

УДК 621.3

СРАВНЕНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО И ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ПОДХОДОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПОЖАРНОЙ СИТУАЦИИ В РЕЗЕРВУАРНОМ ПАРКЕ

К.т.н. Басманов А.Е.

Академия гражданской защиты Украины

Постановка проблемы. Резервуарные парки являются основным местом хранения нефти и нефтепродуктов в процессе их переработки и транспортировки. Большое скопление легко воспламеняющихся жидкостей на относительно небольшой площади приводит к высокой пожарной опасности. Интенсивное тепловое воздействие пожара может вызвать воспламенение или взрыв соседних резервуаров, т.е. привести к каскадному развитию аварийной ситуации. Поэтому важно выяснить, может ли негорящий резервуар нагреться до критической температуры, и за какое время.

Анализ публикаций. В работе [1] построена математическая модель нагрева резервуара с нефтепродуктом от факела горящего резервуара, предполагающая постоянство во времени формы и температуры факела. В [2] для факела, подверженного случайным пульсациям, предложена стохастическая модель нагрева, и показано, что температура нагревающегося резервуара может быть описана нормальным случайным процессом. Оценки параметров этого процесса построены в [3].

Нерешенная часть проблемы. Стохастическая модель, более адекватно описывая пожарную ситуацию, вместе с тем является намного более сложной в вычислительном плане. Для их практического применения необходимо знать, в каких случаях обязательно применение стохастической модели, а в каких случаях можно ограничиться детерминированной.

Цель работы – сравнение прогнозов времени достижения резервуаром критической температуры, получаемых с применением детерминированного и стохастического подхода; выяснение условий, при выполнении которых различия между прогнозами существенны.

Основная часть. Принципиальное различие между детерминированным и стохастическим походом к анализу пожарной ситуации в резервуарном парке состоит в том, что в первом случае речь идет о значениях температур в заданный момент времени, во втором – о законе и параметрах распределения температур. Знание законов распределения температуры резервуара и скорости ее изменения позволяет оценить вероятность достижения критической температуры в течение заданного промежутка времени.

Рассмотрим следующий пример. Пусть горит резервуар РВС-10000 (диаметром 28,5 м и высотой 18 м), заполненный нефтью до уровня 17 м. На расстоянии 20 м от него находится другой такой же резервуар, заполненный нефтью до уровня 12 м. Температура самовоспламенения паров нефти лежит, главным образом, в интервале от 230 °С до 320 °С [4]. На рисунке 1 приведены зависимости от времени температуры стенки, обращенной к факелу (детерминированная модель), и вероятностей достижения некоторых температур (стохастическая модель), построенные с использованием моделей из [1, 2, 3].

Рассмотрим температуру $T_{кр} = 280$ °С. Вероятность того, что эта температура будет достигнута до момента времени $t_{0,05} = 10,5$ мин, составляет 0,05. Вероятность достижения этой же температуры к моменту времени $t_{0,95} = 15$ мин равна уже 0,95. Это означает, что с вероятностью 0,9 критическая температура будет достигнута на интервале времени $(t_{0,05}; t_{0,95})$. Из детерминированной модели следует, что температура в 280 °С будет достигнута через время $t = 12,5$ мин. Из сравнения полученных результатов видно, что вероятность достижения критической температуры локализована на

интервале длиной 4,5 минуты, а детерминированное время лежит почти в его середине.

