, уравнения регрессии коэф-

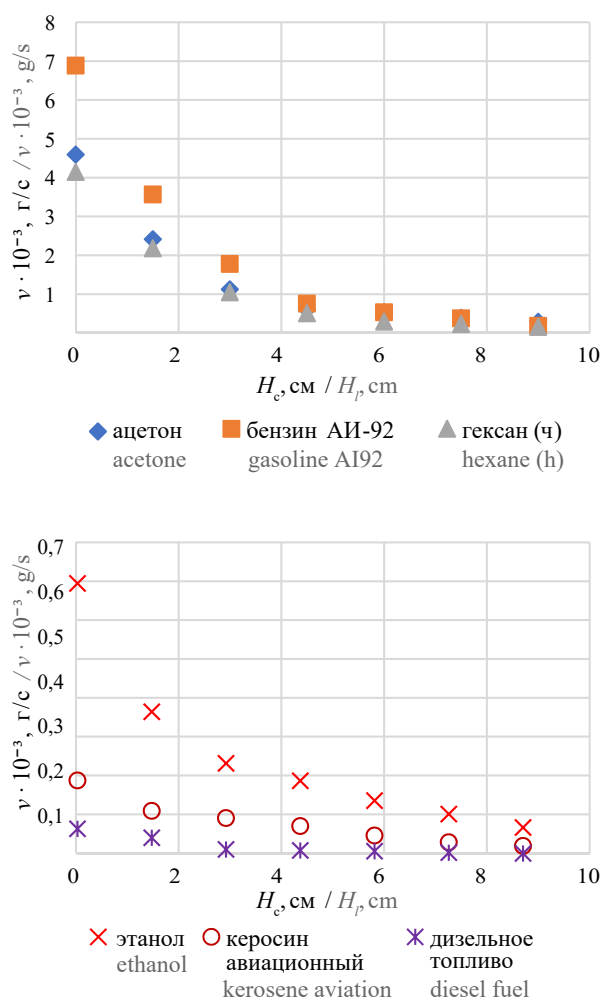


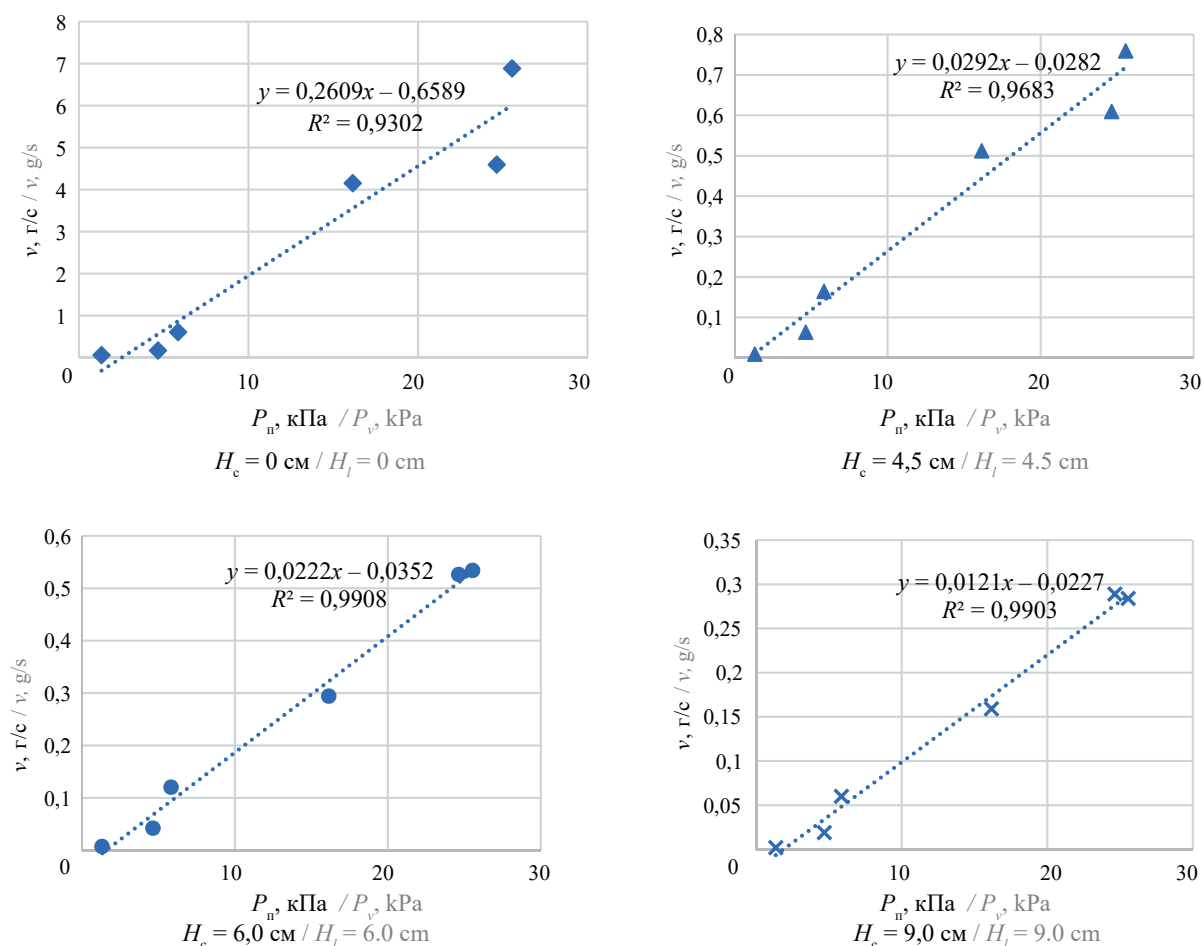
Рис. 5. Графики зависимости массовой скорости испарения углеводородных жидкостей от высоты «сухого» СГП

