



Д-р техн. наук, профессор,  
главный научный сотрудник,  
Университет гражданской защиты  
Украины

Ю. А. Абрамов



Д-р техн. наук,  
ведущий научный сотрудник,  
Университет гражданской защиты  
Украины

А. Е. Басманов

УДК 614.8

## МИНИМИЗАЦИЯ УЩЕРБА ПРИ ПОЖАРЕ В РЕЗЕРВУАРНЫХ ПАРКАХ

Поставлена задача оптимального расположения и выбора боевых задач для пожарных стволов при локализации пожара в резервуарном парке. Рассмотрены детерминированная и стохастическая постановки задачи. Предложены метод и алгоритм ее решения, охватывающие оба случая. Полученное решение может быть использовано при разработке плана локализации и ликвидации пожара в резервуарном парке.

**Постановка проблемы.** Ущерб от пожара в резервуарном парке во многом определяется тем, насколько быстро удастся его локализовать и не допустить его дальнейшего распространения. Первоочередной задачей пожарных подразделений является охлаждение горящего резервуара и соседних с ним. При этом существует множество вариантов размещения стволов и выбора боевых задач для них. Не все они равноценны, поэтому из этого множества необходимо выбрать оптимальный в некотором смысле вариант.

**Анализ публикаций.** Методика расчета сил и средств для защиты резервуаров и подготовки пенной атаки рассмотрена в специальной литературе [4, 5]. При этом остается открытым вопрос о том, что делать, если не удастся сразу развернуть достаточно стволов для охлаждения резервуаров, и как выбрать первоочередную задачу. В работах [1, 3] построена модель нагрева резервуара с нефтепродуктом под действием излучения от факела горящего резервуара, являющаяся основанием для расчета предельного времени начала охлаждения и необходимых для этого сил и средств.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью данной работы является минимизация ущерба от пожара в резервуарном парке путем оптимального размещения сил и средств для локализации пожара и выбора боевых задач для них.

На оценку удачности того или иного варианта размещения стволов влияют следующие факторы:

1. Эффективность охлаждения.
2. Безопасность относительно возможного взрыва или разлива нефтепродукта.
3. Достигаемость 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 являются ограничениями, а 1-й — критерием задачи оптимального расположения стволов для охлаждения резервуаров. Другими словами, задача состоит в том, чтобы добиться наилучшего охлаждения, исходя из имеющихся сил и средств, таким образом, чтобы выполнить ограничения 2–6.

Под эффективностью охлаждения будем понимать недопустимость превышения температурой некоторого критического значения. Для горящего резервуара такой критической температурой будет температура, при которой сухая стенка теряет свою прочность, для негорящего — это температура самовоспламенения нефтепродукта.

При слишком близком расположении личного состава и техники к горящему резервуару возникает угроза для них в случае вскипания и пролива нефтепродукта в обвалование. Негорящий резервуар также опасен ввиду возможности его взрыва. Поэтому в Руководстве [5] минимальное расстояние до резервуара допускается равным 10 м.

Тепловой поток от горящего резервуара затрудняет действия пожарных подразделений и может потребовать их дополнительной защиты в виде водяной завесы из распыленных струй. Поэтому, по

возможности, следует выбирать позицию с меньшим тепловым потоком.

Если бы охлаждаемый резервуар был расположен отдельно, то размещать стволы для его охлаждения можно было бы произвольно, руководствуясь только перечисленными выше факторами. В практической ситуации, когда резервуар входит в группу, очевидно, что ствол может быть расположен только на свободном пространстве. Более того, между ним и резервуаром не должно оказаться никаких сооружений.

Существуют и другие ограничения на размещение стволов. Таким ограничением является, например, длина рукавной линии. Меры безопасности не допускают пребывания ствольщиков в обваловании резервуара при наличии пролива нефтепродукта, не покрытого слоем пены, и при отсутствии работающих пеногенераторов или пенных стволов в местах работы личного состава [5]. Другим примером является ситуация, когда в охлаждении могут быть задействованы стационарно установленные стволы. Их положение фиксировано, необходимо только выбрать позицию для дополнительных стволов.

