

О ТУШЕНИИ ПЛАМЕНИ ГОРЯЩИХ НЕФТЕПРОДУКТОВ ПОДАЧЕЙ ПЕНЫ ПОД СЛОЙ И НА ИХ ПОВЕРХНОСТЬ

Анализируются способы тушения пламени горящих нефти и нефтепродуктов огнетушащей пеной низкой кратности, подаваемой под слой и на их поверхность.

Ключевые слова: пенообразователь, тушение нефти и нефтепродуктов, эффективность.

E.I. Khil, A.F. Sharovarnikov, D.L. Bastrikov

EXTINGUISHING THE FLAMES OF BURNING OIL AND OIL PRODUCTS BY FOAM SUPPLIED UNDER A LAYER AND ON ITS SURFACE

Ways of extinguishing the flames of burning oil and oil products by fire extinguishing foam low frequency rate, supplied under a layer and on its surface was analyzed.

Key words: foam forming agent, fire extinguishing of oil and oil products, efficiency.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 22 октября 2015 г.

Пожары на объектах нефтяной области представляют огромную опасность, причиняемый ими ущерб весьма существенен. Основным средством тушения таких пожаров является огнетушащая пена, получаемая из различных пенообразователей. Нормативные документы регламентируют применение пенообразователей двумя способами: подачей пены на горящую поверхность и в основании резервуара непосредственно под слой нефтепродукта [1].

Если, пенообразователь рекомендован для подслоного тушения, возможно ли его использование для тушения пламени подачей пены на горящую поверхность? Пенообразователи, рекомендованные для подслоного тушения пламени, являются, как правило, плёнкообразующими и фторсодержащими, поэтому пена на их основе не смешивается с нефтепродуктом.

На первый взгляд, если пена без потерь поднимается через слой нефтепродукта при подслоном способе тушения пламени, то при подаче пены на поверхность нефтепродукта её огнетушащая эффективность должна быть ещё выше.

Цель авторского исследования – выявить различия в способах тушения пламени горящих углеводородов при подаче пены в слой углеводорода и подачей пены на горящую поверхность горючей жидкости.

Авторы проводили экспериментальные исследования огнетушащей эффективности пены в соответствии с ГОСТ Р 53280.2-2010 [2]. Отличие используемой методики заключалось в том, что при подаче пены низкой кратности поддерживалось расстояние от слива до горячей поверхности, равное $10 \pm 0,5$ см.

Использованы известные фторированные пенообразователи зарубежного производства: "Ansilite AFFF", "Hydral AFFF", "Shtamex AFFF". "Ultraguard AFFF", "Light Water FS 201", "Multifoam". Выбор зарубежных марок, хорошо проверенных в России, объясняется тем, что производимые в России аналогичные пенообразователи базируются на импортном сырьё, состав которого остаётся секретом производителя.

Природа фторированных пенообразователей может отличаться как по составу углеводородных компонентов, так и по химической природе **фторированного поверхностно-активного вещества (ФПАВ)**. Как правило, состав и химическая формула фторированных ФПАВ и взаимное соотношение компонентов в концентрированном пенообразователе являются секретами производителя, поэтому единственным способом различить пенообразователи – это экспериментально получить кривые поверхностного и межфазного натяжения водных растворов пенообразователей на границе с гептаном.

Результаты сравнительных испытаний показали, что огнетушащая эффективность пены, полученной из плёнообразующих пенообразователей, при подаче пены на горящую поверхность, ниже, чем при подслойном тушении пламени. Такой результат является неожиданным, поэтому необходимо выяснить причины повышенной огнетушащей эффективности при подаче пены в основание резервуара.

Основные параметры процесса тушения пеной представлены в табл. 1.

