

## МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ОГNETУШАЩЕЙ ПЕНЫ В СЛОЕ НЕФТЕПРОДУКТА

Смиловенко О.О., Малашенко С.М., Абрамович А.О.

*Цель.* Прогнозирование эффективности тушения пожаров подслоинным методом в резервуарах с нефтепродуктами путем расчета времени всплытия пены для резервуаров различных объемов.

*Методы.* В исследовании использован теоретический метод математического моделирования процесса подъема огнетушащей пены в горючей жидкости, а также экспериментальный метод, заключающийся в наблюдении и измерении параметров процесса в специально созданных контролируемых условиях.

*Результаты.* Разработанная математическая модель дает возможность прогнозирования времени подъема пены путем математических вычислений с использованием коэффициента подъема пены в зависимости от плотности пены, плотности жидкости, находящейся в резервуаре, и высоты резервуара.

*Область применения исследований.* Расчет времени тушения пожара в резервуарах с нефтепродуктами позволит уменьшить вероятность распространения пожара на соседние резервуары и снизить неоправданный расход огнетушащих средств.

*Ключевые слова:* резервуар, огнетушащая пена, подслоинный метод тушения нефтепродуктов, время тушения, математическая модель.

(Поступила в редакцию 6 октября 2022 г.)

### Введение

Резервуары занимают лидирующее место по хранению нефти и нефтепродуктов и остаются наиболее пожароопасными объектами, аварии на которых приводят к значительному экономическому и экологическому ущербу.

На территории Беларуси находятся резервуары самых разнообразных конструктивных решений. Всего на территории республики более 700 резервуаров общим объемом около 1,5 млн м<sup>3</sup>. Стальные наземные резервуары емкостью до 5000 м<sup>3</sup> используются для хранения нефтепродуктов. Такие резервуары наиболее часто применяют для складских целей на территории Республики Беларусь. По нормативам СНБ 3.02.01-98<sup>1</sup> не требуется оборудовать такой тип резервуаров стационарными устройствами пожаротушения.

При возникновении пожара тушение производится подачей пены средней кратности на поверхность нефтепродукта от мобильной пожарной техники (рис. 1). Пена производится генератором пены. Однако генераторы пены не могут подавать ее на расстояние, которое бы обеспечило безопасность персонала, занятого на тушении.

Анализ ситуации, складывающейся при тушении пожаров в резервуарах штатными средствами и способами, показывает необходимость использования новых систем тушения пожаров, обладающих высокой огнетушащей эффективностью и меньшим риском для персонала, занятого в тушении. Применение пены низкой кратности позволяет использовать подслоинный способ тушения, который является наиболее безопасным для пожарного расчета [1]. Подслоинный способ тушения пожаров в резервуарах с нефтепродуктами активно внедряется в зарубежных странах, а также в России и Беларуси.

<sup>1</sup> Склады нефти и нефтепродуктов: СНБ 3.02.01-98. – Введ. 01.01.99. – Минск: Минстройархитектуры Республики Беларусь, 1998. – 55 с.



Рисунок 1. – Тушение пожаров в резервуарах от передвижной пожарной техники

Для подслоного тушения применяют пену из фторсодержащих пленкообразующих пенообразователей, что является необходимым условием для реализации данного способа тушения, т.к. такая пена меньше подвержена разрушению и насыщению парами углеводородов по сравнению с пеной, полученной на основе обычных пенообразователей. Пленка, образующаяся из фторсодержащей пены, способствует быстрой изоляции от кислорода воздуха горячей поверхности, растекаясь по ней, т.к. имеет поверхностное натяжение ниже, чем поверхностное натяжение горючего вещества, хранящегося в резервуаре.

Оснащение существующих резервуаров системой автоматического пожаротушения может быть осуществлено только в период строительства или капитального ремонта, что влечет дополнительные финансовые вложения. Однако подача пены низкой кратности подслоным способом возможна не только через пенопроводы системы пожаротушения, но и через технологические коммуникации (нефтепродуктопроводы, линии размывки донных отложений), расположенные в нижней части резервуара. Для этой цели разработано и изготовлено устройство оперативной врезки (УОВИ) для выполнения отверстий в технологических коммуникациях и последующей подачи через него огнетушащей воздушно-механической пены низкой кратности в слой горючего [2].

