

УДК 614.842.615

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ПЕНЫ ПРИ ПОДСЛОЙНОМ ТУШЕНИИ

Малашенко С.М.

Научно-исследовательский институт пожарной безопасности
и проблем чрезвычайных ситуаций

e-mail: 3337044@mail.ru

На основании разработанной математической модели движения пены при подслоном тушении пожара в резервуаре с нефтепродуктом произведено имитационное моделирование процесса с учетом объективно существующего разброса параметров тушения и влияния внешних факторов. Критерием является время тушения, которое определено суммированием значений времени на трех этапах: время движения пены по технологическому трубопроводу, время подъема первой порции пены к горячей поверхности, время растекания пены по поверхности нефтепродукта до стенок резервуара. Определены наиболее вероятные значения критерия, которые могут быть использованы для прогнозирования времени тушения.

On the basis of the worked out mathematical model of motion of foam at the subsurface extinguishing of fire in tanks with an oil product the imitation design of process is produced taking into account objectively existent variation of parameters of extinguishing and influence of external factors. A criterion is time of extinguishing that is determine adding up of values of time on three stages: time of motion of foam on a technological pipeline, time of getting up of the first portion of foam to the conflagrant surface, time of spreading of foam on the surface of oil product to the walls of reservoir. The most probable values of criterion, that can be used for prognostication of time of extinguishing, are certain.

(Поступила в редакцию 20 июля 2015 г.)

Введение. Одним из наиболее эффективных способов борьбы с пожарами в резервуарах с нефтепродуктами является подслоное тушение. Разработка этого способа тушения была начата еще в 50-х годах прошлого века, однако широкого внедрения в практику не получила, так как не существовало пленкообразующих пенообразователей. В настоящее время по способу подслоного тушения публикуется достаточно большое количество как теоретических работ, так и работ практической направленности.

Время тушения подслоным способом – это суммарное время движения огнетушащей пены на трех этапах: по трубопроводу до резервуара; вверх со дна резервуара до поверхности нефтепродукта и по поверхности нефтепродукта до полного ее покрытия и прекращения горения.

Время продвижения пены по трубопроводу как в стационарных системах подслоного тушения, так и при использовании устройства оперативной врезки составляет 5-15 %, описывается несложными математическими формулами и может быть рассчитано. Время движения пены на втором и третьем этапах сопоставимо по величине. И если движение пены на третьем этапе – по поверхности нефтепродукта – достаточно полно исследовано и описано в работе [1], то процесс подъема пены в слое нефтепродукта исследован недостаточно, его моделирование и математическое описание представляет определенные трудности.

Имеется достаточно много трудов, в которых математически описывается в том или ином виде движение воздушных пузырьков в жидкости, однако, все формулы описывают движение пузырьков газа (однофазная субстанция) малого (до 3-4 миллиметров) диаметра и не могут быть использованы для описания движения двухфазной жидкости (огнетушащая пена) большого объема.

Задача состоит в том, чтобы на основе математической модели рассчитать время подъема пены в резервуаре, заполненном нефтепродуктом, и затем, путем математического моделирования, прогнозировать это время при изменении условий тушения как объективно изменяющихся под действием факторов внешней среды, так и связанных с погрешностью

работы технических средств тушения и нестабильностью состава и консистенции огнетушащего вещества.

Сделано допущение о том, что первая порция пены, подаваемая в горящий резервуар, всплывает как один большой пузырь, объем и форма которого изменяются в зависимости от высоты всплытия. Объем пузыря пены изменяется в зависимости от гидростатического давления столба нефтепродукта в резервуаре, возрастая по мере приближения к поверхности. Форма изменяется от шарообразной до сегментной с флуктуирующими краями. В действительности, по данным источника [2], при постоянном подводе пены под слой нефтепродукта, она образует перевернутый конус, с вершиной внизу резервуара и широким сферическим основанием, направленным вверх. При определении времени тушения необходимо рассчитать время достижения поверхности (горящего слоя) первой порцией подаваемой снизу пены, а затем время растекания ее по поверхности. Растекание пены по поверхности и покрытие горящего слоя происходит при постоянном подводе новых, всплывающих порций пены.

Математическая модель. Таким образом, время тушения состоит из трех слагаемых: время движения пены по технологическому трубопроводу, время подъема первой порции пены к горячей поверхности, время растекания пены по поверхности нефтепродукта до стенок резервуара.