Сформулируем основные допущения, лежащие в основе задачи оптимизации.

1. В распоряжении имеется  $m$  стволов со временами боевого развертывания  $t_1, t_2, \dots, t_m$ . 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

$$t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_m, \quad (1)$$

в противном случае перенумеруем стволы так, чтобы указанное неравенство было выполнено. Каждому стволу присущи свои тактико-технические характеристики и, следовательно, ограничения, вытекающие из факторов 2–6, могут быть различными 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 стохастической модели пожара [2, 3] 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 публикациях [1–3].

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 [5].

Рассмотрим охлаждение группы из  $N$  резервуаров, среди которых есть горящие и негорящие. Введем целевую функцию  $H$ , аргументами которой являются параметры, характеризующие состояние резервуара. Эти характеристики могут быть как детерминированными (температура), так и вероятностными (закон распределения температур). Конкретные виды целевых функций, основанные на детерминированном и стохастическом подходах к прогнозированию каскадного распространения пожара, будут рассмотрены ниже. Сейчас же для определенности будем только полагать необходимость минимизации функции цели:

$$H \rightarrow \min.$$

Каждый резервуар разобьем вертикальными сечениями плоскостями, проходящими через его ось, на  $n$  одинаковых сегментов. Для простоты полагаем, что каждый резервуар разбивается на равное количество сегментов, но дальнейшие рассуждения не изменятся и в случае, когда количество сегментов различно. Будем предполагать, что все физические характеристики (например, температура) одинаковы в пределах каждого из сегментов. Перед каждым стволом будем ставить боевую задачу, заключающуюся в указании номера резервуара  $r$  и перечислении тех сегментов резервуара, которые он должен охлаждать, либо в указании резервуара  $r$ , дыхательную аппаратуру которого он должен охлаждать. Это означает, что боевая задача для ствола  $k$  может быть описана тройкой целых чисел  $(r_k, s_k, f_k)$ ,  $1 \leq r_k \leq N$ ,  $1 \leq f_k \leq n$ ,  $1 \leq s_k \leq n$ , задающих резервуар  $r_k$  и диапазон охлаждаемых сегментов от  $s_k$  до  $f_k$  включительно. Под задачей  $(r_k, 0, 0)$  будем понимать охлаждение дыхательной арматуры резервуара  $r_k$ , под задачей  $0_k = (0, 0, 0)$  — бездействие ствола  $k$ , т.е. неиспользование его для выполнения какой-либо задачи. Тогда общая боевая задача для всех  $m$  стволов, имеющих в распоряжении,

может быть описана вектором размерности  $3m$  с целочисленными координатами

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

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 больше, 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  $\Omega \subset Z$ . Запишем ограничения 2–3. Рассмотрим множество точек, из которых ствол может выполнить боевую задачу  $(r, s, f)$ , т.е. из которых возможно охлаждение дуги  $SF$  периметра резервуара (рис. 1). Здесь предполагается, что дуга  $SF$  содержит все сегменты из диапазона  $(s, f)$ , т.е. точки  $S$  и  $F$  являются концами сегментов  $s$  и  $f$  соответственно.

Пусть середина основания  $O$  охлаждаемого резервуара находится в начале координат, а точки  $S, F$  имеют координаты  $(x_s, y_s)$  и  $(x_f, y_f)$ , радиус резервуара  $R$ . Тогда ствол, расположенный внутри угла  $BEC$ , способен охлаждать дугу  $SF$  резервуара. Точка  $E$  имеет координаты:

$$\begin{aligned} x_e &= R^2 \frac{y_f - y_s}{x_s y_f - x_f y_s}; \\ y_e &= R^2 \frac{x_s - x_f}{x_s y_f - x_f y_s}; \\ r_e &= \sqrt{x_e^2 + y_e^2} = \\ &= \frac{R^2}{x_s y_f - x_f y_s} \sqrt{(y_f - y_s)^2 + (x_s - x_f)^2}. \end{aligned}$$