### Основная часть

**Эксперимент по исследованию подъема огнетушащей пены в горючей жидкости.** При подслоном тушении пожара в резервуаре время тушения можно условно разделить на два этапа. Первый этап – это подъем пены через слой жидкости, которой заполнен резервуар, а второй – растекание пены по поверхности этой жидкости и прекращение горения за счет создания изолирующего слоя, перекрывающего доступ кислорода в зону пожара. Второй этап – растекание пены по поверхности нефтепродукта – достаточно хорошо изучен и описан. Скорость растекания пены может быть определена по формулам, приведенным в трудах В.В. Шароварникова. Что касается процесса подъема пены в жидкости, то он исследован мало, хотя по продолжительности сопоставим с растеканием пены по поверхности.

Проведен эксперимент по подъему пены, для которого была разработана и собрана экспериментальная стендовая установка (рис. 2 и 3). В состав стенда входит: герметичная емкость 1 для сбора и хранения пены; эластичная трубка 2 для подвода пены от емкости для сбора под слой жидкости; эластичная трубка 3 для подачи воздуха от компрессора; резервуар 4 объемом 50 дм<sup>3</sup>, высота которого составляет 0,5 м; компрессор 5; кран 6, открывающий и перекрывающий подачу пены. Давление воздуха на выходе из компрессора составляет (0,6±0,01) МПа при производительности от 0,2 до 1,0 дм<sup>3</sup>/с.

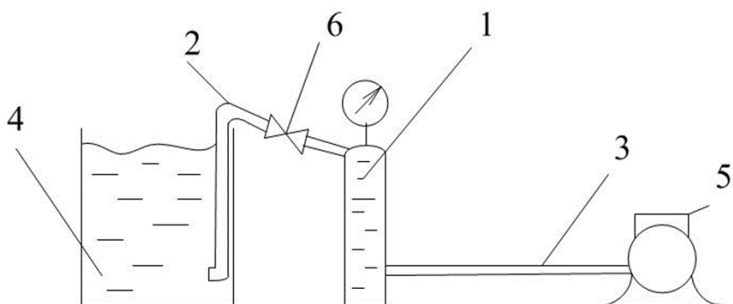


Рисунок 2. – Схема установки



Рисунок 3. – Экспериментальная установка

**Методика эксперимента.** Целью эксперимента является определение скорости подъема огнетушащей пены в жидкости и диаметра струи при ее подъеме.

Сущность эксперимента заключалась в следующем.

Раствор для получения пены был приготовлен из воды и пенкообразующего пенообразователя, в качестве которого использовали «Барьер-пенкообразующий», разработанный и произведенный в Республике Беларусь. Затем определяли кратность пены по методике, приведенной в ГОСТ Р 50588-2012<sup>2</sup>. Опыт повторяли три раза.

Раствор пенообразователя приготавливали в заданной концентрации. После чего заливали этот раствор в емкость для сбора и хранения пены. После создания перед модельным генератором рабочего давления, которое фиксировали по манометру, открывали перекрывной кран. Подготовленную емкость объемом  $10,0 \pm 0,1$  л заполняли пеной. Кратность пены – величина, равная отношению объемов пены и раствора пенообразователя (ГОСТ 4.99-83<sup>3</sup>).

Кратность пены  $K_n$  рассчитывали по формуле

$$K_n = V_n / V, \quad (1)$$

где  $V_n$  – объем пены,  $\text{дм}^3$ ;

$V$  – объем раствора пенообразователя, получившийся после оседания пены,  $\text{дм}^3$ .

Данные трех опытов приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Кратность пены при расходе  $0,4 \text{ дм}^3/\text{с}$

№	Объем раствора пенообразователя после оседания пены, $\text{дм}^3$	Кратность пены
1	0,196	5,1
2	0,135	7,4
3	0,217	4,6

Как видно из результатов эксперимента, показатели кратности пены существенно отличаются даже при одинаковых давлениях компрессора, характеристиках генератора пены и концентрациях рабочего раствора. Пена является нестабильной субстанцией, что от-

<sup>2</sup> Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования и методы испытаний: ГОСТ Р 50588-2012. – Введ. 01.09.12. – М.: Стандартинформ, 2012. – 29 с.

<sup>3</sup> Система показателей качества продукции. Пенообразователи для тушения пожаров. Номенклатура показателей: ГОСТ 4.99-83. – Введ. 30.06.84. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 11 с.