Fig. 5. Dependence diagrams of the mass evaporation rate of hydrocarbon liquids and the height of the “dry” LGFG

Таблица 1. Результаты осредненных значений массовой скорости испарения углеводородных жидкостей при различной высоте «сухого» СГП

Table 1. The averaged values of the mass evaporation rate of hydrocarbon liquids at different heights of the “dry” LGFG

Вещество Substance	Высота «сухого» слоя $H_c$ , см Height of “dry” layer $H_i$ , cm						
	0	1,5	3	4,5	6	7,5	9
	Средняя скорость испарения ЛВЖ $v \cdot 10^{-3}$ , г/с The average evaporation rate of flammable liquids $v \cdot 10^{-3}$ , g/c						
Ацетон Acetone	4,595	2,415	1,126	0,609	0,526	0,391	0,289
Бензин АИ-92 Gasoline AI92	6,883	3,566	1,778	0,759	0,534	0,380	0,284
Гексан Hexane	4,150	2,181	1,049	0,512	0,294	0,234	0,159
Этанол Ethanol	0,604	0,318	0,203	0,164	0,120	0,090	0,060
Керосин авиационный Aviation kerosene	0,165	0,097	0,081	0,063	0,042	0,027	0,019
Дизельное топливо Diesel fuel	0,057	0,037	0,011	0,009	0,007	0,004	0,002



**Рис. 6.** Зависимости скорости испарения углеводородных жидкостей с экраном в виде СГП от давления насыщенных паров  
**Fig. 6.** Dependences of the evaporation rate of hydrocarbon liquids, if the screen represents a LGFG, on the pressure of saturated vapours

фициентов экранирования с коэффициентом детерминации сведены в табл. 3.

Определив массовую скорость испарения жидкости без экрана СГП  $v_0$ , этот же параметр  $v$  можно найти с учетом коэффициента экранирования  $k$ , по формуле (5). При этом, зная время испарения  $\tau$ , нетрудно определить массу паров, испарившихся с поверхности жидкости через СГП  $m_n$ .