Пусть  $L_{\min}$  — минимально допустимое расстояние от ствола до резервуара, определяемое из соображений безопасности,  $L_{\max}$  — максимально допустимое, соответствующее дальности действия струи. Тогда ствол должен быть расположен внутри сектора  $ABCD$  (см. рис. 1), где  $OA = OD = L_{\min} + R$ ;  $OB = OC = L_{\max} + R$ . В зависимости от значений  $L_{\min}$  и  $L_{\max}$  сектор  $ABCD$  может вырождаться в сектор  $BEC$  (при  $L_{\min} \leq r_e - R \leq L_{\max}$ ) или в пустое множество ( $L_{\max} \leq r_e - R$ ). Последнее будет означать, что поставленная боевая задача  $(r, s, f)$  для данного ствола не выполнима. В дальнейшем

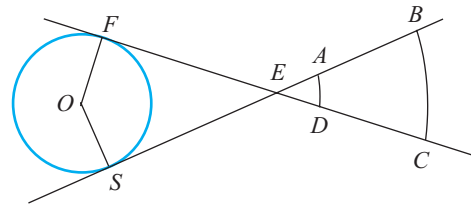


Рис. 1. Возможное расположение ствола для охлаждения дуги  $SF$  периметра резервуара

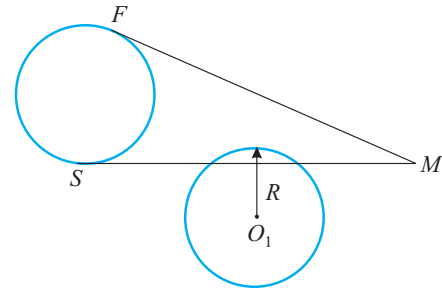


Рис. 2. Невозможность охлаждения дуги  $SF$  стволом из точки  $M$  при наличии препятствий

будем говорить о секторе  $ABCD$ , понимая, что возможны описанные случаи вырождения.

Может оказаться, что из некоторых точек области  $ABCD$  охлаждение дуги  $SF$  невозможно ввиду наличия препятствий между стволом и охлаждаемым резервуаром. Таким препятствием может служить, например, другой резервуар в резервуарной группе (рис. 2).

Для проверки того, что другой резервуар с серединой основания в точке  $O_1$  и радиусом  $R$  не препятствует охлаждению дуги  $SF$  стволом из точки  $M$ , достаточно убедиться, что расстояние от точки  $O_1$  до отрезков  $MS$  и  $MF$  не превосходит  $R$ , и точка  $O_1$  не лежит внутри треугольника  $SMF$  (см. рис. 2). При численной реализации алгоритма критерием того, что точка  $O_1$  не принадлежит треугольнику  $SMF$ , будет неравенство площадей следующих треугольников:  $S_{SMF} < S_{O_1SM} + S_{O_1SF} + S_{O_1MF}$ .

Ввиду сложности аналитического описания области, в которой тепловой поток не превосходит критического значения  $q_{кр}$ , поступим следующим образом. Покроем сектор  $ABCD$  (см. рис. 1) криволинейной сеткой:

$$\begin{cases} x = x_e + (u - r_e) \cos v, \\ y = y_e + (u - r_e) \sin v, \\ \max(r_e, L_{\min} + R) \leq u \leq \max(r_e, L_{\max} + R), \\ \varphi_1 \leq v \leq \varphi_2, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  выбраны так, чтобы описывать угол  $BEC$ :

$$\varphi_1 = \arctg \frac{y_e - y_f}{x_e - x_f}; \quad \varphi_2 = \arctg \frac{y_e - y_s}{x_e - x_s}.$$

Если область  $ABCD$  не пуста, то задаваясь шагом  $\Delta u$  и  $\Delta v$ , в каждом узле  $M(x, y)$  сетки (2) проверим выполнение следующих условий:

- между точкой  $M$  и охлаждаемой дугой  $SF$  нет препятствий (см. рис. 2);
- тепловой поток  $q$  в точке  $M$  не превосходит критического значения  $q_{кр}$ ;
- в точке  $M$  технически возможно размещение ствола (например, достают ли туда рукавные линии);
- размещение ствола в точке  $M$  не противоречит нормам безопасности.

