

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДСЛОЙНОГО ТУШЕНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ С НЕФТЕПРОДУКТАМИ

**Д.Ю. Минкин, доктор технических наук, профессор.  
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России.  
С.М. Малашенко.**

**Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, г. Минск.**

**О.О. Смиловенко, кандидат технических наук, доцент.  
Командно-инженерный институт Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, г. Минск**

Разработан способ подслойного тушения с использованием оперативной врезки в технологический трубопровод резервуара с нефтепродуктом для вертикальных стальных резервуаров объемом 500–5 000 т, не оборудованных стационарно смонтированными пенопроводами.

Разработана математическая модель и метод имитационного компьютерного моделирования процесса движения пены при подслойном тушении резервуаров, позволяющий исследовать данный процесс с учетом реально существующего дрейфа параметров тушения и прогнозировать время тушения.

Разработана методика выбора режимных параметров тушения. Определены значения режимных параметров тушения, обеспечивающих заданные временные показатели (критерии) тушения для резервуара емкостью 2 000 т, заполненного бензином.

*Ключевые слова:* резервуар, пожар, воздушно-механическая огнетушащая пена, подслойный способ тушения нефти и нефтепродуктов, время тушения, математическая модель

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF SUBSURFACE EXTINGUISHING OF TANKS WITH OIL PRODUCTS

**D.Yu. Minkin. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia.  
S.M. Malashenko. Research institute of fire safety and emergencies of the Ministry for emergency situations of the Republic of Belarus, Minsk.**

**O.O. Smilovenko. Command and engineering institute of the Ministry for emergency situations of the Republic of Belarus, Minsk**

The subsurface extinguishing method using the operative cut-in integrated device in the industrial pipeline tank with oil products for vertical steel tanks with a capacity of 500–5 000 tons, not equipped with fixed mounted foam wires was developed.

The mathematical model and computer simulation method of the foam motion during subsurface extinguishing of tanks, which allows to investigate this process taking into account the actually existing drift of the extinguishing parameters and to predict extinguishing time, was developed.

The method of selection of operating extinguishing parameters was developed. The values of operating extinguishing parameters, providing specified time indicators (criteria) of the extinguishing tank with a capacity of 2000 tons, filled with gasoline were defined.

*Keywords:* tank, fire, air and mechanical fire-extinguishing foam, subsurface extinguishing method of oil and oil products, extinguishing time, mathematical model

В Республике Беларусь для хранения относительно небольших количеств нефтепродуктов применяются стальные наземные резервуары емкостью до 5 000 м<sup>3</sup>. В соответствии с требованиями СНБ 3.02.01–98 [1] такие резервуары не оборудуются стационарными установками пожаротушения. Тактика тушения пожаров в этих нефтехранилищах предполагает подачу воздушно-механической пены средней кратности на поверхность горящего нефтепродукта с помощью генераторов пены, доставленных специальной автомобильной техникой (рис. 1).



Рис. 1. Тушение пожаров в резервуарах с помощью передвижной пожарной техники

Одним из наиболее перспективных, надежных и безопасных является подслоный способ тушения нефти и нефтепродуктов в резервуарах, который применяется в ряде развитых зарубежных стран и активно внедряется в России и Беларуси [2].

При тушении пожаров в резервуарах подслоным способом применяется пена низкой кратности из фторсодержащих пленкообразующих пенообразователей целевого назначения. Применение фторсодержащих пенообразователей является необходимым условием, поскольку пена на их основе инертна к воздействию углеводородов в процессе длительного подъема пены на поверхность нефтепродукта. Применение пены, получаемой на основе обычных пенообразователей для подачи в слой горючей жидкости, недопустимо, так как при прохождении через слой горючей жидкости она насыщается парами углеводородов и теряет огнетушащую способность [3].

Быстрой изоляции горячей поверхности пеной способствуют саморастекающаяся пленка раствора пенообразователя, имеющая поверхностное натяжение ниже натяжения горючей жидкости, а также конвективные потоки, которые направлены от места выхода пены к стенкам резервуара. В результате конвективного теплообмена снижается температура жидкости в прогретом слое до среднеобъемной.