Таблица 1

Минимальный удельный расход пенообразующего раствора, критическая и оптимальная интенсивность подачи пены, полученной из плёнообразующих пенообразователей

Пенообразователь	Интенсивность подачи пены, $кг/м^2 \cdot с$		Удельный расход, $кг/м^2$
	Критическая	Оптимальная	
"Ansilite AFFF": на поверхность под слой	0,035	0,08	2,1
	0,02	0,05	1,7
"Light Water FS 201": на поверхность под слой	0,018	0,04	1,1
	0,012	0,03	0,9
"Hydral AFFF": на поверхность под слой	0,03	0,043	2,215
	0,025	0,03	1,8
"Shtamex AFFF": на поверхность под слой	0,02	0,035	1,1
	0,015	0,025	0,9

Наибольшей огнетушащей эффективностью обладают пены, полученные из растворов пенообразователя "Shtamex AFFF". Это характеризуется наименьшей оптимальной интенсивностью и минимальным удельным расходом при тушении пламени гептана при подаче пены как на горящую поверхность, так и в слой углеводорода.

Отличие в огнетушащей эффективности пены при различных способах её подачи объясняется различием факторов, разрушающих пену.

В обоих методах тушения пламени, на пену действует поток тепла от факела пламени, но при подаче сверху пена дополнительно подвергается разрушающему действию горячей поверхности нефтепродукта. Обычно температура горячей поверхности близка к температуре кипения жидкости. При подслойной подаче пены к поверхности увлекаются нижние "холодные" слои нефтепродукта. В результате пена растекается по поверхностному слою, температура которого ниже температуры, установившейся при свободном горении жидкости.

Но при подслойной подаче на пену воздействует длительный контакт с холодным нефтепродуктом, через который пена поднимается к горячей поверхности. Если коэффициент растекания раствора по горючему положительный, но по абсолютной величине близок к нулю, то возможно загрязнение пены нефтепродуктом. В результате пена частично утрачивает изолирующие свойства и разрушается большей скоростью в процессе растекания по горячей поверхности [3, 4].

Таким образом, при подаче пены на горящую поверхность существенным является действие теплового потока и контактное разрушение нагретого нефтепродукта, а при подслойной подаче пены наблюдается воздействие факела пламени и загрязняющее действие контакта с углеводородом в процессе подъёма пены на горящую поверхность. В зависимости от типа пенообразователя, контактное воздействие слоя нефтепродукта может оказывать основное разрушающее действие на пену.

Пенообразователи, созданные на углеводородной основе, без добавок фторированных стабилизаторов, не обеспечивают тушение пламени подслойной подачей пены.

Таким образом, способы тушения пламени отличаются набором эффектов, обуславливающих разрушение пены: при подаче сверху – действие факела пламени и нагретой поверхности, а при подслойном тушении – действие факела пламени и загрязняющее действие нефтепродукта при подъёме пены к горячей поверхности. Дополнительным фактором, сопровождающим процесс подслойной подачи пены, является снижение температуры горячей поверхности, которая близка к температуре кипения, за счёт увлечённой "холодной" жидкости. Скорость выгорания при этом уменьшается и понижается поток тепла от факела пламени. Но этот фактор не повлияет на процесс горения, поскольку температура вспышки гептана – минус 10 °С, а до такого значения понизить температуру "холодными" слоями, имеющими температуру около 20 °С, невозможно.

Для выявления роли нагревания раствора плёнок до температуры, близкой к температуре кипения, были поставлены эксперименты по определению устойчивости пены, полученной из растворов с различной температурой. Результаты измерений представлены на рис. 1.