Если существует хотя бы одна точка, в которой все перечисленные условия соблюдаются, то боевая задача  $(r, s, f)$  для данного ствола выполнима. Для расположения ствола можно порекомендовать ту точку  $M$ , в которой тепловой поток минимален. Если же не существует ни одной такой точки, то боевая задача  $(r, s, f)$  данным стволом не выполнима.

Следуя приведенной выше схеме, можно определить, выполнима ли боевая задача  $(r_k, s_k, f_k)$  стволом  $k$ , т.е. проверить, входит ли она во множество всех допустимых боевых задач  $\Omega$ . Однако вопрос об оптимальном выборе боевых задач для стволов остается открытым. Рассмотрим возможный вариант его решения.

Ввиду того, что область допустимых решений  $\Omega$  задачи

$$H \rightarrow \min_{\Omega} \quad (3)$$

не является выпуклой (более того, она или ее граница могут быть многосвязной), а целевая функция также может не быть выпуклой, то применение к условию (3) 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.

Для решения задачи (3) предположим сначала, что времена  $t_k$  развертывания стволов различны, т.е. в соотношении (1) имеет место строгое неравенство:

$$t_1 < t_2 < \dots < t_m < \tau. \quad (4)$$

Обозначим через  $Z_k$  множество всех боевых задач для  $k$ -го ствола. Рассмотрим введение первого ствола. Для каждой выполнимой задачи  $(r_1^{(i)}, s_1^{(i)}, f_1^{(i)}) \in Z_1$  вычислим значение функции цели  $H_i(\tau)$ . Дополнительно учтем также возможность бездействия данного ствола  $O_1$ , и для нее также вычислим функцию цели. Из полученных вариантов действий сформируем множество  $\Omega_1 \subset Z_1$ , со-

стоящее из тех боевых задач, для которых значение функции цели минимально:

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

Это множество непустое, так как если ни одна из задач не выполнима, то оно будет содержать элемент  $O_1$  — 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  $O_2$ , и вычисляем значения целевой функции  $H_i(\tau)$ . Из полученных вариантов сформируем множество  $\Omega_2 \subset \Omega_1 \times Z_2$ , состоящее из тех боевых задач, для которых значение целевой функции минимально:

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

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  $\Omega_m = \Omega_{m-1} \times Z_m$ :

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

Из полученного множества вариантов  $\Omega_m$ , равноценных в смысле целевой функции (3), остается выбрать тот вариант распределения боевых задач между стволами, который задействует минимальное количество стволов.

Рассмотрим теперь ситуацию, когда в соотношении (4) неравенства нестрогие (некоторые стволы имеют одинаковое время развертывания):

$$t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_m < \tau.$$

Выделим отдельные группы, для которых время развертывания одинаково. Далее возможны два пути в зависимости от вычислительных возможностей. Во-первых, можно рассмотреть все возможные боевые задачи для группы стволов, вводимых одновременно. Это потребует полного перебора всех вариантов, количество которых показательно растет с увеличением размеров группы. Другой подход состоит в том, чтобы, как и ранее, последовательно вводить стволы. Такой подход может и не обеспечить наилучшего решения задачи (3), но существенно сократит количество перебираемых вариантов и, следовательно, время решения задачи.

Предложенный алгоритм не гарантирует нахождения глобального минимума задачи (3). Возможны ситуации, когда существует лучшее решение, чем

даваемое алгоритмом. Но даже в этом случае результат является достаточно хорошим и может послужить отправной точкой для принятия окончательного решения при выработке плана локализации пожара.

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

**Детерминированная постановка задачи оптимизации.** Детерминированная модель каскадного распространения пожара основывается на моделировании нагрева резервуара с нефтепродуктом под действием пожара [1, 3]. Обозначим через  $T_{rk}(t)$  температуру  $k$ -го сегмента охлаждаемого резервуара  $r$  в момент времени  $t$ . Введем функцию

$$H(T) = \begin{cases} 0, & T < T_{кр}, \\ (T - T_{кр})^2, & T \geq T_{кр}, \end{cases}$$

где  $T_{кр}$  — критическая температура. Для горящего резервуара критической будет температура, при которой его стальные конструкции утрачивают прочность, для соседних с ним резервуаров — это температура самовоспламенения нефтепродукта.

