УДК 621.3

Абрамов Ю.А., д-р техн. наук, гл. науч. сотр.,
Басманов А.Е., канд. техн. наук, докторант

Академия гражданской защиты Украины

АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ СИЛ И СРЕДСТВ ДЛЯ ТУШЕНИЯ ПОЖАРА В РЕЗЕРВУАРНОМ ПАРКЕ

Поставлена задача оптимального расположения стволов для охлаждения резервуаров при пожаре в резервуарном парке с нефтепродуктами. Рассматриваются детерминированная и стохастическая постановки задачи. Предложен алгоритм решения, охватывающий оба случая

Постановка проблемы. Первостепенной задачей пожарных подразделений при пожаре в резервуарном парке является охлаждение горящего резервуара и соседних с ним. Очевидно, что существует множество возможных позиций для расположения стволов, охлаждающих резервуар. В связи с этим возникает вопрос об их наилучшем в некотором смысле расположении.

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [1, 2] построена модель нагрева резервуара с нефтепродуктом под действием излучения от факела горящего резервуара. Методика расчета сил и средств для защиты резервуаров и подготовки пенной атаки рассмотрена в специальной литературе [3, 4]. При этом остается открытым вопрос о том, что делать, если не удается сразу развернуть достаточно стволов для охлаждения резервуаров, и как выбрать первоочередную задачу.

Постановка задачи и ее решение. На оценку удачности того или иного варианта размещения стволов влияют следующие факторы.

1. Эффективность охлаждения.
2. Безопасность относительно возможного взрыва или разлива нефтепродукта.
3. Досягаемость резервуара струей воды из ствола.
4. Тепловой поток от горящего резервуара.
5. Наличие препятствий (резервуаров или других сооружений) между стволом и охлаждаемым резервуаром.
6. Другие ограничения, связанные с тактико-техническими характеристиками используемых стволов или правилами техники безопасности.

Факторы 2-6 фактически являются ограничениями, а 1 – критерием задачи оптимального расположения стволов для охлаждения резервуаров. Другими словами, мы хотим добиться наилучшего охлаждения, исходя из имеющихся сил и средств таким образом, чтобы выполнить ограничения 2-6.

Сформулируем основные допущения, лежащие в основе задачи оптимизации.

1. В распоряжении имеется m стволов со временами боевого развертывания t_1, t_2, …, t_m. Различное время, требуемое для их подготовки, связано, в первую очередь, с неодновременным прибытием пожарных подразделений к месту пожара. Различие может быть вызвано также тактико-техническими характеристиками тех или иных стволов. Будем предполагать, что

$$t_1 \le t_2 \le \ldots \le t_m,$$

в противном случае перенумеруем стволы так, чтобы указанное неравенство было выполнено. Каждому стволу присущи свои тактико-технические характеристики и, следовательно, ограничения, вытекающие из 2-6, могут быть своими для каждого из стволов.

2. Размеры стволов пренебрежимо малы по сравнению с резервуарами; два ствола могут быть сколь угодно близко расположены друг к другу или к другим объектам резервуарного парка.

3. Форма факела над горящим резервуаром может быть приближенно описана конусом, наклоненным под действием ветра. При рассмотрении стохастический модели пожара [2], это требование можно снять, заменив его предположением о нормальном законе распределения пульсаций пламени и его температуры.

4. Тепловые процессы в горящем и соседних с ним резервуарах могут быть описаны моделями, приведенными в [1, 2].

5. В ходе развертывания сил и средств боевая обстановка на пожаре не изменяется: не происходит новых возгораний, взрывов, проливов нефтепродукта.

6. Задача, поставленная перед стволом, остается неизменной на протяжении всего рассматриваемого промежутка времени.

Перед пожарными подразделениями стоит задача охлаждения стенок, как горящего резервуара, так и соседних с ним. В дальнейшем, если это специально не оговорено, под охлаждаемым резервуаром будем понимать оба этих случая. Кроме того, необходимо предусмотреть один лафетный ствол для охлаждения дыхательной арматуры на соседних резервуарах [3, 4].

Рассмотрим охлаждение группы из N резервуаров, среди которых есть горящие и негорящие. Каждый резервуар разобьем вертикальными секущими плоскостями, проходящими через его ось, на n одинаковых сегментов. Для простоты будем считать, что каждый резервуар разбивается на одинаковое количество сегментов, но дальнейшие рассуждения не изменятся и в случае, когда количество сегментов различно. Будем предполагать, что температуры одинаковы в пределах каждого из сегментов. Обозначим, через $T_{rk}(t)$ температуру k-го сегмента охлаждаемого резервуара r в момент времени t. Для каждого резервуара введем критическую температуру $T_r^{(кр)}$ – такую температуру, выше которой не должна подниматься температура его стенок и крыши. Для горящего резервуара критической является температура порядка 500-600 ºC. При достижении этой температуры прочность стали резко падает, и возможна деформация сухой стенки резервуара. Для соседних резервуаров критической является температура самовоспламенения паров нефтепродукта. При ее достижении возможен взрыв резервуара (если концентрация паров в газовом пространстве лежит между нижним и верхним концентрационными пределами распространения пламени), либо горение на дыхательной арматуре (если концентрация паров превосходит верхний предел).