Оснащение уже существующих резервуаров системой автоматического пожаротушения может быть осуществлено только в период проектирования или капитального ремонта, что влечет за собой 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 [4].

Разработано и изготовлено устройство для оперативной врезки интегрированное (УОВИ) (патент РБ на полезную модель № 8559) [5] для выполнения отверстий в технологических коммуникациях и последующей подачи огнетушащей воздушно-механической пены низкой кратности в слой горючего (рис. 2).

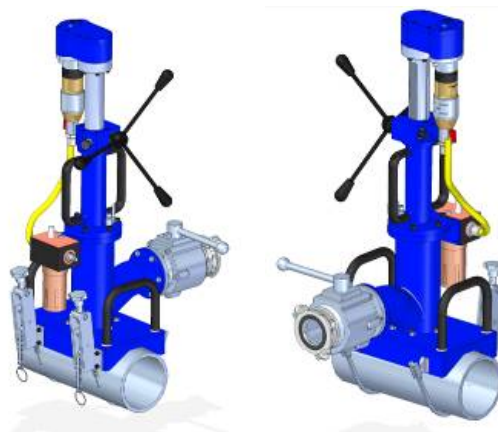


Рис. 2. Устройство оперативной врезки интегрированное

На рис. 3 приведена принципиальная схема реализации способа подачи воздушно-механической огнетушащей пены в резервуар через действующий продуктопровод с помощью УОВИ.

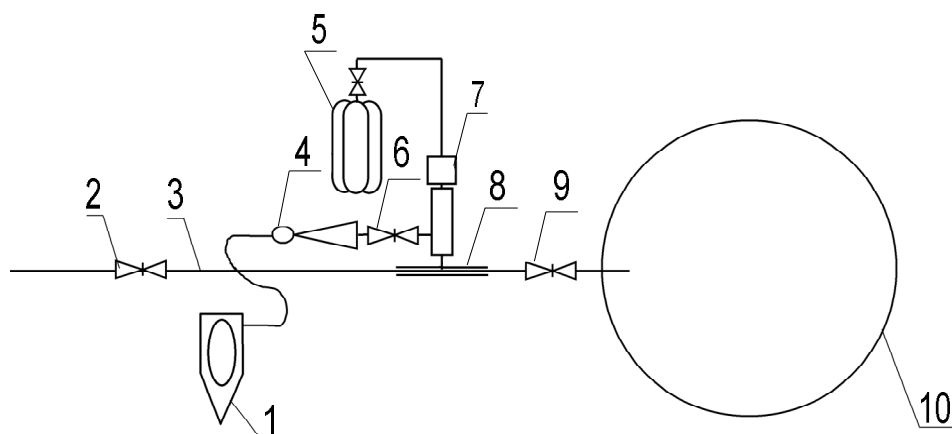


Рис. 3. Принципиальная схема реализации способа подачи воздушно-механической огнетушащей пены в резервуар через действующий продуктопровод (1 – пожарный аварийно-спасательный автомобиль; 2, 6, 9 – шаровый кран (задвижка); 3 – действующий продуктопровод; 4 – высоконапорный генератор пены; 5 – источник сжатого воздуха; 7 – устройство врезки; 8 – бандаж; 10 – резервуар)

Проверка работоспособности способа подслоного тушения с использованием оперативной врезки в технологический трубопровод резервуара с нефтепродуктом проведена на резервуаре РВС-2000, расположенном на территории полигона ПАСО-1 на объектах ОАО «Нафтан» и Новополоцкой ТЭЦ.

Участки трубопроводов и резервуар заполнялись водой. Производилось развертывание рукавных линий, выполнялась оперативная врезка в продуктопровод для дальнейшего подключения пеногенератора. В качестве огнетушащего вещества использовался 6 % раствор фторсинтетического пленкообразующего пенообразователя «Барьер-пленкообразующий».

