

**С.С. Воевода, С.А. Макаров, В.П. Молчанов, Б.Ж. Битыев,
Д.Л. Бастриков, М.А. Крутов**
(Академия Государственной противопожарной службы МЧС России;
e-mail: dlbastrikov@mail.ru)

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ПОДСЛОЙНОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВСКИПАНИЯ И ВЫБРОСА НЕФТЕПРОДУКТА В РЕЗЕРВУАРАХ С ПОНТОНОМ И ПЛАВАЮЩЕЙ КРЫШЕЙ

Обоснована необходимость применения системы подслоного пожаротушения для предотвращения вскипания и выброса нефтепродукта в резервуарах.

Ключевые слова: пенообразователь, пленкообразующая пена, контактное разрушение, топливо.

**S.S. Voevoda, S.A. Makarov, V.P. Molchanov, B.G. Bituev,
D.L. Bastrikov, M.A. Krutov**

SUBSURFACE FIRE EXTINGUISHING IMPLEMENTATION FOR PREVENTION OF OIL PRODUCTS BOILING AND BLOWOUTS IN RESERVOIRS WITH INTERNAL FLOATING ROOF AND FLOATING ROOF

The necessity of subsurface fire extinguishing system implementation for prevention of oil products boiling and blowouts in reservoirs.

Key word: foam former, film-forming foam, contact destruction, fuel.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 4 марта 2011 г.

Пожар в вертикальном металлическом резервуаре, как правило, начинается с хлопка и взрыва паровоздушной смеси, в этом случае понтон оказывается частично затопленным нефтепродуктом. **Система пожаротушения подачи пены сверху** состоит из генераторов пены средней кратности, камер низкократной пены либо пеносливов, нацеленных на кольцевой зазор.

Данная система не способна потушить пожар, поскольку при хлопке выходят из строя пеногенераторы или пеногенерирующая аппаратура рассчитана на тушение пожара нефтепродукта на глубине 1,5-2 м от стенки резервуара. В этой ситуации наиболее эффективной является **система "подслоной" подачи низкократной пены**.

Наиболее простым в реализации является комбинированное применение в обеих системах низкократной пленкообразующей пены.

Технология подслоного тушения пожаров, в которой низкократная пена подается в основание резервуара, защищена от разрушений, которые обычно происходят с традиционной системой пожаротушения, установленной сверху.

В случае неэффективного тушения пожара в резервуаре в течение продолжительного времени может произойти вскипание и выброс нефтепродукта.

Явления вскипания и выброса нефтепродуктов из резервуаров при горении ведут к катастрофическим последствиям в результате последующего разрушения резервуаров и растекания горючего на большую площадь. Физическая природа этих явлений связана с перегревом и быстрым испарением воды, которая содержится в сырой нефти либо попадает в нефтепродукт при продолжительном тушении пожара.

Прогноз периода времени, в течение которого гомотермический слой (ГТС) достигает уровня подтоварной воды или воды, введенной в резервуар в процессе тушения пожара, базируется на анализе тепловых потерь от ГТС в окружающую среду через боковую поверхность резервуара [2].

Из опыта проведения экспериментов известна начальная скорость прогревания нефтепродуктов в процессе горения, а также скорость их выгорания. Размер резервуара, уровень горючего и подтоварной воды, как правило, известны уже в начале пожара.

Для прогноза необходимо определиться с долей поверхности резервуара, охлаждаемой водой.

Вывод расчётного соотношения зависимости толщины ГТС от времени горения предусматривает анализ тепловых потоков, поступающих от пламени q , расходуемых на испарение Q_s , и потерь тепла в окружающую среду, которые пропорциональны толщине ГТС – h . Запишем исходное соотношение

$$q = m \cdot Q_s + V_n \cdot F_o \cdot \rho \cdot c \cdot (T_n - T_o) + d_1 \cdot F_o \cdot (T_n - T_o) + \alpha_2 \cdot F_o \cdot (T_n - T_o), \quad (1)$$

где q – поток тепла от факела пламени к поверхности жидкости в резервуаре, Дж·с⁻¹;

m – массовая скорость испарения ГЖ, кг·с⁻¹;

$$m = V_n \cdot F_o;$$

Q_n – удельная теплота испарения, Дж·кг⁻¹;

V_n – скорость прогрева жидкости, м·с⁻¹;

V_m – удельная скорость выгорания, кг·м⁻²·с⁻¹;

F_o – поверхность ГЖ в резервуаре, м²;

T_n, T_o – температура поверхности ГЖ при горении и начальная температура ГЖ, равная температуре окружающей среды, К;

ρ – плотность ГЖ, кг·м⁻³;

C – теплоёмкость ГЖ, Дж·кг⁻¹·К⁻¹;

α_1, α_2 – коэффициенты теплопередачи через стенку резервуара и от гомотермического слоя вглубь ГЖ, Дж·м⁻²·с⁻¹·К⁻¹;

$$F_o = 2\pi \cdot R \cdot h;$$

F_o – боковая поверхность ГТС, м²;

R – радиус резервуара, м.