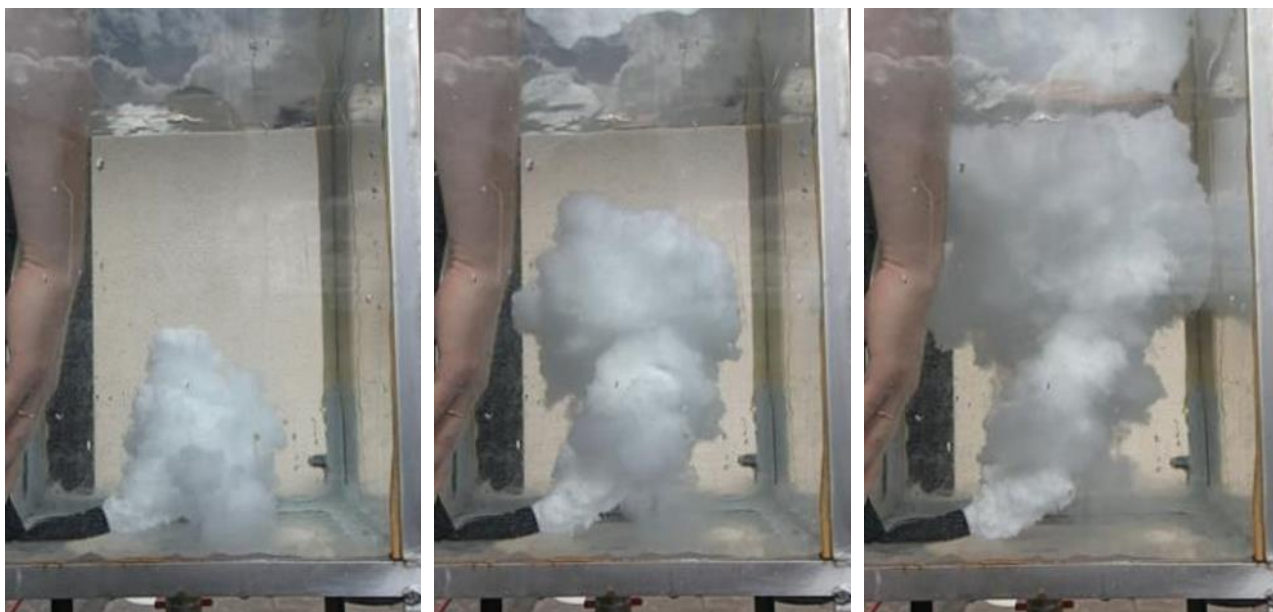
мечено и в источниках. Выявить зависимость кратности (и плотности) пены от расхода не представляется возможным. Ориентироваться в этом случае возможно только на паспортные данные оборудования.

Далее приступали к выполнению эксперимента по подъему пены в слое жидкости. Резервуар заполнили бензином, предварительно определив его плотность –  $759 \text{ кг/м}^3$ . В емкости для сбора пены создавали давление  $0,6 \text{ МПа}$ , его контролировали манометром. Открывая перекрывной кран, выпускали пену из емкости для сбора и хранения через трубопровод в резервуар, заполненный бензином. Выход пены из шланга осуществлялся в нижней части резервуара, имитируя процесс подслоного тушения. Когда пенный поток достигал поверхности жидкости, заполняющей резервуар, подачу пены прекращали, закрывая шаровой кран. Подъем пены в слое бензина регистрировали фотокамерой. Параметры эксперимента представлены в таблице 2.

**Таблица 2. – Параметры эксперимента**

Эксперимент	Расход, $\text{дм}^3/\text{с}$	Жидкость	Количество опытов
№ 1	0,4	бензин	3

На рисунке 4 представлены отдельные этапы подъема пены в резервуаре, заполненном бензином. На приведенных фотографиях границы передней стенки модельного резервуара совпадают с границами рисунка, задняя стенка резервуара – четкий прямоугольник, на фоне которого поднимается пена.



**Рисунок 4. – Этапы подъема пены в жидкости (бензине)**

Процесс подъема пены в небольшом резервуаре является кратковременным. Зарегистрировать его показатели путем прямых измерений не представляется возможным. Для определения таких характеристик, как диаметр верхнего основания поднимающегося конуса пены и скорость его подъема применен покадровый просмотр видеозаписи данного процесса. Для определения характеристик пены введены масштабные коэффициенты в ортогональных координатах, по вертикальной и горизонтальной осям. В выбранной системе координат начало отсчета выбрано в точке  $O$  (точка  $O$ , рис. 5). Таким образом, ордината совпадает с вертикальной стенкой резервуара, а абсцисса – с основанием трубопровода, т.е. шланга, из которого поступает в резервуар пена.