По результатам экспериментально полученной массы паров исследуемых ЛВЖ, испарившихся со свободной поверхности и при экранировании поверхности испарения СГП, определяли высоту зоны, ограничивающую область концентраций, превышающих нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР) при неподвижной воздушной среде  $Z_{\text{НКПР}}$  по формуле<sup>4</sup>:

$$Z_{\text{НКПР}} = 0,26 \left( \frac{m_n}{\rho_n C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,33}, \quad (8)$$

где  $m_n$  — масса ЛВЖ, поступившего в открытое пространство при пожароопасной ситуации, кг;  
 $C_{\text{НКПР}}$  — НКПР паров ЛВЖ, % об. [21];  
 $\rho_n$  — плотность паров ЛВЖ при расчетной температуре и атмосферном давлении, кг/м<sup>3</sup>, определяемая по формуле:

$$\rho_n = \frac{M \cdot 273}{V_0 (273 + t_p)}, \quad (9)$$

где  $M$  — молекулярная масса кг/моль;  
 $V_0$  — мольный объем, равный 22,4 м<sup>3</sup>/кмоль;  
 $t_p$  — расчетная температура, °С.

Зависимости высоты зоны  $Z_{\text{НКПР}}$  от времени испарения  $\tau$  исследуемых жидкостей со свободной поверхности и при экранировании поверхности испарения СГП различной высоты «сухого» слоя  $H_c$  представлены на рис. 7.

<sup>4</sup>ГОСТ Р 12.3.047.2012. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. М. : Стандартинформ, 2019. 62 с.

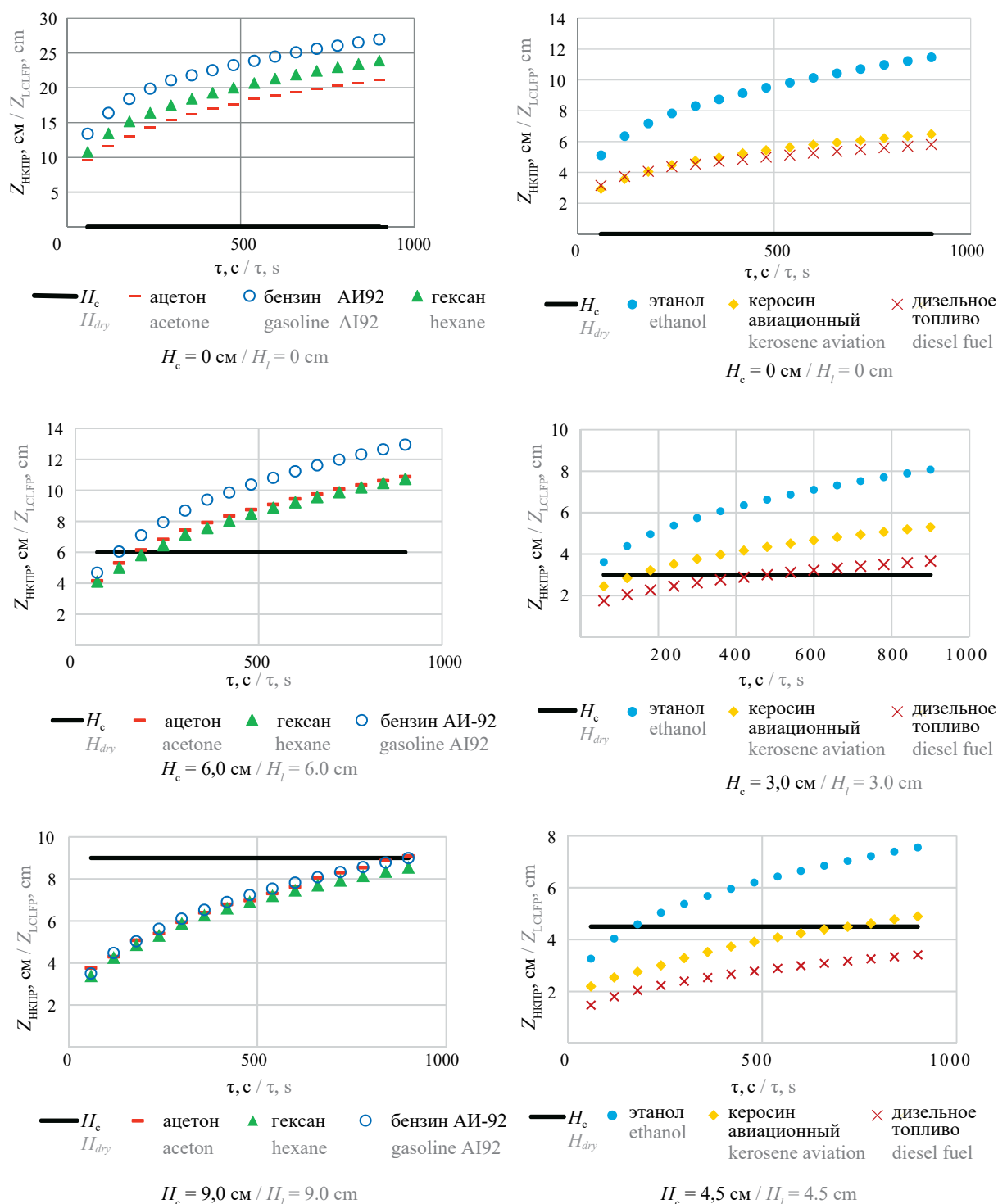
**Таблица 2.** Результаты расчета коэффициентов экранирования поверхности углеводородных жидкостей при различной высоте «сухого» СГП**Table 2.** The calculation results of screening coefficients of the surface of hydrocarbon liquids for different heights of the “dry” LGFG