Величина V_n – переменная, выразим её в явном виде

$$V_n = dh/d\tau,$$

где h – толщина гомотермического слоя, м.

В уравнении (1) перенесем постоянные во времени члены в левую часть уравнения, обозначим $\Delta T = T_n - T_0$:

$$q - V_m \cdot F_0 Q_n - \alpha_2 \cdot F_0 (T_n - T_0) = F_0 \rho c \cdot \Delta T \cdot \frac{dh}{d\tau} + 2\pi R \alpha_1 \cdot \Delta T \cdot h. \quad (1a)$$

Обозначим левую часть через q , получим исходное дифференциальное уравнение, описывающее зависимость h от τ :

$$F_0 \rho c \cdot \Delta T \cdot \frac{dh}{d\tau} = q - 2\pi R \alpha_1 \cdot \Delta T \cdot h; \quad (2)$$

$$a \cdot \frac{dh}{d\tau} = q - \epsilon \cdot h, \quad (2a)$$

где $a = \rho F_0 c \Delta T$;
 $\epsilon = 2\pi R \alpha_1 \Delta T$.

Решением уравнения при начальных условиях $\tau = 0$, $h = 0$ является соотношение

$$\tau = \frac{a}{\epsilon} \cdot \ln \frac{q}{q - \epsilon h}. \quad (3)$$

Введем обозначение:

$$\tau_0 = \frac{a}{\epsilon} = \frac{\rho c R}{2 \alpha_1}. \quad (3a)$$

Выразим h из уравнения (3)

$$h = \frac{q}{\epsilon} (1 - e^{-\tau \cdot \frac{\epsilon}{a}}) \quad (4)$$

при $\tau \rightarrow \infty$ $h = h_m = \frac{a}{\epsilon}$ – это максимальное значение h .

Найдем производную $dh/d\tau$:

$$-\left(\frac{dh}{d\tau}\right) \equiv V_n \equiv \frac{q}{a} \cdot e^{-\tau \cdot \frac{\epsilon}{a}}. \quad (5)$$

Очевидно, при $\tau \rightarrow 0$

$$(V_n)_{\tau \rightarrow 0} = V_0 \equiv \frac{q}{a}, \quad (6)$$

где V_0 – начальная скорость прогрева жидкости, $m \cdot c^{-1}$.

Из соотношения (6) получим формулу для расчёта величины q :

$$q = a \cdot V_0. \quad (7)$$

В формуле (3) дробь под логарифмом разделим на b , предварительно заменив q на $a \cdot V_0$, получим:

$$\tau = \tau_0 \cdot \ln \frac{\tau_0 V_0}{\tau_0 V_0 - h} = \tau_0 \cdot \ln \frac{h_m}{h_m - h}, \quad (8)$$

где $h_m = \tau_0 \cdot V_0 \equiv V_0 \cdot \frac{a}{\epsilon} \equiv \frac{q}{\epsilon}$. (9)

Аналогично упростим формулу (4):

$$h = h_m (1 - e^{-\tau \cdot \frac{\epsilon}{a}}). \quad (10)$$

Формулы (8) и (10) описывают динамику изменения толщины ГТС и могут быть использованы для прогнозирования времени выброса нефтепродукта при длительном пожаре. Применимость соотношения (8) ограничивается условием $h_m \gg h$, то есть максимально возможная толщина ГТС должна быть существенно больше толщины слоя горючего в резервуаре.

Численные значения коэффициента теплоотдачи на границе "резервуар-воздух" α_1 можно определить из критериального соотношения для свободной турбулизованной конвекции воздуха около нагретой стенки [3]:

$$Nu = 0,1 (Gr \cdot Pr)^{1/3}, \quad (11)$$

где $Pr = 0,75$,

$$\text{откуда} \quad 1 = 0,09 \lambda \left(\frac{\beta}{\nu} \right)^{1/3}, \quad (12)$$

где $\lambda = 3,9 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;
 $\nu = 40 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$;
 $g = 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$;
 $\alpha_1 = 10 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$.

При охлаждении поверхности резервуара водой величина коэффициента теплоотдачи α может быть найдена по соотношению:

$$Nu_2 = 0,25 Ar^{1/3}, \quad (13)$$

которое учитывает режим плёночного испарения воды при контакте с нагретой поверхностью резервуара

$$\alpha = 0,25 g^{1/3} \cdot \frac{\lambda_n}{\nu_n}. \quad (14)$$

где $\lambda_n = 3,2 \cdot 10^{-2} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;
 $\nu_n = 23 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$;
 $\alpha_2 = 730 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$.