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) [3] пена производится генератором пены и поступает в технологический трубопровод. Время движения пены по трубопроводу

$$t_{mp} = L/v_{mp}, \quad (1)$$

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

$$Q_{пены} = Q \cdot K, \quad (2)$$

где Q – расход раствора (вода плюс пенообразователь);

K – кратность пены.

Выражение для определения скорости всплытия пузыря пены получено в работе [4]

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

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкости (нефтепродукта);

D – диаметр пузыря пены;

ρ_n – плотность пены;

C_x – безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления.

Скорость движения пузыря пены существенно растет на первом этапе, а затем остается практически постоянной [5]. Поэтому, если известна установившаяся скорость пузыря, то время подъема можно с достаточной точностью определить по закону равномерного движения

$$t_p = H/u, \quad (4)$$

где H – высота наполнения резервуара нефтепродуктом.

Время растекания пены по поверхности горения определим из следующего выражения [1]

$$t_n = \frac{\rho_n h_n}{(1 + c \cdot a \cdot G_n)(J - J_{кр})}, \quad (5)$$

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;
 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_{mp}) от места врезки до резервуара, подъем в резервуаре (t_p) и растекание по поверхности (t_n) нефтепродукта – получим полное время тушения $t = t_{mp} + t_p + t_n$.

Методика исследований. В настоящее время получили широкое распространение работы по развитию системного подхода – методологической позиции, связанной с целостным рассмотрением технической системы и процессов ее функционирования. Принцип системности требует одновременного и комплексного учета факторов, влияющих на качество функционирования системы в их взаимной связи и развитии.

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 эффективно решать такие задачи позволяют вероятностные методы расчета, но для их использования необходимо охарактеризовать разброс параметров [6, 7]. Итак, параметры системы $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ представляют собой независимые случайные величины, каждая из которых изменяется в своем диапазоне $\alpha_{iH} < \alpha_i < \alpha_{iB}$, $i = 1, \dots, n$; где α_{iH} – нижняя граница дрейфа параметра α_i ; α_{iB} – верхняя граница дрейфа параметра α_i .

Множество $D = \alpha_1 \times \alpha_2 \times \dots \times \alpha_n$ представляет собой n -мерную априорно допустимую область, ограниченную 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 $t_{мгн}$.

Если имеется модель функционирования системы, которая задана в виде какого-либо математического выражения (например, алгебраические формулы, дифференциальные уравнения и т. д.) и связывает между собой параметры и критерии, то есть такие выходные параметры системы, которые приняты нами за показатели эффективности, то воспользовавшись моделью можно вычислить значения критериев при различных сочетаниях параметров. Это позволяет судить о функционировании системы в момент времени $t_{мгн}$.

Необходимо отметить, что решение в виде точки, то есть единственного сочетания параметров, обеспечивающего получение наилучшего на наш взгляд значения критерия или критериев, не имеет физического аналога, так как точка в пространстве параметров определяет только мгновенное состояние системы в момент времени $t_{мгн}$, а от большинства технических систем требуется нормальное функционирование в течение длительного периода времени Δt . Кроме того, решение модели в виде одной точки предполагает такую степень стабильности параметров системы, которая реально достигнута быть не может. Даже если осуществлены какие-либо технические мероприятия, направленные

на стабилизацию параметров, всегда существует их изменение при эксплуатации системы.

Для получения значений критерия предлагается процедура, основанная на использовании метода ЛП-последовательностей [6]. При этом предполагаем, что распределения параметров α_i являются равномерными.

Безусловно, распределения параметров α_i в реальных условиях для реальных систем могут быть различными: нормальными, усеченно-нормальными и др. Установление вида распределения того или иного параметра представляет каждый раз самостоятельную задачу, так как его характер зависит от физической природы параметра, условий эксплуатации системы. При наличии достаточной априорной информации закон распределения параметра определяется с помощью известных статистических методов. Если такая информация отсутствует, то целесообразно, очевидно, принимать распределение параметра равномерным, когда ни одному из его значений нельзя отдать предпочтения. Равномерное распределение параметров с точки зрения эффективности системы является наиболее неблагоприятным. Следовательно, его использование при моделировании функционирования системы предполагает определенный «запас» по критерию. Следует также иметь в виду, что при отличии распределения параметра α_i от равномерного, существует способ преобразования такой случайной величины в равномерно распределенную [8]. Тогда последующие расчеты по методу ЛП-последовательностей проводятся с преобразованными переменными.