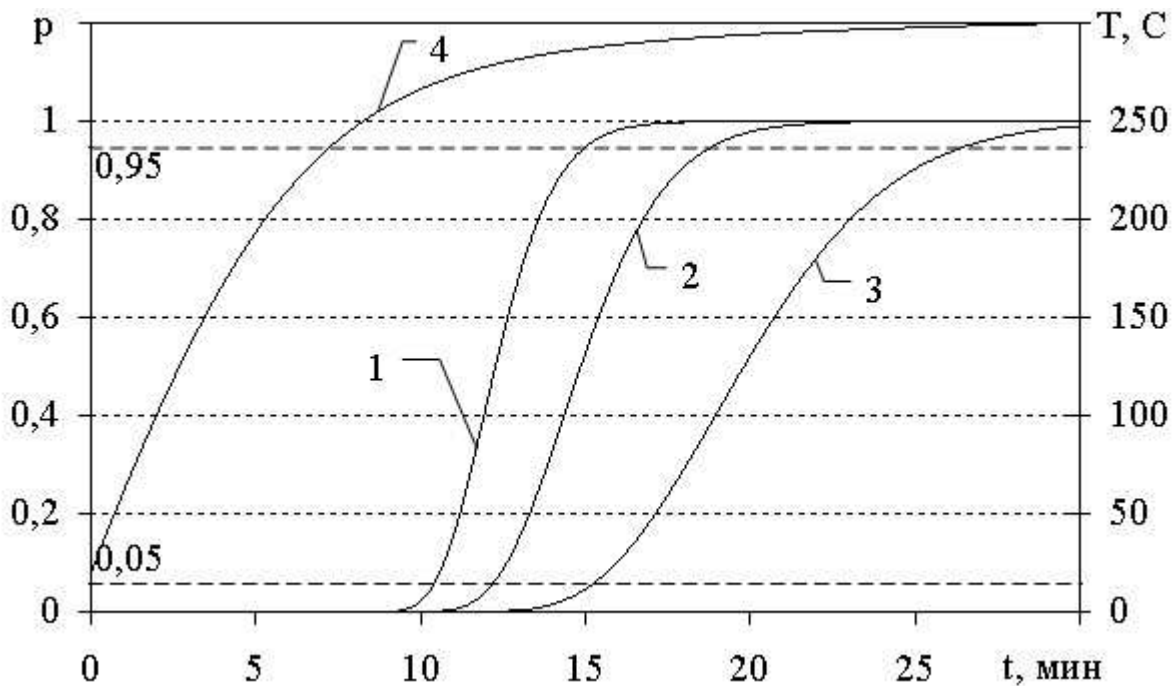


Рис. 1. Вероятность достижения критической температуры $T_{кр}$ на отрезке времени $[0, t]$: 1 – $T_{кр} = 280 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $T_{кр} = 290 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $T_{кр} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$; 4 – детерминированное решение для температуры (правая ось)

Чем короче будет интервал $(t_{0,05}; t_{0,95})$, и чем ближе к нему будет находиться точка t , тем меньше будет отличие между моделями. Отметим, что при стохастическом подходе любая температура достижима, хотя, возможно, и с малой вероятностью. Другими словами, $t_{0,05}$ и $t_{0,95}$ всегда принимают конечные значения. При детерминированном подходе некоторые температуры оказываются вообще недостижимыми, т.е. $t = \infty$. Если в течение заданного промежутка времени τ вероятность достижения некоторой температуры T не превосходит 0,05, т.е. $t_{0,05} > \tau$, то будем также называть эту температуру недостижимой. Определим относительное различие δ между моделями следующим образом:

$$\delta = \frac{\max\{|t_{0,95} - t|, |t_{0,05} - t|\}}{t}, \quad (1)$$

где вместо любого из времен t , $t_{0,05}$, $t_{0,95}$, превышающего длину рассматриваемого промежутка времени τ , подставляется само значение τ . Найденное по соотношению (1) значение δ будет зависеть от τ . Значение τ следует выбирать таким образом, чтобы за это время температуры нагреваемых частей резервуара успевали стабилизироваться. Расчеты [1] показывают, что для этого можно ограничиться величиной $\tau = 60$ мин. Этого же времени заведомо достаточно, чтобы начать охлаждение резервуаров.

Для рассматриваемого случая с критической температурой в 280°C относительное различие между моделями составляет

$$\delta = \frac{\max\{|t_{0,95} - t|, |t_{0,05} - t|\}}{t} = 0,2.$$

Таким образом, для данного случая обе модели дают эквивалентные результаты.