Если охлаждение ведётся с небольшим расходом воды, то среднее значение α может быть уменьшено пропорционально орошаемой поверхности, например, если орошение только половина боковой поверхности, то среднее значение α

$$\alpha = (10+730)/2 = 370 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{с}. \quad (15)$$

При интенсивном охлаждении водой скорость формирования гомотермического слоя резко снижается с ростом его толщины. Максимальная толщина гомотермического слоя определяется соотношением теплопотерь, которые увеличиваются по мере прогревания жидкости, и тепловым потоком от факела пламени к поверхности горения.

Если максимальная толщина гомотермического слоя меньше расстояния от поверхности до водного слоя, расположенного на дне резервуара, то время, через которое гомотермический слой достигает воды, будет определяться не только скоростью прогревания, но и скоростью выгорания.

Выведем расчётное соотношение для случая, когда максимальная толщина гомотермического слоя меньше, чем слой горючей жидкости, то есть $h_m < H$ (расчёт h_m ведётся по формуле (7)).

В общем случае координата основания гомотермического слоя будет определяться как прогреванием ГЖ, так и понижением уровня жидкости в результате её выгорания.

Если за точку отсчёта взять положение уровня жидкости до горения, то координату низшего основания ГТС можно определить по соотношению

$$z = V_1 \tau + V_h \tau, \quad (16)$$

где V_1 – линейная скорость выгорания, $m \cdot c^{-1}$.

Выразим V_n в явном виде:

$$z = \tau \cdot V_1 + \frac{q}{b} \left(1 + e^{-\frac{\tau a}{\epsilon}} \right). \quad (17)$$

Если $Z \gg h_m$, то величиной $e^{-\frac{\tau a}{\epsilon}}$ можно пренебречь, в сравнении с единицей, так как τ велико, поэтому можно записать:

$$z = V_1 \tau + \frac{q}{\epsilon} \equiv H, \quad (18)$$

откуда, учитывая, что $q = a V_0$, и значения a и ϵ , получим:

$$\tau = \frac{H}{V_1} - \frac{\rho c R V_0}{2a V_1} = \frac{H - \tau_0 \cdot V_0}{V_1}. \quad (19)$$

Итак, по формуле (19) определяется время до выброса ГЖ, если $h_m \ll H$.

Для определения времени наступления выброса нефтепродукта используются два соотношения

$$\tau = \tau_0 \ln \frac{\tau_0 V_0}{\tau_0 V_0 - H}, \quad (20)$$

где

$$\tau_0 = \rho c R / 2\alpha. \quad (21)$$

Эта формула применима при условии $h_m \gg H$ или $\tau_0 V_0 \gg H$ ($\tau_0 V_0 = h_m$).

При $h_m \ll H$

$$\tau = \frac{H - h_m}{V_1}. \quad (22)$$

Если $h_m \gg H$, то расчёт времени производится по формуле (17) методом последовательных приближений.

Для определения толщины ГТС к заданному моменту времени используются также два варианта формул:

при $h_m \gg H$

$$h_{\text{ГТС}} = \tau_0 V_0 (1 - e^{-\tau/\tau_0}); \quad (23)$$

при $h_m \ll H$ координата основания ГТС составит

$$Z = V_1 \tau + V_0 \tau_0. \quad (24)$$

Соответственно, расстояние до водного слоя в основании резервуара к заданному моменту времени (при $h_m \ll H$):

$$\delta = H - z = H - (V_1 \tau + V_0 \tau_0). \quad (25)$$

Сопоставим результаты теоретического прогноза с экспериментом. При горении бензина ($\rho = 700 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $c = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$) в резервуаре диаметром 26 м в условиях свободного горения и при охлаждении стенок резервуара во-

дой, если уровень горючего в резервуаре составляет $H = 9,5 \text{ м}$, толщина слоя воды под горючей жидкостью $0,5 \text{ м}$, скорость выгорания бензина $V_1 = 6,0 \cdot 10^{-5} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, скорость прогревания в начальный момент времени $V_0 = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Коэффициент теплоотдачи в условиях свободного горения $\alpha_1 = 10 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $\alpha_2 = 730 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

Для определения времени до наступления момента выброса в условиях свободного горения воспользуемся формулой (20):

$$\tau = \tau_0 \ln \frac{\tau_0 V_0}{\tau_0 V_0 - H}.$$

Но прежде покажем, что $h_M \gg H$. Рассчитаем величину $h_M = \tau_0 V_0$:

$$\tau_0 = \rho c R / 2 \alpha_1; \quad \tau_0 = 700 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 13 / 2 \cdot 10 = 0,91 \cdot 10^6 \text{ с};$$

$$h_M = \tau_0 V_0 = 0,91 \cdot 10^6 \cdot 1,8 \cdot 10^{-4} = 163 \text{ м, то есть}$$

$$\tau = 0,91 \cdot 10^6 \ln \frac{163}{163 - 12} = 0,91 \cdot 10^6 \cdot 0,06 = 16 \text{ ч.}$$

Определим время до момента выброса нефтепродукта при пожаре, охлаждаемого водой резервуара.

