УДК 621.3

ОЦЕНКА РИСКА ДЕФОРМАЦИИ ИЛИ ВЗРЫВА РЕЗЕРВУАРА ПРИ ПОЖАРЕ В РЕЗЕРВУАРНОМ ПАРКЕ

Ю.А. Абрамов, профессор, д.т.н., ХНАДУ, А.Е. Басманов, к.т.н., Академия гражданской защиты Украины

Аннотация. *Рассмотрены основные риски, возникающие при тушении пожара в резервуарном парке: разрушение стенки горящего резервуара, взрыв негорящего резервуара, возникновение горения на дыхательных клапанах. Построены оценки вероятностей наступления указанных событий.*

Ключевые слова: *вертикальный стальной резервуар, резервуарный парк, вероятность деформации стенки, вероятность взрыва резервуара.*

Введение

Первоочередной задачей пожарных подразделений при пожаре в резервуарном парке является охлаждение горящего резервуара и соседних с ним. Необходимость охлаждения горящего резервуара связана с угрозой деформации его стенки. Обрушившиеся или получившие большой прогиб металлические конструкции существенно затрудняют действия пожарных подразделений. Стенка негорящего резервуара, достигшая температуры самовоспламенения, может послужить источником зажигания и привести к взрыву. Поэтому оценка вероятностей указанных событий является важной с точки зрения практики.

Анализ публикаций

В [1] построена стохастическая модель нагрева резервуара с нефтепродуктом от пламени горящего резервуара. При этом предполагается, что пульсации формы факела и его температуры могут быть описаны нормальным законом. Анализ поведения стенки горящего резервуара приведен в [3]. В 80% случаев разрушение резервуара происходит из-за отказа вертикальных сварных швов, соединяющих листовые конструкции резервуара, и принимающих на себя кольцевые усилия растяжения [3]. Поведение сварного шва при пожаре существенно отличается от поведения соединяемых им элементов и остается мало изученным.

Цель и постановка задачи

Цель работы – оценить риски, связанные с разрушением горящего резервуара и взрывом соседнего негорящего.

Достижение поставленной цели требует решения следующих задач: нахождение вероятности деформации стенки горящего резервуара; оценка вероятности достижения стенкой негорящего резервуара температуры самовоспламенения нефтепродукта.

Вероятность деформации стенки горящего резервуара

Прочность сварного шва зависит от ряда факторов: техники сварки, соблюдения норм, квалификации сварщика и пр. Другими словами, его надежность в той или иной степени будет определяться вероятностными законами.

Прочность материала оценивается пределом прочности (или временным сопротивлением) $\sigma_в$ – напряжением, при котором материал разрушается не ранее заданного времени. Мерой оценки ползучести материала является *предел ползучести* σ_m – напряжение, при котором пластическая деформация за определенный промежуток времени достигает заданной величины.

Прочность углеродистых сталей с повышением температуры до 650–700 ºС снижается почти в 10 раз. Снижение пределов текучести σ_m с повышением температуры происходит примерно так же, как и снижение пределов прочности $\sigma_в$.

Таким образом, для стенки горящего резервуара критической является температура около 600 ºС. При достижении такой температуры прочность стенки резко снижается. Ее дальнейшее поведение носит вероятностный характер.

Будем полагать, что после достижения стенкой горящего резервуара критической температуры $T_{кр}$ вероятность ее разрушения $p_{гор}$ описывается показательным законом

$$p_{гор} = 1 - e^{-\lambda t}, \qquad (1)$$

где t – время, в течение которого стенка находится при температуре выше критической: $T > T_{кр}$.

Параметр λ оценим на основании следующих данных. Сухая стенка горящего резервуара достигает температуры 500–600 ºС в течение 2 минут. Многочисленные практические наблюдения [2, 3] свидетельствуют, что при отсутствии охлаждения сухая стенка горящего резервуара утрачивает прочность в среднем через 15 минут. Это означает, что после достижения критической температуры проходит в среднем 13 минут до обрушения стенки. Отсюда непосредственно следует оценка $\lambda = 1/13$. Приводимые в [2] данные о разрушении стенки в течение 5–15 минут лишний раз подчеркивают случайность данного события.

Пусть резервуар разбит вертикальными секущими плоскостями на n равных сегментов. Для того чтобы резервуар не разрушился, необходимо чтобы не разрушился ни один сегмент. Тогда вероятность разрушения горящего резервуара $p_{гор}$ связана с вероятностью p_0 разрушения отдельного сегмента соотношением

$$p_{гор} = 1 - \left(1 - p_0\right)^n. \qquad (2)$$

Предположим, что вероятность разрушения отдельного сегмента резервуара также описывается показательным законом

$$p_0 = 1 - e^{-\lambda_0 t}, \qquad (3)$$

где t – время, в течение которого данный сегмент имел температуру выше критической. Из (1)–(3) следует связь между интенсивностями разрушения резервуара и его отдельного сегмента: $\lambda_0 = \lambda / n$.

Рассмотрим, как сказывается охлаждение горящего резервуара на вероятности его разрушения. Различные сегменты могут охлаждаться по-разному. Обозначим через t_i – время, проведенное i-ым сегментом резервуара выше критической температуры. Тогда вероятность разрушения резервуара может быть представлена в виде

$$p_{гор} = 1 - \prod_{i=1}^{n} e^{-\frac{\lambda}{n} t_i} = 1 - e^{-\frac{\lambda}{n}\sum_{i=1}^{n} t_i}. \qquad (4)$$

Соотношение (4) может быть использовано для оценки предельного времени, через которое должно быть начато охлаждение горящего резервуара.