В зависимости от того рассматривается детерминированная [1] или стохастическая [2] модель нагрева соседних резервуаров от пламени горящего резервуара, возможно построение различных оптимизационных задач.

Для детерминированного случая введем «штрафную» функцию:

$$H(T,T_{кр})=\begin{cases}0, T<T_{кр}\\ h(T,T_{кр})>0, T\ge T_{кр},\end{cases}$$

где $T_{кр}$ – критическая температура; $h(T,T_{кр})$ – неотрицательная функция, описывающая «штраф» за превышение температурой критического значения. В качестве $h(T,T_{кр})$ имеет смысл выбирать вогнутую функцию, чтобы штраф рос быстрее, чем температура. Такая штрафная функция будет отдавать предпочтение более равномерному охлаждению резервуара. Например, $h(T,T_{кр})=(T-T_{кр})^2$.

Применительно ко всем резервуарам на отрезке времени $[0,t_0]$, $t_0>t_m$, штрафная функция примет вид:

$$H=\int_0^{t_0}\sum_{r=1}^{N}\sum_{j=1}^{n}H\left(T_{rj}(t),T_r^{(кр)}\right)dt.$$

Для того чтобы учесть необходимость охлаждения дыхательной арматуры резервуара, соседнего с горящим, пополним последнее выражение еще одним слагаемым:

$$H=\int_{0}^{t_0}\left(\sum_{r=1}^{N}\sum_{j=1}^{n}H\left(T_{rj}(t),T_r^{(кр)}\right)+\sum_{r}H\left(T_r^{(a)}(t),T_r^{(кр)}\right)\right)dt\,,$$

где $T_r^{(a)}(t)$ – температура на дыхательной арматуре резервуара r. Штрафная функция для температуры дыхательной арматуры вычисляется только для тех резервуаров, которые не горят.

Будем считать охлаждение, тем эффективнее, чем меньше температура каждого из сегментов выходит за критический предел $T_{кр}$. Задача в том, чтобы не допустить выход температур за критические пределы. Тогда вопрос об эффективности охлаждения сводится к минимизации штрафной функции:

$$H=\int_{0}^{t_0}\left(\sum_{r=1}^{N}\sum_{j=1}^{n}H\left(T_{rj}(t),T_r^{(кр)}\right)+\sum_{r}H\left(T_r^{(a)}(t),T_r^{(кр)}\right)\right)dt\to\min\,. \qquad (1)$$

Для стохастического подхода в качестве функции цели возьмем вероятность достижения температурой одного из резервуаров критического значения хотя бы в одной точке на отрезке времени $[0,t_0]$:

$$p(0,t_0)=P\left\{\bigcup_{r=1}^{N}\bigcup_{k=1}^{n}\bigcup_{t\in[0,t_0]}\left(T_{rk}(t)>T_r^{(кр)}\right)\right\}.$$

В этом случае критерием оптимизации будет минимум вероятности $p(0,t_0)$, т.е. минимум риска деформации горящего резервуара или взрыва (горения на дыхательных клапанах) соседних:

$$H=p(0,t_0)\to\min\,. \qquad (2)$$

Таким образом, основное отличие между стохастической и детерминированной постановками задачи состоит в выборе целевой функции. Области же допустимых решений оптимизационных задач (1) и (2) принципиально не отличаются. Рассмотрим их построение. Перед каждым стволом будем ставить боевую задачу, состоящую в указании номера резервуара r и перечислении тех сегментов резервуара, которые он должен охлаждать, либо указания резервуара r, дыхательную аппаратуру которого он должен охлаждать. Это означает, что боевая задача для ствола k может быть описана тройкой целых чисел (r_k,s_k,f_k), $1\le r_k\le N$, $1\le f_k\le n$, $1\le s_k\le n$, задающих резервуар r_k и диапазон охлаждаемых сегментов от сегмента s_k до f_k включительно. Под задачей $(r_k, 0, 0)$ будем понимать охлаждение дыхательной арматуры резервуара r_k. Под задачей $0_k = (0,0,0)$ будем понимать бездействие ствола k, т.е. не использование его для выполнения какой-либо задачи. Тогда общая боевая задача для всех m стволов, имеющихся в распоряжении, может быть описана вектором размерности $3m$ с целочисленными координатами:

$$(r_1, s_1, f_1, r_2, s_2, f_2, \ldots, r_m, s_m, f_m).$$

Множество всех таких векторов образует множество возможных боевых задач Z. Однако не всякая такая задача является выполнимой. Так, из геометрических соображений ясно, что один ствол не может охлаждать более чем полупериметр резервуара, т.е.

$$\|s_k - f_k\| < \frac{n}{2},$$

где $\|s - f\|$ – количество охлаждаемых сегментов:

$$\|s - f\| = \begin{cases} f - s + 1, & f - s \geq 0 \\ f - s + n + 1, & f - s < 0. \end{cases}$$

Условия 2-6, приведенные выше, накладывают дополнительные ограничения на множество допустимых боевых задач $\Omega \subset Z$.