Вещество Substance	Высота «сухого» слоя $H_c$ , см Height of the “dry” layer $H_l$ , cm						Средний $k'_s$ Average $k'_s$
	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0	
	Коэффициенты экранирования «сухим» СГП $k_s$ Screening coefficients using the LGFG $k_s$						
Ацетон Acetone	0,43	0,47	0,45	0,40	0,36	0,37	0,41 ± 0,02
Бензин АИ-92 Gasoline AI92	0,44	0,45	0,49	0,43	0,39	0,37	0,43 ± 0,02
Гексан Hexane	0,43	0,46	0,46	0,38	0,38	0,36	0,41 ± 0,02
Этанол Ethanol	0,43	0,36	0,29	0,27	0,25	0,26	0,31 ± 0,03
Керосин авиационный Aviation kerosene	0,60	0,45	0,35	0,27	0,32	0,31	0,38 ± 0,05
Дизельное топливо Diesel fuel	0,49	0,53	0,42	0,35	0,36	0,37	0,39 ± 0,03

**Таблица 3.** Уравнения полиномиальной регрессии коэффициентов экранирования «сухим» СГП поверхности испарения углеводородных жидкостей**Table 3.** Polynomial regression equations of screening coefficients applied to the evaporation surface of hydrocarbon liquids using the LGFG

Вещество Substance	Уравнение полиномиальной регрессии Polynomial regression equation	$R^2$
Ацетон Acetone	$k_s = -0,0017 H_c^2 + 0,0046 H_c + 0,4448$ $k_s = -0,0017 H_l^2 + 0,0046 H_l + 0,4448$	0,72
Бензин АИ-92 Gasoline AI92	$k_s = -0,0021 H_c^2 + 0,0094 H_c + 0,4338$ $k_s = -0,0021 H_l^2 + 0,0094 H_l + 0,4338$	0,70
Гексан Hexane	$k_s = -0,0037 H_c^2 + 0,0273 H_c + 0,4097$ $k_s = -0,0037 H_l^2 + 0,0273 H_l + 0,4097$	0,81
Этанол Ethanol	$k_s = -0,0045 H_c^2 + 0,0698 H_c + 0,5246$ $k_s = -0,0045 H_l^2 + 0,0698 H_l + 0,5246$	0,99
Керосин авиационный Aviation kerosene	$k_s = -0,0103 H_c^2 + 0,1446 H_c + 0,7900$ $k_s = -0,0103 H_l^2 + 0,1446 H_l + 0,7900$	0,97
Дизельное топливо Diesel fuel	$k_s = -0,0027 H_c^2 + 0,0507 H_c + 0,5949$ $k_s = -0,0027 H_l^2 + 0,0507 H_l + 0,5949$	0,74