Результаты и обсуждение. Время прохождения пены через трубопровод, резервуар и по поверхности жидкости зависит от многих факторов. Такие параметры, как интенсивность подачи пены, скорость подачи пены, ее кратность задаются настройкой насосного оборудования, концентрацией пенообразователя являются управляемыми, однако не детерминированными. Другие, такие как давление в резервуаре, высота наполнения, температура окружающего воздуха, направление ветра, толщина слоя подтоварной жидкости, вязкость содержимого резервуара вообще носят случайный характер. Более подробно факторы, влияющие на эффективность тушения подслоным способом, рассмотрены в работе [9]. В результате анализа данных факторов определены границы изменения параметров при тушении пожара в резервуаре подслоным способом с помощью устройства оперативной врезки (таблица 1).

Таблица 1 – Границы изменений параметров при тушении пожара в резервуаре подслоным способом с помощью устройства оперативной врезки

№ п/п	Параметр	Обозначение, единицы	Границы изменений
1.	Плотность пены	ρ_f , кг/м ³	0,2...0,5
2.	Толщина слоя пены	h, м	0,03...0,08
3.	Коэффициент разрушения пены	a	0,03...0,049
4.	Расход раствора	Q, л/с	12,0...22,0
5.	Скорость растекания	V_{p2} , мм/с	100...200
6.	Плотность нефтепродукта	ρ_n , кг/м ³	0,76...0,82
7.	Коэффициент гидравлического сопротивления	C_x	1,2...1,5
8.	Диаметр пузыря	D, мм	50...100
9.	Высота нефтепродукта	H, м	11,0...11,5

Согласно изложенной выше процедуре имитационного компьютерного моделирования проведен просмотр пространства параметров в границах, указанных в таблице 1. Использовано 2000 зондирующих точек и получены ряды значений критериев. Минимаксные значения критериев (время движения по трубопроводу (t_{mp}) от места врезки до резервуара, время подъема в резервуаре (t_p) и время растекания по поверхности (t_n) нефтепродукта) приведены в таблице 2.

В результате моделирования получено, что при установке устройства оперативной врезки на нормативном расстоянии от резервуара время движения пены по технологическому трубопроводу практически на порядок меньше времени подъема в резервуаре и времени растекания по поверхности нефтепродукта.

Для частных критериев 2 и 3 построена гистограмма распределения полученных при

моделировании значений по восьми равным интервалам (рисунок 1). Наиболее вероятные значения критериев сведены в таблицу 3.

Таблица 2 – Разброс значений критериев

№ п/п	Критерий	Минимальное значение, с	Максимальное значение, с
1.	Время движения пены по трубопроводу	0,7	3,2
2.	Время подъема пены в резервуаре	5,9	22,3
3.	Время растекания пены по поверхности нефтепродукта	9,9	208,7

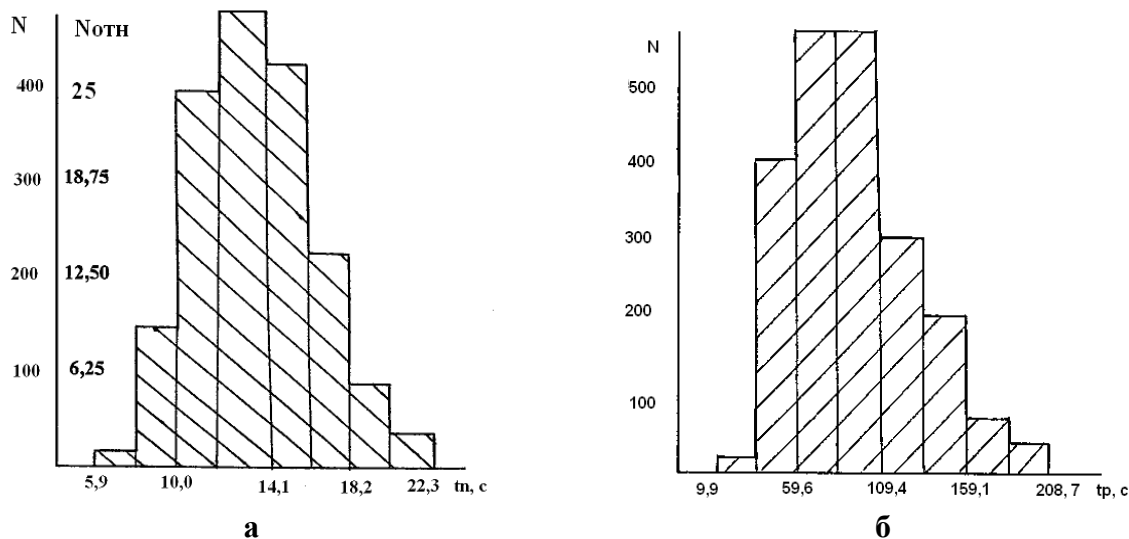


Рисунок 1 – Гистограммы распределений критериев: время подъема пены в резервуаре (а) и время растекания пены по поверхности нефтепродукта (б)