Иная ситуация с критической температурой в 300°C . Применение детерминированной модели дает время ее достижения $t = 29$ мин. Стохастический подход показывает, что к моменту времени $t_{0,05} = 15$ мин эта температура достижима с вероятностью 0,05, а к моменту $t_{0,95} = 26,5$ мин – с вероятностью 0,95. Это означает, что с вероятностью 0,9 критическая температура будет достигнута на интервале времени от 15 до 26,5 минут после начала пожара. Теперь различие между моделями достигает

$$\delta = \frac{\max\{|t_{0,95} - t|, |t_{0,05} - t|\}}{t} \approx 0,48.$$

Кроме того, из рисунка 1 видно, что через 19 минут после начала пожара вероятность достижения критической температуры составляет 0,5. С практической точки зрения это означает, что в половине случаев взрыв негорящего резервуара произойдет на 30% ранее, чем это предсказывает детерминированная модель. Учитывая масштабы возможного ущерба и опасность для человеческой жизни, с такой вероятностью нельзя не считаться. Таким образом, из последнего примера видно, что стохастическая модель более адекватно описывает развитие пожарной ситуации при пожаре в резервуарной группе.

На следующем рисунке приведено изменение относительного различия δ между моделями в зависимости от величины критической температуры (рис. 2).

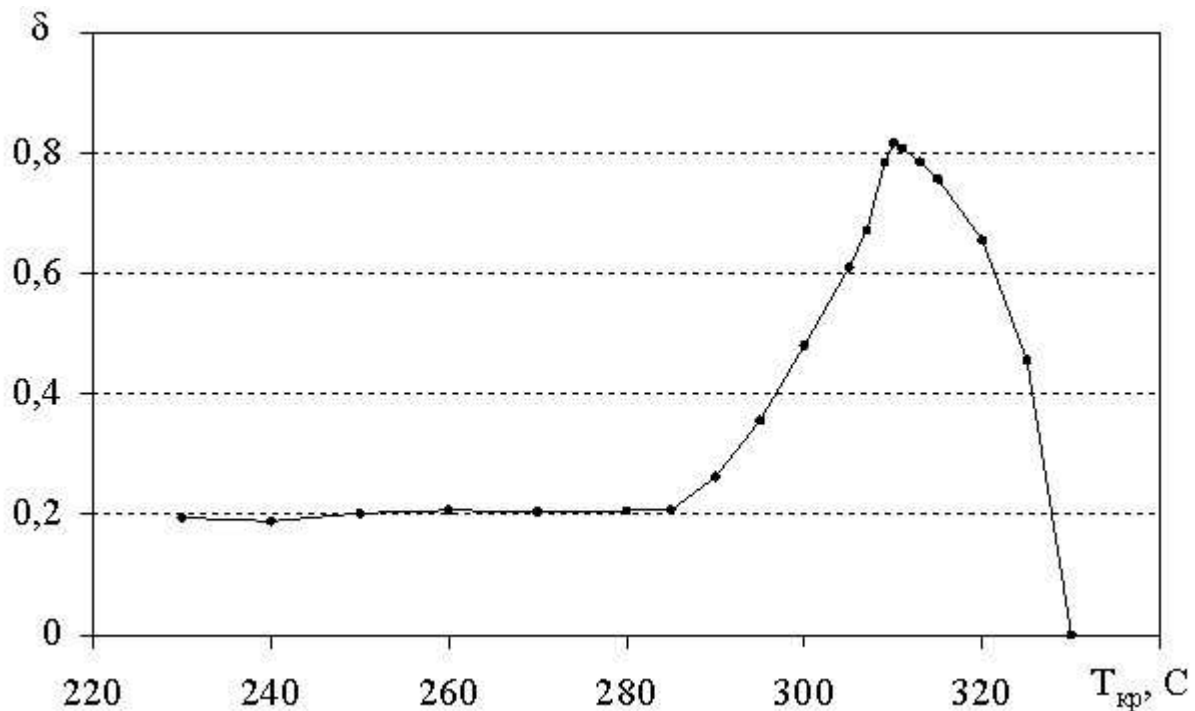


Рис. 2. Зависимость относительного различия δ между детерминированной и стохастической моделями от критической температуры $T_{кр}$

С приближением критической температуры к максимально достижимой (около 310 °C согласно детерминированной модели), различие между моделями увеличивается. Причина такого поведения состоит в следующем.