Вероятность взрыва соседнего резервуара

Нагрев стальных конструкций негорящего резервуара до температуры самовоспламенения нефтепродукта может привести к его взрыву (если концентрация паров в газовом пространстве резервуара лежит внутри концентрационных пределов распространения пламени) или к возникновению горения на дыхательных клапанах (если концентрация паров выше верхнего концентрационного предела). Очевидно, что при достижении температуры самовоспламенения взрыв (или горение) не произойдут мгновенно. Будет иметь место некоторая инерционность. Однако временная задержка пренебрежимо мала по сравнению с длительностью пожара, и мы будем ею пренебрегать, рассматривая худший случай – мгновенный взрыв при достижении стенкой температуры самовоспламенения.

Будем полагать, что стенка разбита на n областей и температуры этих областей являются нормальными случайными функциями [1]. Обозначим через $p_k(t)$ вероятность того, что на отрезке времени $[0, t]$ температура области k хотя бы однажды достигнет критической температуры $T_{кр}$. Отметим, что температуры $T_k(t)$ указанных областей являются зависимыми случайными величинами. Более того, их случайность связана с одними и теми же случайными функциями, описывающими пульсации пламени и его температуры. Поэтому выражения типа (2) не применимы для оценки вероятности $p_c(t)$ достижения резервуаром критической температуры на отрезке времени $[0,t]$. Поскольку учет корреляционных зависимостей между температурами различных областей очень трудоемкий, то для оценки указанной вероятности будем пользоваться формулой

$$p_c(t) = \max_k p_k(t).$$

Для нахождения вероятности $p_k(t)$ достижения температурой области k критического значения в течение времени $[0,t]$, разобьем временной отрезок системой точек t_1, t_2, …, t_f на равные отрезки с малым шагом Δt. Для того, чтобы температура не достигла критического значения на $[0,t]$, необходимо, чтобы она не достигала его ни на одном из отрезков разбиения

$$1 - p_k(t) = \prod_{i=1}^{f} \left(1 - p_k(t_i, t_i + \Delta t)\right), \qquad (5)$$

где $p_i(t, t+\Delta t)$ – вероятность того, что, если в момент времени t температура ниже критической, то в момент времени $t+\Delta t$ температура стенки превысит критическое значение. Другими словами, на интервале $(t, t+\Delta t)$ будет иметь место выброс случайного процесса за критический уровень. Очевидно, что вероятность $p_k(t, \Delta t)$ будет уменьшаться с уменьшением шага разбиения Δt. В [4] показано, что для малого интервала времени Δt вероятность выброса пропорциональна длине этого интервала. Преобразуем (5), воспользовавшись тем фактом, что $\ln(1-x) = -x + o(x)$

$$1 - p_k(t) = \exp\left(\ln\left(\prod_{i=1}^{f}\left(1 - p_k(t_i, t_i+\Delta t)\right)\right)\right) =$$
$$= \exp\sum_{i=1}^{f} \ln\left(1 - p_k(t_i, t_i+\Delta t)\right) =$$
$$= \exp\sum_{i=1}^{f} \left(-p_k(t_i, t_i+\Delta t) + o(\Delta t)\right).$$

Переходя в последнем равенстве к пределу при $\Delta t \to 0$, получим

$$1 - p_k(t) = \exp\left\{-\int_0^t p_k(\tau, \tau + d\tau)\right\}. \qquad (6)$$

Для определения вероятности выброса $p_k(t, t+dt)$ на бесконечно малом интервале времени dt воспользуемся подходом, описанным в [4]. Для упрощения записей будем опускать индекс k, понимая, что рассматривается именно область k. Для того чтобы выброс имел место, необходимо выполнение события

$$T(t) < T_{кр},\; T(t+dt) > T_{кр}.$$

Пользуясь тем, что $T(t+dt) = T(t) + V(t)dt$, где $V(t)$ – случайный процесс, описывающий скорость изменения температуры, запишем последнее неравенство в виде $T_{кр} - V(t)dt < T(t) < T_{кр}$. Тогда вероятность его выполнения равна [4]

$$p(t, t+dt) = \int_0^{\infty} \int_{T_{кр}-Vdt}^{T_{кр}} p(x, v, t)\, dx dv,$$

где $p(x,v,t)$ – совместная плотность распределения случайных величин T и V в момент времени t. Поскольку пределы во внутреннем интеграле отличаются на бесконечно малую величину, то он может быть вычислен с помощью теоремы о среднем

$$p(t, t+dt) = dt \int_0^{\infty} p(T_{кр}, v, t)\, v dv. \qquad (7)$$

Объединяя (6) и (7), окончательно получим для вероятности достижения температуры самовоспламенения $T_{кр}$

$$1 - p_k(t) = \exp\left\{-\int_0^t d\tau \int_0^{\infty} p(T_{кр}, v, \tau)\, v dv\right\}.$$

Параметры совместного распределения $p(T,V,t)$ температуры стенки и скорости ее изменения могут быть определены из [1].

Выводы

Построены оценки вероятностей деформации стенки горящего резервуара и взрыва негорящего резервуара во время пожара в резервуарном парке. Полученные результаты позволяют оценить предельное время развертывания пожарных подразделений и начала охлаждения резервуаров, а также выбрать первоочередные задачи для пожарных подразделений.

Литература

1. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Оценка параметров распределения температуры сухой стенки при пожаре в резервуарном парке // Науковий вісник будівництва / Зб. наук. пр. – Харків: ХДТУБА. – 2005. – Вип. 34. – С. 167–172.
2. Волков О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами. – М.: Недра, 1984. – 151 с.
3. Мосалков И.Л., Плюснина Г.Ф., Фролов А.Ю. Огнестойкость строительных конструкций. – М.: Спецтехника, 2001. – 496 с.
4. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. – М.: Наука, 1968. – 463 с.

Рецензент: О.П. Алексеев, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2006 г.