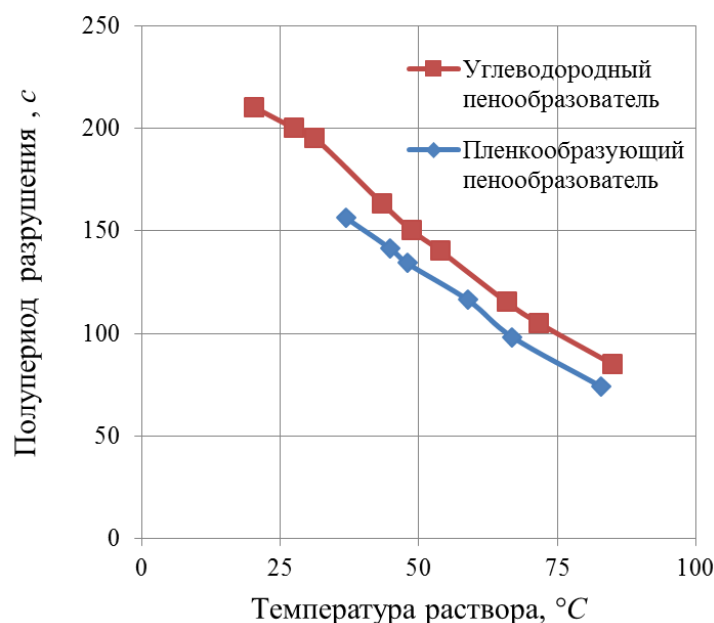


Рис. 1. Влияние температуры водного раствора плёнкообразующего и углеводородного пенообразователей на устойчивость пены к удержанию раствора в пенных плёнках

Как и ожидалось, пена, полученная из раствора с высокой температурой, разрушается намного быстрее при достижении температуры, близкой к температуре кипения. Поэтому основной причиной разрушения пены можно считать нагрев раствора плёнок пены до температуры кипения.

Анализ процесса тушения пламени пеной проводился в работах [4-10].

Материальный баланс пены при тушении пламени гептана различными способами отличается компонентами, которые присущи специфике способа тушения пламени.

Степень покрытия горячей поверхности пеной θ представлена формулой

$$\theta = S / S_0, \quad (1)$$

где S – площадь поверхности, покрытой слоем пены;

S_0 – площадь исходной поверхности горения.

Условие тушения:

$$\theta = 1; \quad \tau = \tau_T.$$

Уравнение материального баланса пены, поданной на тушение:

$$q \, d\tau = \theta S_0 (U_T + U_K) d\tau + \rho \bar{h} S_0 d\theta \quad (2)$$

пена поданная [потери термические и контактно] [накопление]

где q – расход пены, кг/с;

τ – время тушения, с;

S_0 – площадь поверхности горения, м²;

U_T – средняя удельная скорость термического разрушения, кг/м²·с;

U_K – средняя удельная скорость контактного разрушения пены, кг/м²·с;

ρ – средняя плотность пены, кг/м³;

\bar{h} – средняя толщина слоя пены, м.

Разделим переменные и произведём интегрирование в пределах:

$$\theta = 0; \quad \tau = 0; \quad \theta = 1; \quad \tau = \tau_T.$$

$$\tau_T = -\frac{\rho \bar{h}}{U_T \pm U_K} \ln \left(1 - \frac{S_0(U_T + U_K)}{q} \right). \quad (3)$$

Обозначим $q/S_0 = J$; при $S(U_T + U_K) = q$, возникает критическая ситуация поэтому $\tau \rightarrow \infty$, следовательно, $S(U_T + U_K)/S_0 = q/S_0 \equiv J_{кр}$ – критической интенсивности, $кг/м^2 \cdot с$. Формулу (3) представим в виде, удобном для анализа результатов экспериментов:

$$\tau_T = -\frac{\rho \bar{h}}{J_{кр}} \ln \left(1 - \frac{J_{кр}}{J} \right). \quad (4)$$

Средняя толщина слоя пены определяется полусуммой минимальной толщины h_0 и толщиной слоя в месте появления пены h_q , причём $h_q = \beta \cdot J^n$. Показатель степени не определён, но, судя по экспериментам, находится в диапазоне от 0,5 до 1,0. Конкретное значение этого параметра уточняется по результатам зависимости удельного расхода от интенсивности подачи пены:

$$\bar{h} = \frac{h_0 + h_q}{2} = \frac{h_0 + \beta J^n}{2}. \quad (5)$$

Принимая, что при $J = J_{кр}$, $h = 2 h_0$, получим зависимость средней толщины слоя пены от интенсивности:

$$\bar{h} = h_0 \left(1 + \left(\frac{J}{J_{кр}} \right)^n \right). \quad (6)$$

Перепишем формулу (4) с учётом (6):

$$\tau_T = -\frac{\rho h_0}{J_{кр}} \left(1 + \left(\frac{J}{J_{кр}} \right)^n \right) \ln \left(1 - \frac{J_{кр}}{J} \right). \quad (7)$$