При проведении испытаний было определено время с момента подачи огнетушащего вещества до момента появления воздушно-механической пены на поверхности зеркала резервуара, определен расход огнетушащего вещества и

произведены замеры параметров подаваемой воздушно-механической пены низкой кратности и давления на различных участках продуктопровода.

При подаче раствора пенообразователя в течение 60 с в резервуаре наблюдался процесс выхода воздушно-механической пены в резервуар (рис. 4). Отбор проб воздушно-механической пены показал, что ее кратность находится в диапазоне от 4 до 6. Это говорит

о высокой работоспособности разработанного устройства и возможности его использования для подслоного тушения пожаров нефти и нефтепродуктов в резервуарах [5].



Рис. 4. Растекание воздушно-механической пены по «зеркалу» резервуара

Расчетное время тушения при реализации технологии подслоного тушения пожара

в резервуаре с легковоспламеняющимися жидкостями (ЛВЖ) с помощью УОВИ может быть определено суммированием времени боевого развертывания системы подслоного тушения и времени от начала подачи пены до полного покрытия ею поверхности ЛВЖ.

Время боевого развертывания системы подслоного тушения зависит в основном от субъективного, человеческого фактора – слаженности действий расчета, подготовленности пожарных и исправности оборудования.

Время прохождения пены через трубопровод, резервуар и по поверхности жидкости зависит от многих факторов, часть из которых является управляемыми, а часть – независимыми. Такие параметры, как интенсивность подачи пены, скорость подачи пены, ее кратность задаются настройкой насосного оборудования, концентрацией пенообразователя и являются управляемыми.

Другие, такие как давление в резервуаре, высота наполнения, температура окружающего воздуха, направление ветра, толщина слоя подтоварной жидкости, вязкость содержимого резервуара носят случайный характер.

Следует отметить, что и независимые, и ранее упомянутые управляемые параметры не являются детерминированными, а изменяются случайным образом в определенных пределах в процессе тушения пожара.

На рис. 5 приведена структурная схема действующих факторов, причем они разделены на три группы: относящиеся к характеристикам самого резервуара и находящейся в нем жидкости; относящиеся к способу тушения, обеспечиваемые оборудованием; внешние факторы.



Рис. 5. Факторы, определяющие эффективность подслоного тушения

Модель, представленная в виде формул движения пены на трех этапах, связывает между собой параметры и критерии – такие выходные параметры системы, которые приняты за показатели эффективности. Воспользовавшись моделью можно вычислить значения критериев при различных сочетаниях параметров.

Время прохождения пены по технологическому трубопроводу до выхода в резервуар определяется скоростью ее движения, значением расхода, то есть характеристиками оборудования. Так же на это время влияет дальность врезки, которая определяет расстояние, которое пройдет пена до резервуара. Оперативная врезка должна выполняться

за обвалованием, которое обычно находится на расстоянии  $D_p/2$  ( $D_p$  – диаметр резервуара) от стенки резервуара. Однако при значительном времени свободного горения и интенсивном развитии пожара допустимо производить врезку на большем расстоянии. Тогда время прохождения пены увеличивается.

При использовании установки подслоного тушения (УОВИ) [6] пена производится генератором пены и поступает в технологический трубопровод. Время движения пены по трубопроводу:

$$t_{mp} = L / v_{mp},$$

где  $L$  – расстояние от места врезки (установки генератора пены) до резервуара;  $v_{mp}$  – скорость движения пены в трубопроводе  $v_{mp} = Q_{пены} / S_{mp}$ , которая определена как объемный расход пены ( $Q_{пены}$ ), отнесенный к площади сечения трубопровода ( $S_{mp}$ ).

Объемный расход пены может быть рассчитан:

$$Q_{пены} = Q \cdot K,$$

где  $Q$  – расход раствора (вода плюс пенообразователь);  $K$  – кратность пены.