**Рис. 7.** Графики зависимости высоты зоны  $Z_{НКПР}$  от времени испарения  $\tau$  ЛВЖ со свободной поверхности и при экранировании СГП

**Fig. 7.** Diagrams showing dependence between the height of zone  $Z_{LCLFP}$  on evaporation time  $\tau$  of flammable liquid evaporated from the free surface and if shielded using the “dry” LGFG

На графиках рис. 7 видно, что характер изменения высоты зоны  $Z_{НКПР}$  соответствует схеме экранирования поверхности испарения углеводородных жидкостей СГП, представленной на рис. 1. С увеличением толщины «сухого» СГП высота зоны паров

$Z_{НКПР}$  у исследуемых жидкостей заметно снижается. Для слаболетучих ЛВЖ (с низким значением давления насыщенных паров) динамика роста параметра  $Z_{НКПР}$  ниже и соблюдается условие  $Z_{НКПР} < H_c$  при значительно меньших  $H_c$ .

## Выводы

Проведенные исследования позволили обосновать эффективность снижения критериев пожарной опасности при испарении ряда углеводородных жидкостей в условиях экранирования поверхности испарения слоем гранулированного пеностекла марки «Термоизол». Достоверность полученных данных основывается на апробированных методах лабораторных испытаний и статистического анализа.

На основе полученных зависимостей массовой скорости испарения от давления насыщенных

паров ЛВЖ, а также предложенной математической модели снижения скорости испарения углеводородных жидкостей через «сухой» СГП можно оценивать критерии пожарной опасности при испарении углеводородных жидкостей различных классов.

Разработанная Методика экспериментальной оценки массовой скорости испарения углеводородных жидкостей через СГП может быть использована для исследования параметров испарения при экранировании различными по своему гранулометрическому составу материалами.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Данилов В.Ф., Шурыгин В.Ю. К вопросу о решении проблемы потерь нефтепродуктов от испарения // Успехи современного естествознания. 2016. № 3. С. 141–145. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=35840>
2. Цегельский В.Г., Ермаков П.Н., Спиридонов В.С. Защита атмосферы от выбросов углеводородов из резервуаров для хранения и транспортирования нефти и нефтепродуктов // Безопасность жизнедеятельности. 2001. № 3. С. 16–18.
3. Сулейманов Ф.Р., Маркова Л.М. Потери нефти и нефтепродуктов при эксплуатации резервуарных парков // Нефтегазовый терминал: вып. 8 : сб. науч.-тех. ст. Междунар. науч.-тех. конф. «Транспорт и хранение углеводородного сырья» / под. общ. ред. С.Ю. Подорожникова. Тюмень : ТюмГНГУ, 2015. С. 178–182. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25508382>
4. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М.-Л. : Гостехиздат, 1947. 244 с.
5. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М. : Недра, 1972. 288 с.
6. Bear J. Dynamics of fluids in porous media. N-Y, London, Amsterdam : American Elsevier Publ. Comp., 1972. 764 p.
7. Dullien F.A.L. Porous media fluid transport and pore structure. London : Academic Press. 1979. 396 p.
8. Firoozabadi A., Katz D.L. An analysis of high-velocity gas flow through porous media // Journal of Petroleum Technology. 1979. Vol. 31. Issue 02. Pp. 211–216. DOI: 10.2118/6827-PA
9. Handbook of porous media / Taylor & Francis Group, LLC / ed. by Kambiz Vafai. 2nd ed. CRC Press, 2005. 744 p. DOI: 10.1201/9780415876384
10. Chen Z., Huan G., Ma Y. Computational methods for multiphase flows in porous media Siam. Dallas, Texas : Southern Methodist University, 2006. 569 p.
11. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации. М. : МГУ. 2009. 87 с.
12. Kantzas A., Bryan J., Taheri S. Fundamentals of fluid flow in porous media // PERM Inc. 2016. URL: <http://perminc.com/resources/fundamentals-of-fluid-flow-in-porous-media> (дата обращения: 15.10.2021).
13. Cejas M.C., Hough L.A., Frétigny C., Dreyfus R. Effect of granular packing geometry on evaporation // Soft Matter. 2018. Vol. 14. Issue 34. Pp. 6994–7002. DOI: 10.1039/C8SM01179F URL: <https://arxiv.org/pdf/1601.04584v2.pdf> (дата обращения: 15.10.2021).
14. Ширяев Е.В. Исследование параметров подложки гранулированного пеностекла, влияющих на снижение интенсивности испарения горючих жидкостей // Современные проблемы гражданской защиты. 2019. № 4. С. 19–27. URL: <http://ntp.edufire37.ru/wp-content/uploads/2018/12/№3-2018-готово.pdf> (дата обращения: 15.10.2021).
15. Шацких Е.С., Левин С.Н., Писаревский В.М. Применение гранулированного пеностекла в качестве покрытия зеркала испарения нефтяных резервуаров // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2018. № 4. С. 17–21. DOI: 10.24411/0131-4270-2018-10403
16. Ширяев Е.В., Рубцов Д.Н., Назаров В.П., Булгаков В.В. Огнезащитный эффект гранулированной пеностеклянной подложки при углеводородном пожаре пролива // Безопасность жизнедеятельности. 2016. № 4. С. 33–37.
17. Dadashov I. Experimental investigation of using granulated foamglass for cooling the combustible liquid // Fire Safety. 2018. Issue 33. Pp. 48–52. DOI: 10.32447/20786662.33.2018.06
18. Алексеев В.Н. Количественный анализ / под ред. д-ра хим. наук П.К. Агасяна 5-е изд. М. : Альянс. 2013. 504 с.
19. Skoog D., West D.M., Holler F.J. Gravimetric analysis // Fundamentals of Analytical Chemistry. 1996. Vol. 7. Pp. 71–96.
20. Ширяев Е.В. Снижение пожарной опасности локальных проливов углеводородных жидкостей на основе применения гранулированного пеностекла : дис. ... канд. техн. наук. М., 2021. 183 с.

21. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаро-взрывоопасность веществ и материалов и сред-

ства их тушения : справочное издание. М. : Пож-наука, 2004. Т. 1–2.

## REFERENCES

1. Danilov V.F., Shirygin V.Y. To the question about ways to solve the problem of evaporation loss of oil products. *Advances in Current Natural Sciences*. 2016; 3:141-145. URL: <https://natural-sciences.ru/en/article/view?id=35840> (rus).
2. Tsegelsky V.G., Ermakov P.N., Spiridonov V.S. Protection of the atmosphere from hydrocarbon emissions from reservoirs for storage and transportation of oil and petroleum products. *Life safety*. 2001; 3:16-18. (rus).
3. Suleymanov F.R., Markova L.M. Losses of oil and petroleum products during the operation of tank farms. *Oil and Gas Terminal: Issue 8 : collection of scientific articles of the International Scientific and Technical Conference "Transportation and storage of hydrocarbon raw materials"*. S.Y. Podorozhnikov (Ed.). Tyumen, TSOGU, 2015; 178-182. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25508382> (rus).
4. Leibenzon L.S. Movement of natural liquids and gases in a porous medium. Moscow-Leningrad, Gostekhizdat Publ., 1947; 244. (rus).
5. Barenblatt G.I., Entov V.M., Ryzhik V.M. The theory of unsteady filtration of liquid and gas. Moscow, Nedra Publ., 1972; 288. (rus).
6. Bear J. Dynamics of fluids in porous media. N-Y, London, Amsterdam, American Elsevier Publ. Comp., 1972; 764.
7. Dullien F.A.L. *Porous media fluid transport and pore structure*. London, Academic Press, 1979; 396.
8. Firoozabadi A., Katz D.L. An analysis of high-velocity gas flow through porous media. *Journal of Petroleum Technology*. 1979; 31(02):211-216. DOI: 10.2118/6827-PA
9. *Handbook of porous media*. Kambiz Vafai (ed.). 2nd ed. CRC Press, 2005; 744. DOI: 10.1201/9780415876384
10. Chen Z., Huan G., Ma Y. *Computational methods for multiphase flows in porous media* Siam. Texas, Dallas, Southern Methodist University, 2006; 569.
11. Leontiev N.E. *Fundamentals of filtration theory*. Moscow, Moscow State University, 2009; 87. (rus).
12. Kantzas A., Bryan J., Taheri S. *Fundamentals of fluid flow in porous media*. PERM Inc. 2016. URL: <http://perm-inc.com/resources/fundamentals-of-fluid-flow-in-porous-media> (accessed July 15, 2022).
13. Cejas M.C., Hough L.A., Frétigny C., Dreyfus R. Effect of granular packing geometry on evaporation. *Matter*. 2018; 14(34):6994-7002. DOI: 10.1039/C8SM01179F URL: <https://arxiv.org/pdf/1601.04584v2.pdf> (accessed July 15, 2022).
14. Shiryayev E.V. Research of substrate parameters granulated foam glass influencing the evaporation of flammable liquids. *Modern Problems of Civil Protection*. 2019; 4:19-27. URL: <http://ntp.edufire37.ru/wp-content/uploads/2018/12/№3-2018-ready.pdf> (accessed 10/15/2021). (rus).
15. Shatskikh E.S., Levin S.N., Pisarevsky V.M. Application of granulated foam glass as a coating of the evaporation mirror of oil tanks. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2018; 4: 17-21. DOI: 10.24411/0131-4270-2018-10403 (rus).