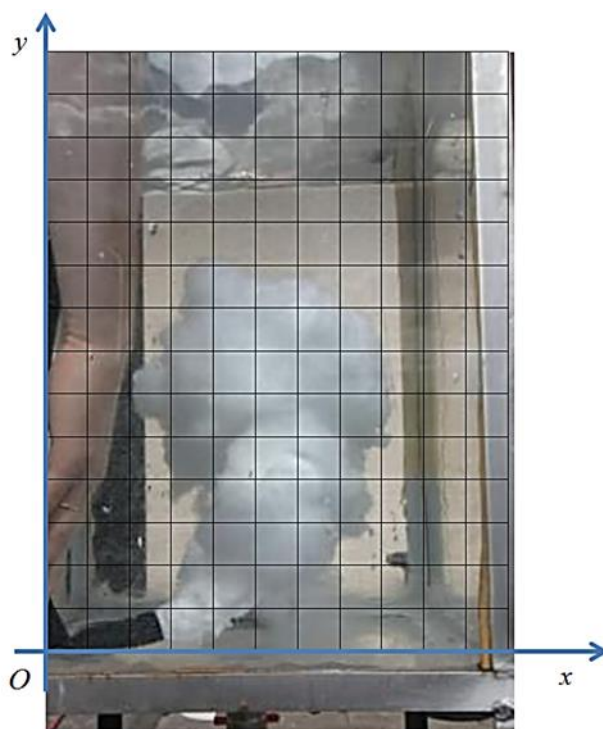


Рисунок 5. – Координатная сетка на фотографии резервуара

Чтобы получить данные по высоте подъема пены и диаметру верхней линзы пенного конуса, было найдено соотношение реальных размеров резервуара (высоты и ширины вертикальной стенки) и его графического изображения [3].

Вычислен коэффициент соответствия  $k_v$  вертикального размера резервуара  $h_p$  и размера его графического изображения по вертикали  $h_n$  по формуле

$$k_v = h_p / h_n. \quad (2)$$

Так как высота налива бензина в модельном резервуаре составляла 483 мм, вертикальный размер клетки на масштабной сетке графического изображения соответствует 37,14 мм высоты резервуара.

Вычислен коэффициент соответствия  $k_r$  горизонтального размера резервуара  $b_p$  и размера его графического изображения по горизонтали  $b_n$  по формуле

$$k_r = b_p / b_n. \quad (3)$$

Горизонтальный размер клетки на масштабной сетке графического изображения соответствует 28,18 мм ширины резервуара.

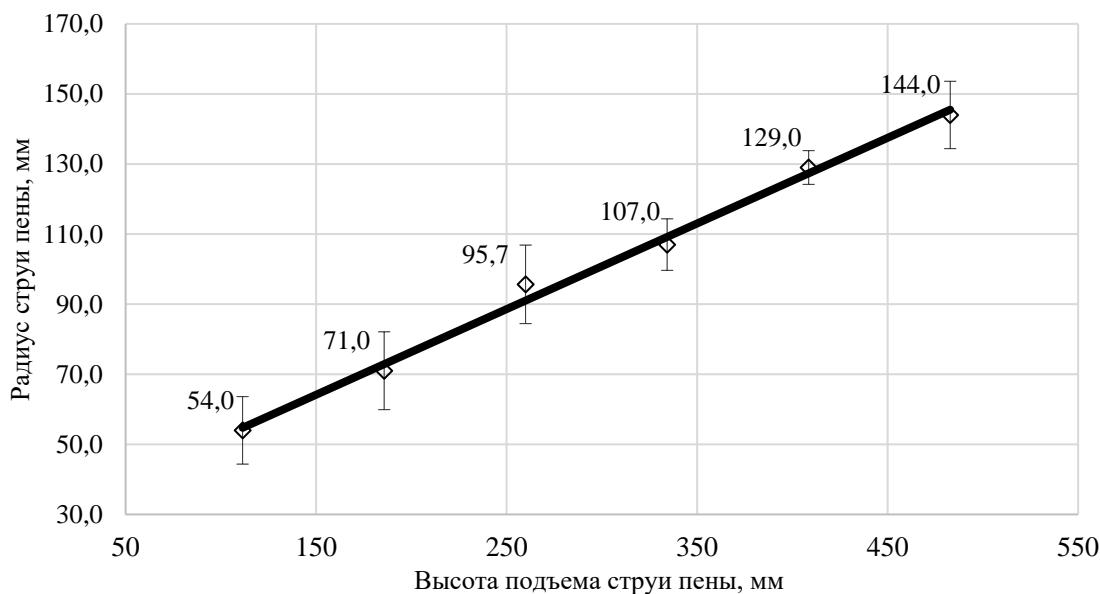
Для получения данных о диаметре конгломерата пены и скорости ее подъема проводили анализ и замеры графического изображения пены на этапах ее движения при достижении количества клеток на изображении 3; 5; 7; 9; 11; 13 и умножали соответствующее количество клеток на горизонтальный или вертикальный коэффициент.