Выражение для определения скорости всплытия пузыря пены получено в работе [7]:

$$u = \sqrt{\frac{4gD(\rho_{жс} - \rho_n)}{3\rho_{жс}C_x}},$$

где  $\rho_{жс}$  – плотность жидкости (нефтепродукта);  $D$  – диаметр пузыря пены;  $\rho_n$  – плотность пены;  $C_x$  – безразмерный коэффициент сопротивления.

Скорость движения пузыря пены изменяется в соответствии с графиком функции квадратного корня [8], то есть существенно растет на первом этапе, а затем остается практически постоянной. Поэтому, если известна установившаяся скорость пузыря, то время подъема можно с достаточной точностью определить по закону равномерного движения

$t_p = H/u$ , где  $H$  – высота наполнения резервуара нефтепродуктом.

Время растекания пены по поверхности горения определим из следующего выражения [2]:

$$t_n = \frac{\rho_n h_n}{(1 + c \cdot a \cdot \mathcal{G}_n)(J - J_{кр})},$$

где  $h_n$  – толщина слоя пены на поверхности, при котором горение прекращается;  $c$ ,  $a$  – коэффициенты, характеризующие содержание спирта в нефтепродукте и его влияние на разрушение пены;  $\mathcal{G}_n$  – скорость движения пены по поверхности нефтепродукта

в радиальном направлении;  $J$  – удельная интенсивность подачи пены, которая определяется как отношение расхода огнетушащего средства  $Q$  к площади горения (площадь поверхности нефтепродукта)  $S$ ;  $J = Q/S$ ;  $J_{кр}$  – критическая интенсивность подачи пены.

Таким образом, суммируя время движения огнетушащей пены на всех трех этапах – движение по трубопроводу ( $t_T$ ) от места врезки до резервуара, подъем в резервуаре ( $t_p$ ) и растекание по поверхности ( $t_n$ ) нефтепродукта – получим полное время тушения  $t = t_T + t_p + t_n$ .

При выполнении расчетов системы на базе детерминированных моделей реально существующее явление разброса параметров не принимается во внимание. Это приводит к несоответствию расчетных и фактических показателей эффективности системы. Более корректно решать такие задачи позволяют вероятностные методы расчета, и для их использования необходимо охарактеризовать разброс параметров [3, 4]. Итак, параметры системы  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  представляют собой независимые случайные величины, каждая

из которых изменяется в своем диапазоне  $\alpha_{iH} < \alpha_i < \alpha_{iB}$ ,  $i=1, n$ ; где  $\alpha_{iH}$  – нижняя граница дрейфа параметра  $\alpha_i$ ;  $\alpha_{iB}$  – верхняя граница дрейфа параметра  $\alpha_i$ .

Множество  $D = \alpha_1 \times \alpha_2 \times \dots \times \alpha_n$  представляет собой  $n$ -мерную априорно допустимую область, которая ограничена  $n$ -мерным параллелепипедом, ребрами которого являются диапазоны изменений параметров системы  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ . Таким образом, разбросы значений определяют множество значений параметров, обеспечивающих физическую возможность функционирования системы. Множество  $D$  будем называть пространством параметров. Каждой точке этой ограниченной  $n$ -мерной области соответствует конкретное

сочетание значений параметров системы, то есть каждая точка характеризует мгновенное состояние системы в момент времени  $t_{\text{мгн}}$ .

Если имеется модель функционирования системы, которая задана в виде какого-либо математического выражения, и она связывает между собой параметры и критерии, то есть такие выходные параметры системы, которые приняты за показатели эффективности, то, воспользовавшись моделью, можно вычислить значения критериев и судить о функционировании системы при различных сочетаниях параметров.

На основе анализа факторов, влияющих на процесс подслоного тушения, определены границы дрейфа параметров и сформировано пространство параметров.

Для параметров, которые входят в модель, определены границы возможных изменений (табл.).