16. Shiryayev E.V., Rubtsov D.N., Nazarov V.P., Bulgakov V.V. The fire retardant effect of granulated foam glass substrate with the hydrocarbon fire spills. *Life safety*. 2016; 4:33-37. (rus).
17. Dadashov I. Experimental investigation of using granulated foamglass for cooling the combustible liquid. *Fire Safety*. 2018; 48-52. DOI:10.32447/20786662.33.2018.06
18. Alekseev V.N. *Quantitative analysis*. P.K. Aghasyan (Ed.). 5th ed. Moscow, Alliance Publ., 2013; 504. (rus).
19. Skoog D., West D.M., Holler F.J. Gravimetric analysis. *Fundamentals of Analytical Chemistry*. 1996; 7:71-96.
20. Shiryayev E.V. *Reduction of fire danger of local spills of hydrocarbon liquids based on the use of granular foam glass : dis. ... candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2021; 183. (rus).
21. Korolchenko A.Ya., Korolchenko D.A. Fire and explosion hazard of substances and materials and means of extinguishing them: a reference edition. Moscow, PozhNauka Publ., 2004; 1-2. (rus).

Поступила 31.07.2022, после доработки 12.09.2022;  
принята к публикации 15.09.2022

Received July 31, 2022; Received in revised form September 12, 2022;  
Accepted September 15, 2022

**Информация об авторах**

**ШИРЯЕВ Евгений Викторович**, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры пожарной безопасности технологических процессов в составе Учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 759806; ORCID: 0000-0002-5845-7308; e-mail: shiryaev@bk.ru

**НАЗАРОВ Владимир Петрович**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов в составе Учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 764644; ORCID: 0000-0002-7164-583X; e-mail: nazarovvp@bk.ru

**Вклад авторов:**

**Ширяев Е.В.** — концепция исследования; методика проведения эксперимента; обработка экспериментальных данных; написание исходного текста; итоговые выводы.

**Назаров В.П.** — научное руководство; итоговые выводы; научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Information about the authors**

**Evgeniy V. SHIRYAEV**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department of Fire Safety of Technological Processes as part of the Educational and Scientific Complex of Fire Safety of Protection Objects, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 759806; ORCID: 0000-0002-5845-7308; e-mail: shiryaev@bk.ru

**Vladimir P. NAZAROV**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes as part of the Educational and Scientific Complex of Fire Safety of Protection Objects, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 764644; ORCID: 0000-0001-8579-4062; e-mail: nazarovvp@bk.ru

**Contribution of the authors:**

**Evgeniy V. Shiryaev** — the concept of the study; methodology for conducting the experiment; processing of experimental data; writing the original text; final conclusions.

**Vladimir P. Nazarov** — scientific guidance; final conclusions; scientific text editing.

The authors declare no conflicts of interests.