И для удельного расхода – Q : $Q = J \cdot \tau_T$, с учётом формулы (7)

$$Q = -\frac{\rho h_0 J}{J_{кр}} \left(1 + \left(\frac{J}{J_{кр}} \right)^n \right) \ln \left(1 - \frac{J_{кр}}{J} \right). \quad (8)$$

Учитывая, что величина критической интенсивности состоит из двух членов, отражающих термическое и контактное разрушение пены, можем проиллюстрировать влияние компонентов на кривые зависимости времени и удельного расхода от интенсивности подачи раствора пенообразователя. На рис. 2 представлены результаты экспериментальных измерений, полученные двумя способами, и результат расчёта по формуле (8), где для подслоного способа не учитывается вклад контактного разрушения пены от горячей поверхности гептана.

Тушение пламени гептана пенообразователем
Light water 201

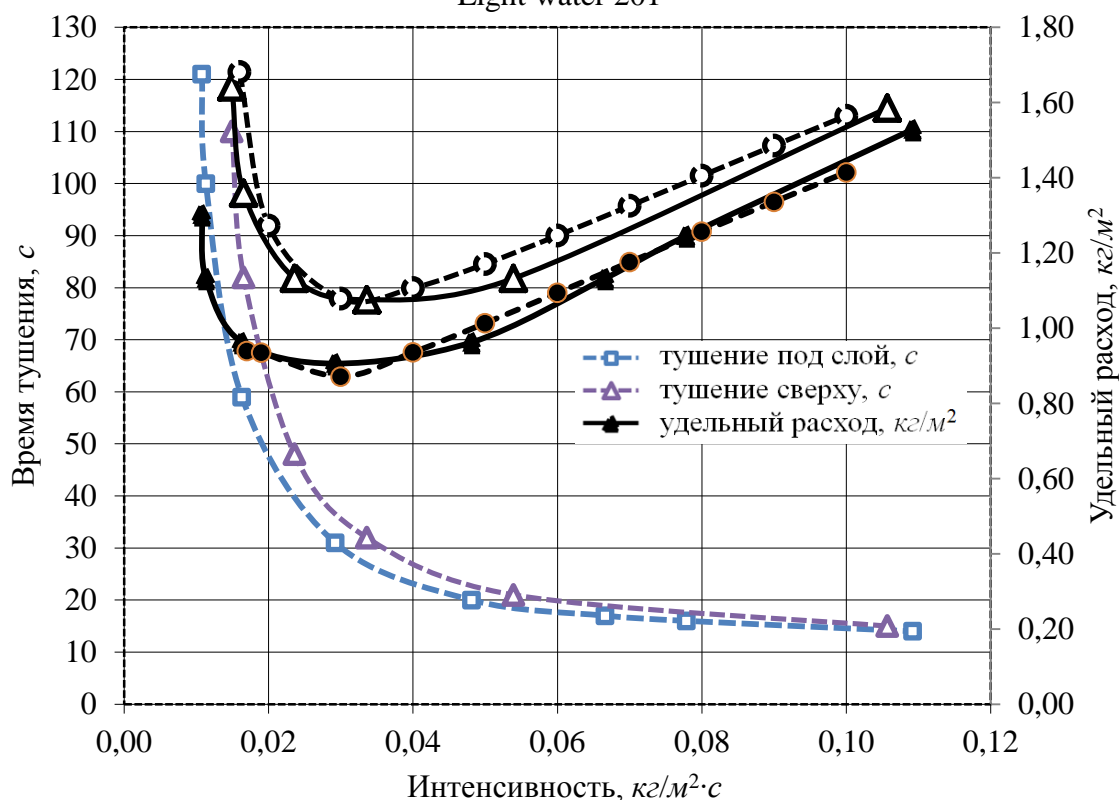


Рис. 2. Сопоставление эксперимента и расчётов, по формуле (8) для пены из пенообразователя "LightWaterFS 201": пунктиром представлены результаты расчётов для подслоного способа и для способа подачи пены на горящую поверхность