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

$$H = \int_0^{t_0} \sum_{r=1}^N \sum_{j=1}^n H(T_{rj}(t)) dt \rightarrow \min_{\Omega}$$

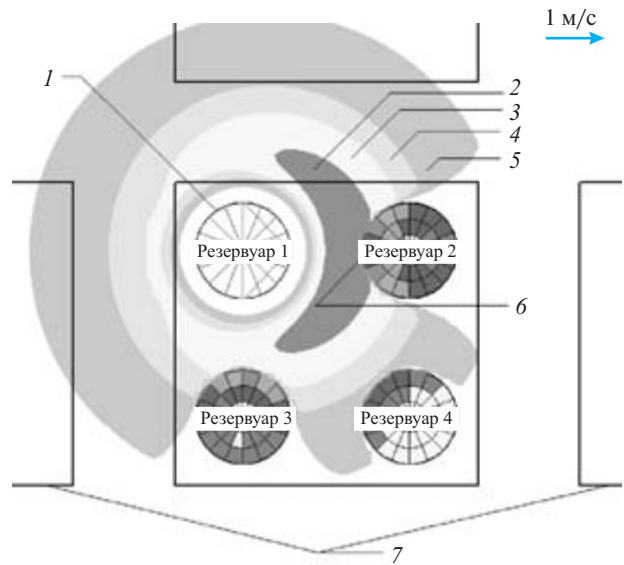
Функция такого вида означает желание минимально превысить критические значения.

**Стохастическая постановка задачи оптимизации.** В стохастической модели развития пожара [2, 3] рассматривается вероятность достижения критической температуры. Это приводит к другому виду функции цели:

$$H_p = \prod_{r=1}^N \prod_{j=1}^n P(T_{rj} < T_{кр}) \cdot \prod_r P(T_r^{(a)} < T_{кр}) \rightarrow \max_{\Omega}$$

Здесь под вероятностью  $P(T_{rj} < T_{кр})$  понимается вероятность того, что на всем рассматриваемом интервале времени  $(0, t_0)$  температура  $T_{rj}(t)$  ни разу не выйдет за критический уровень  $T_{кр}$ . Функция цели в стохастической постановке максимизирует вероятность того, что температура ни одного из резервуаров не выйдет за критический уровень.

**Пример.** Рассмотрим пожарную ситуацию в резервуарной группе из четырех резервуаров РВС-10000 (диаметром 28,5 м и высотой 18 м) со стационарными крышами, расстояние между которыми составляет 21 м (0,75 их диаметра) (рис. 3).



**Рис. 3.** Пожарная ситуация в резервуарной группе через 10 мин после начала пожара: 1 — горящий резервуар; тепловой поток: 2 —  $q = 10,5-14,0$  кВт/м<sup>2</sup>; 3 —  $q = 8,5-10,5$  кВт/м<sup>2</sup>; 4 —  $q = 7,0-8,5$  кВт/м<sup>2</sup>; 5 —  $q = 4,2-7,0$  кВт/м<sup>2</sup>; 6 — часть крыши и стены резервуара, нагревающихся до температуры самовоспламенения; 7 — соседние резервуарные группы

Расстояние между стенкой резервуара и обвалованием — 6 м. Будем предполагать, что резервуары заполнены бензином наполовину и горит один из них. Ветер со скоростью 1 м/с дует в направлении резервуара, соседнего с горящим (см. рис. 3). Температуру самовоспламенения паров бензина полагаем равной 300°C, температуру окружающего воздуха — 20°C. В распоряжении имеется пять лафетных стволов (расход воды — 16,7 л/с, напор на выходе из насадка — 40 м), два из которых могут быть введены через 2 и 3 мин после начала пожара, а остальные — через 5 мин.