Таблица. Границы изменений параметров

Параметр	Обозначение, единицы	Границы изменений
Плотность пены	$\rho_f$ , кг/м <sup>3</sup>	0,2...0,5
Толщина слоя пены	$h$ , м	0,03...0,08
Коэффициент разрушения пены	$a$	0,03...0,049
Расход раствора	$Q$ , л/с	12,0...22,0
Скорость растекания	$V_p$ , мм/с	100...200
Плотность нефтепродукта	$\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup>	0,76...0,82
Гидравлическое сопротивление	$C_x$	1,2...1,5
Диаметр пузыря	$D$ , мм	100...400
Высота нефтепродукта	$H$ , м	11,0...11,5

Исследовался процесс движения пены в резервуаре на 2 000 т с установленными размерами. Моделирование процесса движения пены проведено в девятимерном пространстве параметров. Получены ряды значений для каждого критерия:

- время движения пены в трубопроводе – от 0,57 до 3,0 с;
- время подъема пены в резервуаре – от 6,3 до 21,0 с;
- время растекания пены по поверхности – от 9,9 до 259,0 с;
- суммарное время движения пены – от 16,8 до 283,0 с.

Для частных критериев «Время подъема пены» (рис. 6 а) и «Время растекания пены» (рис. 6 б) построены гистограммы распределений.

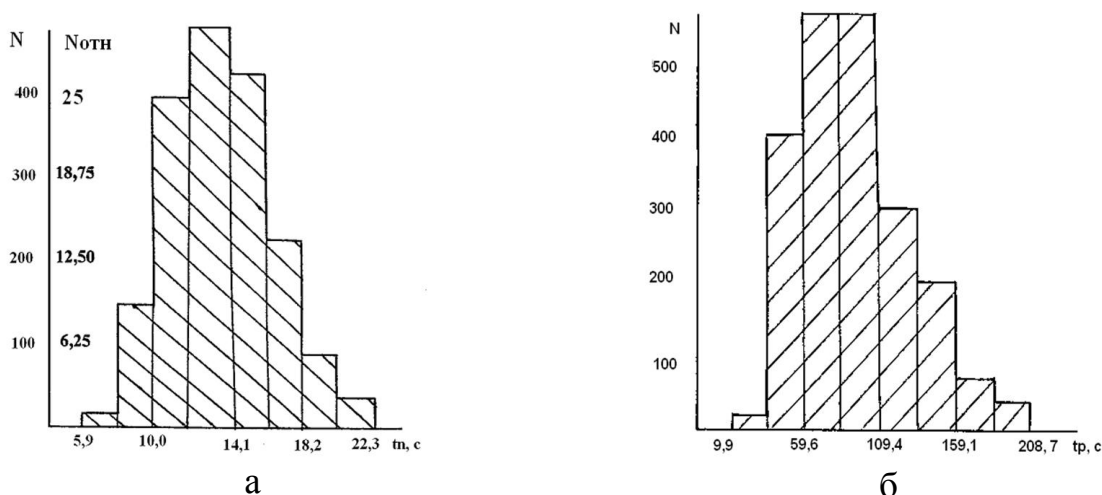


Рис. 6. Гистограммы распределений

Следует отметить, что в наиболее вероятные области гистограмм попадают и значения критериев, полученные при натурном эксперименте.

Поставлена задача минимизации времени прохождения на всех трех участках движения пены. Исходя из полученных при моделировании значений критериев, на них наложены ограничения:

- время движения пены в трубопроводе – до 1 с;
- время подъема пены в резервуаре – до 10 с;
- время растекания пены по поверхности – до 35 с.

Решена обратная задача – выбраны такие значения параметров, при которых будут выполнены требования ко всем критериям одновременно с вероятностью 100 %.

При моделировании в ограниченном пространстве критериев установлено, что необходимо поддерживать значения управляемых параметров следующими:

- плотность пены – 237,8 кг/м<sup>3</sup>, то есть кратность 4,2 (допустимый разброс 3,7...4,6);
- расход пены 20,18 л/с (допустимый разброс 18,5...21,3 л/с);
- оптимальная толщина слоя пены на поверхности нефтепродукта для тушения 54 мм (допустимый разброс 41...62 мм).