Удовлетворительное совпадение результатов экспериментов расчётам наблюдалось при использовании показателя степени $n = 0,75$, а также следующих параметров:

Способ	$J_k, kg/m^2 \cdot s$	h_0, m	Кратность	Пл. воды, kg/m^3	Степень
Подача сверху	0,016	0,0029	10	1000	0,75
Подача под слой	0,0125	0,0023	10	1000	0,75

Судя по результатам расчётов, доля контактного разрушения пены при её подаче на горящую поверхность составляет 30-40 % от термического разрушения под действием факела пламени.

Удовлетворительное совпадение результатов расчётов с экспериментом подтверждает справедливость предложенной модели процесса тушения пламени гептана подслоным способом и подачей пены на горящую поверхность.

Выводы

Тушение пламени гептана способом подачи пены в слой нефтепродукта и на горящую поверхность обеспечивается разрушающим действием теплового потока пламени и контактным разрушением поверхностью горящего нефтепродукта.

Плёнкообразующие пенообразователи, рекомендованные для подслоного тушения пожаров нефтепродуктов в резервуарах, тушат пламя при подаче пены на горящую поверхность с бóльшим (на 30-35 %) удельным расходом, чем при тушении под слой.

Причиной разрушения пены в обоих способах является потеря устойчивости пены при нагревании водного раствора пенных пленок до температуры, близкой к температуре кипения воды.

Литература

1. *Standard for Low, Medium, and High-Expansion Foam*, 2002 ed., National Fire Protection Association, 2002.
2. *ГОСТ Р 53280.2-2010. Установки пожаротушения автоматические. Огнетушащие вещества. Часть 2. Пенообразователи для подслоного тушения пожаров нефти и нефтепродуктов в резервуарах. Общие технические требования и методы испытаний.*
3. *Шароварников А.Ф., Молчанов В.П., Воевода С.С., Шароварников С.А.* Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов. М.: изд. дом "Калан", 2002. 448 с.
4. *Корольченко Д.А., Шароварников А.Ф.* Основные параметры процесса тушения пламени нефтепродуктов пеной низкой кратности. *Пожаровзрывобезопасность* 2014. № 7. С. 67-73.
5. *Безродный И.Ф.* Забытые имена – забытые знания... Или "почему не тушит пена?.." // *Пожаровзрывобезопасность*. 2011. № 12. С. 49-55.
6. *Петров И.И., Реутт В.Ч.* Тушение пламени горючих жидкостей. М.: изд. МКХ РСФСР. 1961. 143 с.
7. *Дегаев Е.Н., Корольченко Д.А., Шароварников А.Ф.* Влияние кратности пен на основные параметры процесса тушения углеводородов // Матер. IV-й междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных и специалистов "Проблемы техносферной безопасности – 2015". М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. С. 24-27.
8. *Абдурагимов И.М., Говоров В.И., Макаров Е.В.* Физико-химические основы развития и тушения пожаров. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1988. 255 с.
9. *Корольченко Д.А., Шароварников А.Ф.* Анализ двойственного механизма тушения пламени // *Пожаровзрывобезопасность*. 2014. № 11. С. 70-74.
10. *Корольченко Д.А., Шароварников А.Ф.* Универсальность механизмов тушения пламени различными огнетушащими веществами // *Пожаровзрывобезопасность*. 2014. № 12. С. 65-71.