Таблица 3 – Наиболее вероятные значения критериев

№ п/п	Критерий	Значение критерия, с
1.	Время движения пены по трубопроводу	3,10 – 4,17
2.	Время подъема пены в резервуаре	10,0 – 18,2
3.	Время растекания пены по поверхности нефтепродукта	34,8 – 134,2

Следует отметить, что в наиболее вероятные области попадают и значения критериев, полученные при натурном эксперименте. Натурный эксперимент проведен на учебном резервуаре РВС-2000, расположенном на территории полигона ПАСО-1 на объектах ОАО «Нафтан» и Новополоцкой ТЭЦ. Резервуар объемом 2000 тонн был заполнен водой. Интенсивность подачи раствора для получения пены составляла 20 л/с, кратность пены 4...6. Среднее время подъема пены в резервуаре с высотой заполнения 11,7 метров – 19 секунд, а время растекания по поверхности площадью 181 квадратный метр – 35 секунд. Экспериментальные значения соответствуют величинам, полученным с использованием теоретической модели.

Заключение. Разработана математическая модель, описывающая движение пены при тушении пожара в резервуаре с использованием подслоного способа подачи пены. В качестве обобщенного критерия выбрано время тушения, которое представлено как сумма частных критериев: времени движения пены по трубопроводу, времени подъема пены в резервуаре и времени растекания по поверхности нефтепродукта.

На основе анализа факторов, влияющих на процесс тушения (движения пены), определены границы изменений параметров процесса и сформировано пространство параметров. Имитационное моделирование осуществлено путем направленного зондирования пробными точками многомерной области состояний – пространства параметров. Получены ряды распределений частных критериев. Натурным экспериментом подтверждена работоспособность математической модели.

Если заданы величина и допуск критерия, в допустимом пространстве параметров может быть выделена компромиссная область $D_k \in D$, любая точка которой обеспечивает

получение значения критерия в пределах его допуска, то есть нахождение параметров системы в области D_k гарантирует выполнение требований по критерию. Выход параметра или нескольких параметров за пределы области D_k приводит к отказу системы по выбранному критерию или критериям. Таким образом, используя приведенную математическую модель движения пены при подслоном тушении резервуаров и процедуру имитационного моделирования возможно прогнозировать время тушения при определенных параметрах оборудования и внешних условиях. Также описанный подход дает возможность выбора параметров процесса для получения минимального времени тушения на всех этапах движения огнетушащей пены.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов / А.Ф. Шараварников [и др.]. – М.: Издательство Пожнаука, 2005. – 448 с.
2. Кутателадзе, С.С. Гидродинамика газожидкостных систем / С.С. Кутателадзе, С.М. Стырикович. – М.: Издательство Энергия, 1976. – 296 с.
3. 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 // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2012. – № 2 (32). – С. 148–156.
4. Экспериментальное исследование нестационарных режимов всплытия одиночного пузырька / В.А. Архипов [и др.] // ИФЖ. – 2013. – Т. 86, № 5. – С. 1097-1106.
5. Малашенко, С.М. Математическая модель движения пены при подслоном тушении нефтепродуктов / С.М. Малашенко, О.О. Смиловенко // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. тр. Двенадцатой междунар. науч.-техн. конф., Курск, 19-20 марта 2015 г. / Юго-Западный государственный университет; редкол.: С.Г. Емельянов [и др.]. – Курск, 2015. – С. 27-31.
6. Соболев, И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – М.: Наука, 1981. – 173 с.
7. Smilovenko, O. Estimation method for quality of functioning and reliability of technical systems on basic LP τ -sequences / O. Smilovenko, O. Zhilinsky, Y. Skorynin // RELCOMEX'89. – Poland: Technical University of Wroclaw, 1989. – P. 169-174.
8. Смиловенко, О.О. Выбор параметров трибомеханической системы, имеющей несколько критериев работоспособности / О.О. Смиловенко, Ю.В. Скорынин, В. Джокич // YUTRIB'91: сб. науч. тр. междунар. конф., Крагуевац, 1991 г. - С. 124-130.
9. Малашенко, С.М. Факторы, определяющие эффективность тушения пожаров нефти и нефтепродуктов в резервуарах подслоном способом / С.М. Малашенко, О.О. Смиловенко // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2015. – № 1 (37). – С. 126-133.