### Результаты эксперимента

Результаты эксперимента по определению радиуса верхней линзы – основания перевернутого конуса пены в бензине с плотностью  $750 \text{ кг/м}^3$  при расходе  $0,4 \text{ дм}^3/\text{с}$  приведены (среднее по результатам трех экспериментов) в таблице 3 и на рисунке 6. Погрешность измерения высоты подъема составляет 0,1 мм. Для радиуса струи пены вычислены доверительные интервалы, полуширины которых приведены в таблице 3 (третий столбец).

Таблица 3. – Результаты эксперимента по бензину при расходе 0,4 дм<sup>3</sup>/с

Отметка высоты (количество клеток)	Высота подъема, мм	Средний радиус струи, мм
3	111,4	54 ± 10
5	185,7	71 ± 11
7	260,0	97 ± 11
9	334,3	107 ± 7
11	408,5	129 ± 5
13	482,8	144 ± 10

Рисунок 6. – Зависимость радиуса верхнего основания перевернутого конуса пены от высоты подъема в бензине при расходе 0,4 дм<sup>3</sup>/с

Анализ движения пены при проведении эксперимента по ее подъему и визуализация этого процесса позволили разделить процесс движения пены на несколько этапов. Первый этап – это горизонтальный участок движения струи пены, выходящей с соответствующей установленной величиной расхода из трубы в резервуар, заполненный жидкостью. На некотором расстоянии от выхода в резервуар скорость пены падает до нуля и происходит накопление определенного объема пены. Второй этап – образование перевернутого конуса пены и подъем его верхнего основания до выхода на поверхность.

Конечно, упомянутые этапы не имеют четко очерченных и определенных геометрических и временных границ, однако повторяемость процесса при проведении эксперимента в воде и бензине с различными расходами позволяет отметить именно эти особенности. Длина горизонтального участка увеличивалась при подаче пены с большим (0,8 дм<sup>3</sup>/с) значением расхода, что соответствует большей горизонтальной скорости струи при одинаковом сечении трубопровода.

Зависимость величины радиуса верхнего основания конуса от высоты подъема аппроксимирована как линейная по уравнению

$$R = 0,244h + 27,502, \quad (4)$$

где  $R$  – радиус верхнего основания пенного конуса;  $h$  – высоты подъема струи.

Значение «0,244» в уравнении (4) представляет собой безразмерный коэффициент пропорциональности, назовем его коэффициентом подъема пены  $K$ . Этот коэффициент получен экспериментально при определенных значениях плотностей пены и жидкости, содержащейся в резервуаре, и может быть использован для расчета времени подъема пены в резервуарах различной высоты, если плотности пены и горючей жидкости близки к экспериментальным.

### Разработка математической модели движения пены в слое нефтепродукта

Как видно из приведенных рисунков 4 и 5, верхняя часть поднимающейся пены может быть представлена в виде сферического сегмента («зонтика») и в вертикальной плоскости его движение является приблизительно установившимся. Нижняя часть конгломерата пены в виде конуса формируется постоянным подводом пены из генератора.

Согласно исследованиям Дж. Бэтчлера [4, с. 585–587] в установившемся движении жидкости скорость подъема верхней сферической поверхности пенного пузыря вычисляется по формуле

$$v(h) = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})}{\rho_{\text{ж}}} R(h)} \quad \text{или} \quad v(h) = 2\gamma\sqrt{R(h)}, \quad (5)$$

где  $R(h)$  – радиус кривизны пузыря на высоте  $h$ , м;

$\rho_{\text{ж}}$  и  $\rho_{\text{п}}$  – плотности жидкости и пены, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Отметим, что в формуле (4) величина

$$\gamma = \frac{1}{3} \sqrt{g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})/\rho_{\text{ж}}} \quad (6)$$

является постоянной для конкретных жидкости и пены.

Данные проведенных экспериментов показали, что  $R(h)$  линейно зависит от высоты подъема пузыря (рис. 6 и уравнение (4))

$$R(h) = Kh + R_0, \quad (7)$$

где  $K$  – безразмерный коэффициент пропорциональности;

$R_0$  – начальный радиус пенного пузыря.

С учетом (5) и (7) из основного соотношения  $dh = vdt$  получим обыкновенное дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными

$$dh = 2\gamma\sqrt{Kh + R_0} dt,$$

проинтегрировав которое, найдем время подъема пенного пузыря на поверхность жидкости

$$t_{\text{под}} = \frac{1}{\gamma K} \left( \sqrt{KH + R_0} - \sqrt{R_0} \right),$$

где  $H$  – высота столба жидкости, м.