Для прогнозирования каскадного развития пожара будем применять четыре метода: стохастический, детерминированный, “Руководство по тушению нефти и нефтепродуктов в резервуарных парках” [5] и экспертный (в качестве экспертов привлекались офицеры пожарных подразделений, занимающихся охраной резервуарных парков нефтепродуктов).

Прежде всего оценим угрозу, создаваемую соседним резервуарам.

1. Стохастический метод. Наибольшей опасности подвергается резервуар 2, в сторону которого наклонено пламя. Вероятность достижения крыши и стенкой температуры самовоспламенения на интервале от 2 до 5 мин возрастает с 0,05 до 0,95, т.е. в течение этого времени может возникнуть факельное горение на дыхательных клапанах. На резервуаре 3 факельное горение может возникнуть в те

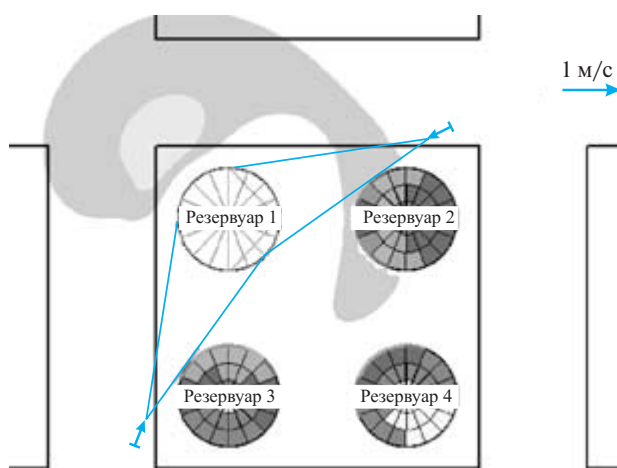


Рис. 4. Подача стволов на охлаждение горящего резервуара

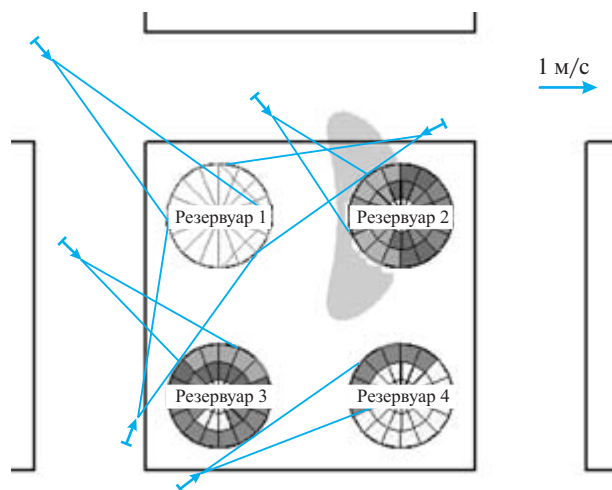


Рис. 5. Подача стволов на защиту соседних и охлаждение горящего резервуара

чение 3–9 мин. В опасности также находится и резервуар 4: через 10 мин вероятность достижения температуры самовоспламенения составляет 0,05, через 60 мин — 0,95.

2. Детерминированный метод. Для резервуаров 2 и 3 результаты те же, что и для стохастического метода: резервуар 2 достигает температуры в 300°C через 4 мин, резервуар 3 — через 7 мин. Близость результатов со стохастическим методом объясняется тем, что температура резервуаров растет быстро, и случайные пульсации теплового потока не оказывают существенного влияния на процесс нагрева. Резервуар 4 находится вне опасности — максимально достижимая температура составляет около 270°C. Здесь различие между моделями объясняется большим расстоянием между резервуарами ( $1,5D$ ) и, следовательно, меньшей скоростью нагрева. На этом примере видно, что стохастическая модель более точно описывает возникающую ситуацию. Она позволяет учесть имеющуюся неопределенность, показать уровень риска и принять решение о необходимости тех или иных мер.