Математическое ожидание скорости изменения температуры стремится к нулю по мере приближения к максимально достижимой температуре [3], а дисперсия скорости почти не изменяется с течением времени. Поэтому, с уменьшением модуля скорости изменения температуры все больше сказываются ее случайные пульсации, т.е. проявляется стохастическая природа процесса нагрева. Напротив, когда математическое ожидание скорости велико, влияние дисперсии незначительно, и модель близка к детерминированной.

Максимальное различие между моделями наблюдается в окрестности 310 °С, т.е. там, где математическое ожидание скорости изменения температуры равно нулю. Начиная с этой температуры, начинается область температур, недостижимых с точки зрения детерминированной модели. Дальнейшее увеличение критической температуры приводит к приближению к области температур, недостижимых и в стохастической модели (около 330 °С – рис. 2). Поэтому различие между моделями уменьшается. При вхождении в область температур, недостижимых в стохастической модели, различие окончательно исчезает.

Исследуем зависимость между скоростью изменения температуры и различием между моделями в общем случае. Обозначим через $V(T)$ скорость изменения температуры рассматриваемой области резервуара, если в данный момент времени ее температура равна T . Для этого достаточно подставить T в правую часть дифференциального уравнения, описывающего изменение температуры резервуара [1]. Очевидно, что для температур, превосходящих максимально достижимую, скорость будет отрицательной, для меньших – положительной. Скорость будет зависеть от ряда параметров системы: температуры и степени черноты факела, его высоты, скорости и направления ветра, уровня нефтепродукта в горящем резервуаре, расстояния до горящего резервуара. Для выяснения связи между скоростью изменения температуры V и отклонения между моделями δ была проведена серия вычислительных экспериментов для температур самовоспламенения из диапазона 150 ÷ 450 °С; температур факела 1000 ÷ 1200 °С; степени черноты факела 0,85 ÷ 0,97; ветре

до 2 м/с; уровня нефтепродукта в горящем резервуаре $0,5 \div 0,8$ относительно его высоты; высоты факела $1,2D \div 1,4D$, где D – диаметр резервуара; резервуаров РВС-5000, 10000, 20000 (рис. 3).