В силу (6) последнее выражение принимает вид

$$t_{\text{под}} = \frac{3\sqrt{\rho_{\text{ж}}}}{K\sqrt{g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})}} \left( \sqrt{KH + R_0} - \sqrt{R_0} \right). \quad (8)$$

С учетом данных, полученных при экспериментальных исследованиях, значение коэффициента  $K$  составляет  $K = 0,244 \pm 0,031$  (надежность доверительного интервала 0,95).

**Прогнозирование времени подъема пены в резервуаре объемом 2000 м<sup>3</sup>.** На основе разработанной математической модели построены зависимости времени подъема пены от высоты жидкости в резервуаре (рис. 7) и времени подъема пены от ее плотности (рис. 8). Начальный радиус  $R_0$  при прогнозных расчетах принят равным радиусу технологического трубопровода, через который подается пена в резервуар. Следует отметить, что рассчитанное по математической модели время подъема пены в резервуаре объемом 2000 м<sup>3</sup> получено близким к экспериментальному значению, которое приведено в источнике [1].

В вышеупомянутой статье приведено время подъема пены в воде (28–33 с), которое определено в ходе натурального эксперимента на учебном резервуаре РВС-2000, расположенном на территории полигона ПАСО-1 на объектах ОАО «Нафтан» и Новополоцкой ТЭЦ, при апробации подслоного способа тушения пожаров с помощью устройства оперативной врезки. Параметры резервуара РВС-2000 по СНБ 3.02.01-98<sup>4</sup>: диаметр – 15,2 м, высота – 12 м, радиус технологического трубопровода – 75 мм.

При прогнозных расчетах плотность бензина принята в области реальных значений, т.е. 750 кг/м<sup>3</sup> (плотность бензина составляет 725–780 кг/м<sup>3</sup> по ГОСТ 32513-2013<sup>5</sup>), а плотность пены – 250 кг/м<sup>3</sup>.

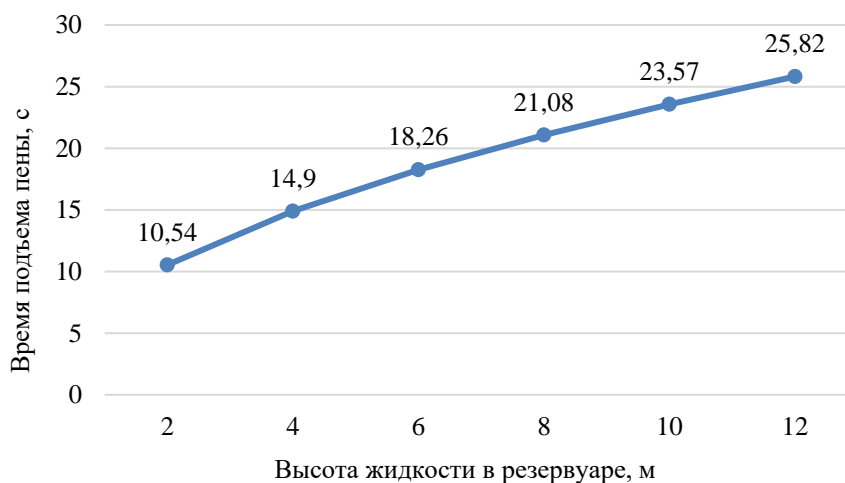


Рисунок 7. – Зависимость времени подъема пены от высоты жидкости в резервуаре

Так как имеются данные о подслоном тушении пеной с кратностью до 12, то и график зависимости времени подъема пены от ее плотности (рис. 8) охватывает такой диапазон изменения кратности. Выявлено, что время подъема пены отличается в среднем на 2 с при крайних значениях плотности огнетушащей пены. Таким образом, при прогнозировании времени тушения возможно ориентироваться на паспортные данные оборудования.