3. Номограмма из Руководства [5] дает время достижения температуры самовоспламенения в резервуарах 2 и 3 около 20 мин, а для резервуара 4 эта температура недостижима. Такое отличие от первых двух методов вызвано, в первую очередь, тем, что приводимые в Руководстве [5] рекомендации не учитывают различий в тепловом потоке от факелов различных нефтепродуктов. Там также не принято во внимание наклон факела, вызванный ветром.

4. Экспертный метод. Все эксперты указали на то, что опасности подвергаются все резервуары из группы. Поэтому необходимо подавать стволы на защиту всех резервуаров. При этом резервуар 2 под-

вергается наибольшей опасности, а резервуар 4 — наименьшей.

Рассмотрим теперь охлаждение резервуаров.

1. Стохастический метод. Применение изложенного выше алгоритма дает решение, приведенное на рис. 4: первые стволы подаются на охлаждение горящего резервуара со стороны соседних так, чтобы уменьшить тепловой поток от раскаленных стенок к соседним резервуарам. Несмотря на охлаждение, резервуары 2, 3 и 4 по-прежнему остаются в опасности.

Следующие стволы подаются для защиты соседних резервуаров и охлаждения горящего (рис. 5). Теперь все резервуары вне опасности, угрозы каскадного распространения пожара нет, можно готовить пенную атаку.

2–3. Детерминированный метод и Руководство [5]. Первые стволы подаются на охлаждение горящего резервуара (см. рис. 4). Резервуары 2 и 3 по-прежнему остаются в опасности, поэтому следующие стволы подаются на их охлаждение (см. рис. 5, но без охлаждения резервуара 4, так как он находится вне опасности).

4. Экспертный метод. Мнения экспертов разделились: часть из них предпочли подать первый или второй ствол на охлаждение резервуара 2, чтобы снизить риск каскадного распространения пожара. Другие, следуя общим рекомендациям по тушению пожаров в резервуарных парках [4, 5], сначала подавали стволы на охлаждение горящего резервуара (см. рис. 4), а затем на защиту соседних (см. рис. 5).

Применение номограммы из Руководства [5] не учитывает различий в тепловом потоке от факелов различных нефтепродуктов и наклона факела ветром. Как следствие, в ряде случаев время достижения критической температуры оказывается завы-

шенным по сравнению с детерминированной моделью, учитывающей перечисленное.

Применение Руководства [5] не дает ответа на вопрос, какая именно часть резервуара нагревается, и решение об охлаждении ложится на руководителя тушения пожара. Экспертный метод показывает, что отклонение факела под действием ветра приводит к неточностям при решении данной задачи экспертом.

Эксперты часто переоценивают угрозу, которую представляет тепловой поток для соседних резервуаров. Стремясь уменьшить риск распространения пожара, они предпочитают охлаждать соседний резервуар в ущерб охлаждению горящего. Для экспертов представляет сложность определение того, какая именно часть резервуара нагревается,

если факел наклонен ветром. Следствием этого может стать недостаточность охлаждения.

**Выводы.** Предложены метод и алгоритм оптимальной расстановки сил и средств для локализации пожара в резервуарном парке, позволяющие минимизировать ущерб от пожара. Указанный метод применим как к детерминированной модели развития пожара, так и к стохастической. Разработанный алгоритм может быть использован на этапе разработки плана пожаротушения для анализа пожарной ситуации, прогнозирования возможности каскадного распространения пожара, выявления первоочередных задач, в частности при недостатке сил и средств, и расстановки стволов для охлаждения резервуаров.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю. А., Басманов А. Е. Влияние пожара на резервуар с нефтепродуктом // Вестник национального автомобильно-дорожного университета: Сб. науч. тр. — Харьков: ХНАДУ, 2005. — Вып. 29. — С. 131–133.
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. Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций в резервуарных парках с нефтепродуктами. — Харьков: АГЗУ, 2006 — 256 с.
4. Иванников В. П., Ключ П. П. Справочник руководителя тушения пожара. — М.: Стройиздат, 1987. — 288 с.
5. Руководство по тушению нефти и нефтепродуктов в резервуарных парках / ГУГПС МВД России. — М.: ВНИИПО, 1999.

Поступила в редакцию 13.06.07.