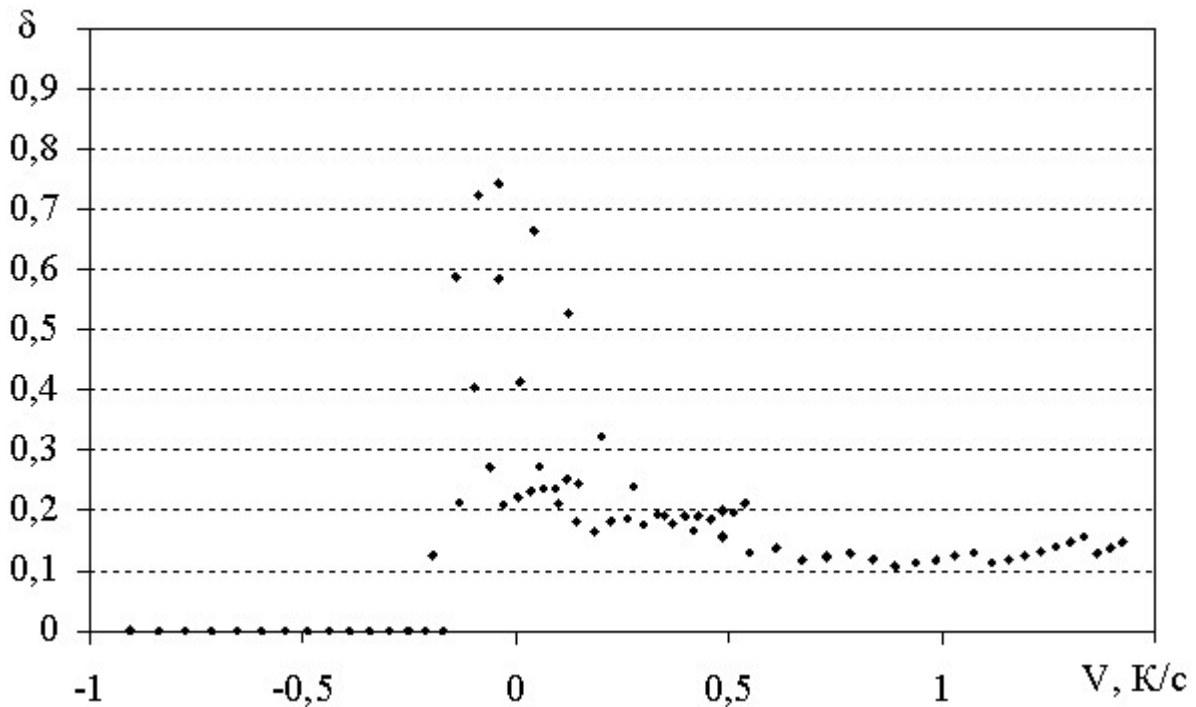


Рис. 3. Скорость изменения температуры V в точке самовоспламенения и относительное различие δ между стохастической и детерминированной моделью

Наибольшее отличие между стохастической и детерминированной моделями (рис. 3) достигается в окрестности $V=0$, т.е. тогда, когда температура самовоспламенения близка к максимально достижимой. В этом случае относительное различие может достигать 75%. С увеличением модуля скорости различие между моделями уменьшается. При этом отрицательные значения скорости V соответствуют случаям, когда температура самовоспламенения превосходит максимально достижимую. Поскольку максимально достижимая температура в стохастической модели превосходит аналогичный показатель детерминированной модели, то при малых по модулю отрицательных значениях скорости различие между моделями велико – до 60%. Далее отличие между моделями уменьшается до нуля – в этой области они

описывают ситуацию, когда критическая температура оказывается недостижима. При положительных скоростях изменения температуры ($V > 0,5$ м/с) сходство между моделями ($\delta \leq 0,2$) проявляется в том, что обе они описывают ситуацию, когда критическая температура меньше максимально достижимой, и случайные пульсации в стохастической модели не оказывают существенного влияния на время ее достижения.

Выводы. Показано, что относительное различие между стохастической и детерминированной моделями зависит от математического ожидания скорости изменения температуры в точке самовоспламенения. Чем больше модуль скорости, тем меньшее влияние оказывают случайные пульсации теплового потока, вызванные турбулентным характером горения, и тем меньшим является различие между моделями. Для скоростей изменения температуры $|V| > 0,5$ К/с обе модели дают практически одинаковые прогнозы времени достижения критической температуры (относительное различие не превосходит 20%).

Перспективы исследований. Дальнейшие перспективы исследований связаны с определением границ изменения свойств нефтепродукта (температура, высота, степень черноты факела, температура самовоспламенения), в пределах которых стохастическая и детерминированная модели имеют существенное различие.

Литература

1. *Абрамов Ю.А., Басманов А.Е.* Тепловые процессы в нагреваемом резервуаре // Коммунальное хозяйство городов. Научно-технический сборник. – Киев: Техника, 2006, вып. 67. – С. 357-362

2. *Абрамов Ю.А., Басманов А.Е.* Влияние случайных пульсаций пламени на нагрев резервуара при пожаре // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: Фолио, 2005. – Вып. 18. – С. 3-8.

3. *Абрамов Ю.А., Басманов А.Е.* Оценка параметров распределения температуры сухой стенки резервуара при пожаре // Науковий вісник

будівництва. Збірник наукових праць. – Харків: ХДТУБА, 2005, вип. 34. – С. 167-172.

4. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справ. изд. / Баратов А.Н., Корольченко А.Я., Кравчук Г.Н. и др. – М.: Химия, 1990. – 496 с.