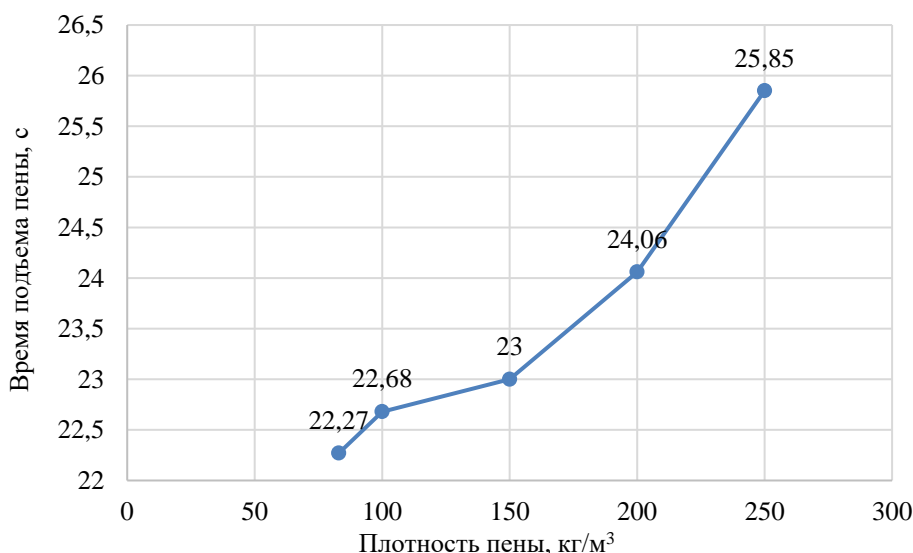


Рисунок 8 – Зависимость времени подъема пены от ее плотности

<sup>4</sup> См. сноску 1.

<sup>5</sup> Топлива моторные. Бензин неэтилированный. Технические условия: ГОСТ 32513-2013. – Введ. 01.01.15. – М.: Стандартинформ, 2019. – 15 с.



### Заключение

Анализ ситуации, складывающейся при тушении пожаров в резервуарах штатными средствами и способами, показывает необходимость использования новых систем тушения пожаров, обладающих высокой огнетушащей эффективностью и меньшим риском для персонала, занятого в тушении пожара. Альтернативным решением является подслоный способ тушения пожара, при котором низкократная пена подается по трубопроводу в нижнюю часть резервуара непосредственно в слой горючего.

Выполнены экспериментальные исследования по подъему пены в модельном резервуаре. Разработана методика проведения эксперимента и обработки данных наложением координатной сетки. Построена зависимость радиуса пенного конуса от высоты всплытия пены. Установлен коэффициент подъема пены  $K = 0,244$ , который может быть использован для расчета времени подъема пены в резервуарах различной высоты, если плотности пены и горючей жидкости близки к экспериментальным.

Разработана математическая модель движения пены при подслоном тушении резервуаров, включающая время подъема пены в резервуаре, высоту жидкости в резервуаре, плотность жидкости и плотность пены. Получена зависимость времени подъема от параметров пены и жидкости. С учетом данных, полученных при экспериментальных исследованиях, значение коэффициента  $K$  составляет  $K = 0,244$ . Подтверждена достаточно высокая степень сходимости теоретических и экспериментальных данных.

По разработанной математической модели возможно прогнозировать время подъема пены путем математических вычислений с использованием коэффициента подъема пены, выведенного по результатам эксперимента, в зависимости от плотности пены, плотности жидкости, находящейся в резервуаре, и высоты резервуара. Показано, что расчетное время подъема пены для резервуара РВС-2000 получено близким к экспериментальному, которое определено при натурном эксперименте.

Расчет времени тушения пожара в резервуарах с нефтепродуктами подслоным способом позволит снизить вероятность распространения пожара на соседние резервуары и снизить неоправданный расход огнетушащих средств.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Минкин, Д.Ю. Повышение эффективности подслоного тушения резервуаров с нефтепродуктами / Д.Ю. Минкин, С.М. Малашенко, О.О. Смиловенко // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2016. – № 1 (37). – С. 47–55. – EDN: VWPVSH.
2. Малашенко, С.М. Устройство врезки в продуктопровод для подачи воздушно-механической огнетушащей пены в горящий резервуар / С.М. Малашенко, О.О. Смиловенко, В.К. Емельянов, О.В. Черневич // Bezpieczenstwo i technika pozarnicza. – 2014. – № 34. – С. 115–123. – DOI: 10.12845/bitp.34.2.2014.11. – EDN: SGWCZB.
3. Малашенко, С.М. Экспериментальное исследование процесса подъема огнетушащей пены в горючей жидкости / С.М. Малашенко, О.О. Смиловенко, Д.С. Миканович // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2020. – № 1 (47). – С.236–244. – EDN: BVJTUT.
4. Бэтчелор, Дж. Введение в динамику жидкости / Дж. Бэтчелор; пер. с англ., под ред. Г.Ю. Степанова. – М.: Мир, 1973. – 778 с.