Ввиду того, что область допустимых решений Ω задач (1) или (2) не является выпуклой (более того, она может быть несвязной или «дырявой»), а целевая функция также не выпукла, то применение к (1), (2) таких классических методов оптимизации как метод покоординатного спуска, дифференциальный алгоритм и др. оказывается невозможным. Множество допустимых решений хотя и дискретно, но велико: полный перебор потребует рассмотрения порядка $(Nn/2)^{2m}$ вариантов.

Обозначим через Z_k множество всех боевых задач для k-го ствола. Рассмотрим введение первого ствола. Для каждой выполнимой задачи $\left(r_1^{(i)}, s_1^{(i)}, f_1^{(i)}\right) \in Z_1$ вычислим значение целевой функции. Дополнительно учтем также возможность бездействия данного ствола 0_1, и для нее также вычислим целевую функцию. Из полученных вариантов действий сформируем множество $\Omega_1 \subset Z_1$, состоящее из тех боевых задач, для которых значение целевой функции минимально:

$$\Omega_1 = \left\{\left(r_1^{(i)}, s_1^{(i)}, f_1^{(i)}\right) : H_i = H_{\min}\right\}.$$

Это множество непусто, т.к. если ни одна из задач не выполнима, то оно будет содержать элемент 0_1 – бездействие ствола.

Теперь переходим к выбору задачи для второго ствола. Для каждого элемента $\omega_1 \in \Omega_1$ рассматриваем возможные боевые задачи Z_2 для второго ствола, в том числе и вариант его неиспользования 0_2, и вычисляем значения целевой функции. Из полученных вариантов сформируем множество $\Omega_2 \subset \Omega_1 \times Z_2$, состоящее из тех боевых задач, для которых значение целевой функции минимально:

$$\Omega_2 = \left\{\left(r_1^{(i)}, s_1^{(i)}, f_1^{(i)}, r_2^{(i)}, s_2^{(i)}, f_2^{(i)}\right): H_i = H_{\min}\right\}.$$

После этого переходим к выбору задачи для следующего ствола. Продолжаем этот процесс до тех пор, пока не дойдем до последнего ствола и не сформируем для него множество $\Omega_m = \Omega_{m-1} \times Z_m$:

$$\Omega_m = \left\{\left(r_1^{(i)}, s_1^{(i)}, f_1^{(i)}, r_2^{(i)} s_2^{(i)}, f_2^{(i)}, \ldots, r_m^{(i)} s_m^{(i)}, f_m^{(i)}\right): H_i = H_{\min}\right\}.$$

Из полученного множества вариантов Ω_m, равноценных в смысле целевой функции (1), (2), остается выбрать тот вариант распределения боевых задач между стволами, который задействует минимальное количество стволов.

Выводы. Предложенный алгоритм не гарантирует нахождения глобального минимума задачи оптимизации. Возможны ситуации, когда существует лучшее решение, чем даваемое алгоритмом. Но даже в этом случае полученное решение является достаточно хорошим и может послужить отправной точкой для принятия окончательного решения.

Особенностью данного алгоритма является то, что наложение большего количества ограничений сужает множество рассматриваемых вариантов Ω_k и повышает скорость расчетов. Напротив, наличие многих равноценных вариантов существенно замедляет расчеты.

Суть алгоритма не зависит от вида целевой функции и ограничений, поэтому подобный подход может быть использован для оптимизации расстановки стволов в резервуарных парках, но и на других объектах.

Построенное решение может быть использовано как при разработке оперативных планов пожаротушения в резервуарных парках, так и для размещения стационарных стволов на этапе проектирования. Даже в том случае, когда РТП не следует предложенной схеме развертывания сил и средств, а опирается на свой опыт, построенное решение может рассматриваться как первое приближение.

Перспективы дальнейших исследований связаны с построением оценок вероятностей выхода температуры за критический уровень.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Влияние пожара на резервуар с нефтепродуктом // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Сб. научных трудов. – Харьков: ХНАДУ, 2005, Вып. 29. – С. 131-133.
2. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Оценка параметров распределения температуры сухой стенки резервуара при пожаре // Науковий вісник будівництва. Зб. наукових праць. – Харків: ХДТУБА, 2005, вип. 34. – С. 167-172.
3. Иванников В.П., Клюс П.П. Справочник руководителя тушения пожара. – М.: Стройиздат, 1987. – 288 с.
4. Руководство по тушению нефти и нефтепродуктов в резервуарных парках / ГУГПС МВД России. – М.: ВНИИПО, 1999.