Данные значения параметров обеспечивают минимальное время тушения с вероятностью 99,9 % при учете разброса остальных параметров. На рис. 7 приведена зависимость времени (в средних значениях) подъема пены в резервуаре от плотности и расхода огнетушащего средства.

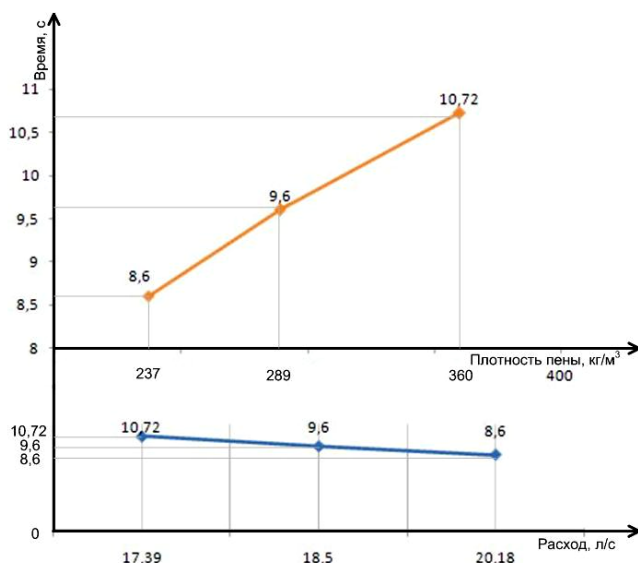


Рис. 7. Зависимость времени подъема от плотности и расхода

Таким образом, используя приведенную математическую модель движения пены при подслоном тушении резервуаров и процедуру имитационного моделирования возможно прогнозировать время тушения при определенных параметрах пожарного аварийно-спасательного оборудования, свойствах нефтепродукта и характеристиках резервуара

с учетом внешних условий. Также разработанный подход дает возможность выбора параметров процесса для получения минимального времени тушения на всех этапах движения огнетушащей пены.

Применение разработанного способа подслоного тушения с использованием оперативной врезки в технологический трубопровод и метода имитационного компьютерного моделирования процесса движения пены позволит повысить



эффективность тушения пожаров в резервуарах, не оборудованных стационарно смонтированными пенопроводами.

### **Литература**

1. СНБ 3.02.01–98. Склады нефти и нефтепродуктов: Минск: Минстройархитектура, 1998.
2. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов / А.Ф. Шароварников [и др.]. М.: Изд-во «Пожнаука», 2005. 448 с.
3. Шароварников А.Ф. Тушение пожаров нефтепродуктов в резервуарах подачей пены в слой горючего // Транспорт и хранение нефтепродуктов: сб. статей. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1996. Вып. 8–9. С. 5–10.
4. Разработать тактику тушения подслоиным способом нефти и нефтепродуктов в резервуарах, не оборудованных стационарной системой пожаротушения: отчет о НИР (заключ.) // НИИ ПБ и ЧС МЧС Беларуси; рук. О.В. Черневич. Минск, 2010. 53 с. № ГР 20090141.
5. Устройство оперативной врезки интегрированное: полезная модель 8559 Республика Беларусь: МПК 7 А 62С 31/00 / В.К. Емельянов, В.М. Карач, О.В. Черневич, О.Д. Навроцкий, С.М. Малашенко; опубл.: 23.11.11.
6. Устройство врезки в продуктопровод для подачи воздушно-механической огнетушащей пены в горящий резервуар / С.М. Малашенко [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. 2012. № 2 (32). С. 148–156.
7. Экспериментальное исследование нестационарных режимов всплытия одиночного пузырька / В.А. Архипов [и др.] // ИФЖ. 2013. Т. 86. № 5. С. 1097–1106.
8. Малашенко С.М., Смиловенко О.О. Математическая модель движения пены при подслоином тушении нефтепродуктов // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. тр. XII Междунар. науч.-техн. конф. Курск, 2015. С. 27–31.