**Модель движения огнетушащей пены в слое нефтепродукта**  
**Model of movement of fire extinguishing foam in a layer of oil products**

**Смиловенко Ольга Олеговна**

кандидат технических наук, доцент  
Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты  
Министерства по чрезвычайным ситуациям  
Республики Беларусь», кафедра  
промышленной безопасности, профессор  
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, г. Минск, Беларусь  
e-mail: olgasmilovenko@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-1612-9573

**Olga O. Smilovenko**

PhD in Technical Sciences, Associate Professor  
State Educational Establishment «University  
of Civil Protection of the Ministry for Emergency  
Situations of the Republic of Belarus»,  
Chair of Industrial Safety, Professor  
Address: Mashinostroiteley str., 25,  
220118, Minsk, Belarus  
Email: olgasmilovenko@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-1612-9573

**Малашенко Сергей Михайлович**

Учреждение «Научно-исследовательский  
институт пожарной безопасности и проблем  
чрезвычайных ситуаций» Министерства  
по чрезвычайным ситуациям Республики  
Беларусь, отдел научно-технической  
информации и маркетинга, начальник отдела  
Адрес: ул. Солтыса, 183а,  
220046, г. Минск, Беларусь  
Email: n3889739@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-5960-2415

**Sergey M. Malashenko**

Research Institute for Fire Safety and Problems  
of Emergencies of the Ministry of Emergency  
Situations of the Republic of Belarus,  
Department of Scientific and Technical  
Information and Marketing,  
Head of Department  
Address: Soltysa str., 183a,  
220046, Minsk, Belarus  
Email: n3889739@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-5960-2415

**Абрамович Алена Олеговна**

Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты  
Министерства по чрезвычайным ситуациям  
Республики Беларусь», факультет  
техносферной безопасности, курсант  
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, г. Минск, Беларусь  
Email: olgasmilovenko@gmail.com

**Alena O. Abramovich**

State Educational Establishment «University  
of Civil Protection of the Ministry for Emergency  
Situations of the Republic of Belarus»,  
Technosphere Safety Faculty, cadet  
Address: Mashinostroiteley str., 25,  
220118, Minsk, Belarus  
Email: olgasmilovenko@gmail.com

## MODEL OF MOVEMENT OF FIRE EXTINGUISHING FOAM IN A LAYER OF OIL PRODUCTS

**Smilovenko O.O., Malashenko S.M., Abramovich A.O.**

*Purpose.* Forecasting the effectiveness of extinguishing fires by the underlayer method in tanks with oil products by calculating the time of foam lifting for tanks of various volumes.

*Methods.* The study used a theoretical method of mathematical modeling of the process of lifting fire-extinguishing foam in a combustible liquid, as well as an experimental method which consists in observing and measuring process parameters under specially created controlled conditions.

*Findings.* The developed mathematical model makes it possible to predict the foam lifting time by mathematical calculations using the foam lifting coefficient depending on the density of the foam, the density of the liquid in the tank, and the height of the tank.

*Application field of research.* The calculation of the time for extinguishing a fire in tanks with oil products will reduce the likelihood of fire spreading to neighboring tanks and reduce the unjustified consumption of fire extinguishing agents.

*Keywords:* reservoir, fire-extinguishing foam, underlayer method of extinguishing oil products, extinguishing time, mathematical model.

(The date of submitting: October 6, 2022)

### REFERENCES

1. Minkin D.Yu., Malashenko S.M., Smilovenko O.O. Povyszenie effektivnosti podsloynogo tusheniya rezervuarov s nefteproduktami [Improving the efficiency of subsurface extinguishing of tanks with oil products]. *Problems of risk management in the technosphere*, 2016. No. 1 (37). Pp. 47–55. (rus). EDN: VWPVSH.
2. Malashenko S.M., Smilovenko O.O., Emel'yanov V.K., Chernevich O.V. Ustroystvo vrezki v produktoprovod dlya podachi vozdušno-mekhanicheskoy oagnetushashchey peny v goryashchiy rezervuar [A device for cutting holes in the pipelines in order to supply a burning storage tank with air-mechanical firefighting foam]. *Bezpieczenstwo i technika pozarnicza*, 2014. No. 34. Pp. 115–123. (rus). DOI: 10.12845/bitp.34.2.2014.11. EDN: SGWCZB.
3. Malashenko S.M., Smilovenko O.O., Mikanovich D.S. Eksperimental'noe issledovanie protsessa pod"ema oagnetushashchey peny v goryuchey zhidkosti [An experimental study of the process of raising fire extinguishing foam in a combustible liquid]. *Emergency situations: prevention and elimination*, 2020. No. 1 (47). Pp. 236–244. (rus). EDN: BVJTUT.
4. Batchelor G.K. Vvedenie v dinamiku zhidkosti [An Introduction to Fluid Dynamics]: translation from English. Moscow: Mir, 1973. 778 p. (rus)