Для выбора расчётного соотношения найдем h_{M2} :

$$h_{M2} = \tau_{02} = 700 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 13 / 2 \cdot 730; \quad \tau_{02} = 12,5 \cdot 10^3 \text{ с};$$

$$h_{M2} = 12,5 \cdot 10^3 \cdot 1,8 \cdot 10^{-4} = 2,2 \text{ м.}$$

Следовательно, $h_{M2} \ll H$, поэтому для расчёта воспользуемся формулой (22):

$$\tau_2 = \frac{H}{V_1} - \frac{V_0 \tau_0}{V_1}, \quad \tau_2 = \frac{H - h_M}{V_1},$$

$$\tau_2 = \frac{9,5 - 0,5}{6 \cdot 10^{-6}} = \frac{9,0}{6 \cdot 10^{-6}} = 42 \text{ часа.}$$

Эффективность действия системы подслоного тушения (СПТ) сохраняется независимо от времени протекания пожара, поскольку пена поднимается на поверхность с "холодной" жидкостью. Экспериментальные исследования процесса подъема пены на поверхность углеводорода позволили выявить особую эффективность системы подслоного тушения при защите резервуаров с понтонами. Только эта система позволяет в первые минуты обновить нефтепродукт в слое, непосредственно прилегающем к борту резервуара. В результате происходит охлаждение горячей жидкости и вынос в кольцевой зазор низкократной пленкообразующей пены.

При деформации понтона пена проникает во все закрытые сверху участки- "карманы" и прекращает горение как внутри резервуара, так и вокруг понтона (плавающей крыши).

Система подслоного тушения позволяет резко снизить температуру нефтепродукта, независимо от диаметра защищаемого резервуара. Подслоный способ подачи пены является эффективным при наличии изолированных пространств, которые образуются при обрушении стен и крыши резервуара и при вспучивании понтона.

Реальность подслоного тушения возникла после освоения производства особого типа пенообразователей, на фторированной основе, которые формируют пены, не смешивающиеся с углеводородами, и образуют водные пленки, самопроизвольно растекающиеся по поверхности горючей жидкости.

Натурные огневые испытания эффективности системы подслоного тушения, проведенные в течение десяти последних лет, включая испытания в г.г. Лисичанск (РВС-100), Астрахань (РВС-800), Новополоцк (РВС-1500), Пермь (РВС-2000), Альметьевск (РВС-5000), подтвердили её надежность.

Система подслоного тушения пожаров в резервуарах с нефтепродуктами позволяет использовать одновременно два механизма воздействия: охлаждение поверхностного слоя за счёт холодной горючей жидкости, увлекаемой вверх восходящей струей пены, и изолирующее действие самопроизвольно растекающейся по нефтепродукту водной пленки и слоя высокодисперсной пены низкой кратности.

Если температура вспышки нефтепродукта намного выше температуры окружающей среды, то тушение пламени произойдет при снижении температуры поверхностного слоя горючей жидкости до температуры вспышки. Потушить пожар нефтепродукта, содержащего лёгкие фракции углеводородов, за счёт охлаждения поверхности не удастся. Здесь условием тушения является резкое снижение скорости поступления паров углеводорода в зону горения, что достигается в результате покрытия поверхности горючей жидкости пеной или саморастекающейся водной пленкой.

В любом случае, применение СПТ позволяет гарантировать надёжное тушение пожара несмотря на рост температуры нефтепродукта при затянувшемся пожаре. Применение СПТ позволяет ликвидировать горение нефтепродукта в резервуаре несмотря на наличие поверхности горения нефтепродукта в резервуаре ниже отметки линии пенопроводов СПТ. Эффективность тушащего действия СПТ практически не зависит от уровня разлива поверхности горящего продукта, поскольку пена, в данном случае вводится в зону холодного нижнего слоя факела пламени нефтепродукта в резервуаре.

Таким образом обоснована необходимость применения системы подслоного пожаротушения для предотвращения вскипания и выброса нефтепродукта в резервуарах с понтоном и плавающей крышей.

Литература

1. **Тушение** пожаров нефти и нефтепродуктов / Шароварников А.Ф. и др. М.: Издательский дом "Калан", 2002. 448 с.
2. **Блинов В.И., Худяков Г.Н.** Диффузионное горение жидкости. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 156-206.
3. **Мак-Адамс В.** Теплопередача. Л.-М., 1936. 440 с.