

## УДК 614.8

А.А. Михайлюк, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник НУГЗУ

## ВЫБОР СИЛ И СРЕДСТВ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ГОРЯЩЕГО РЕЗЕРВУАРА

(представлено д-ром техн. наук Басмановым А.Е.)

Приведено решение математической задачи оптимального выбора сил и средств для охлаждения горящего резервуара по критерию минимума расхода воды

**Ключевые слова:** резервуар, охлаждение, интенсивность подачи.

**Постановка проблемы.** Пожар в резервуаре с нефтепродуктом характеризуется выделением значительного количества тепла и наличием высоких температур, приводящих при отсутствии охлаждения к деформации сухой стенки резервуара и образованию изолированных зон горения («карманов»), снижающих эффективность проведения пенной атаки. Поэтому первостепенной задачей подразделений МЧС при локализации и ликвидации такого рода пожаров является обеспечение достаточного охлаждения горящего резервуара.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работе [4] построена модель нагрева сухой стенки горящего резервуара. В [5] показано, что коэффициент конвективной теплоотдачи от стенки резервуара в стекающую по ней водную пленку зависит от ряда факторов: скорости струи в момент удара о стенку резервуара, интенсивности подачи воды, коэффициента покрытия стенки резервуара водной пленкой. Несмотря на это, существующие на сегодня рекомендации определяют лишь интенсивность подачи воды: 0,5 л/м·с [1]; 0,8 л/м·с [2]. Все эти рекомендации не учитывают таких особенностей пожара, как высота сухой стенки, тип горящего нефтепродукта, коэффициент использования воды и т.д.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является решение задачи оптимального выбора сил и средств для охлаждения горящего резервуара по критерию минимума расхода воды.

Под оптимальным будем понимать такой выбор сил и средств, который бы обеспечивал охлаждение стенки резервуара до приемлемой температуры при минимальном значении некоторой величины.

При постановке задачи оптимизации учтем следующие особенности:

1. Струя воды должна достичь верхней кромки стенки резервуара с заданного расстояния.
2. Температура охлаждаемой стенки не должна превосходить

150°C.

3. Средняя по толщине водной пленки температура должна быть ниже температуры кипения

4. Тепловой поток от пожара не должен превосходить критического значения.

Прочностные характеристики стали резко ухудшаются при температуре порядка 400 – 500°C. Однако охлаждение до такой температуры недостаточно, т. к. при таких температурах стенки имеет место пленочное кипение, при котором возникает воздушная прослойка между стенкой и водной пленкой, что приводит к резкому уменьшению коэффициента теплоотдачи и неустойчивости процесса охлаждения. Поэтому в качестве приемлемой будем полагать температуру охлаждаемой стенки  $T_{кр} = 150^\circ\text{C}$ , при которой пленочного кипения не происходит [3].

В качестве критериев оптимальности могут быть приняты следующие критерии:

1. Минимум расхода воды пожарными стволами. Выбор такого критерия продиктован не только экономией воды в случае ее недостатка, но и тем, что скопление использованной воды в обваловании резервуара затрудняет действия подразделений МЧС.

2. Минимум количества личного состава, задействованного на работу со стволами по охлаждению горящего резервуара. Выбор такого критерия может быть вызван недостатком сил и средств после прибытия первых подразделений МЧС к месту пожара.

3. Минимум количества пожарных автомобилей, обеспечивающих работу стволов. Выбор такого критерия возможен, когда фактором, ограничивающим действия РТП, является количество доступных пожарных автомобилей.

Для вертикального стального резервуара заданного типа и с заданным нефтепродуктом определим такие условия подачи (количество и тип стволов, напор воды, расстояние до резервуара), которые бы обеспечивали минимум выбранной функции цели и выполнение ограничений 1-4. С целью упрощения будем полагать, что все стволы расположены на равном расстоянии от резервуара в вершинах правильного  $n$ -угольника, центр которого совпадает с центром основания резервуара.

С математической точки зрения это означает следующую задачу оптимизации:

$$F(n, d, h_b) \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$h_b \geq \frac{1}{2} \left( H + \sqrt{H^2 + L^2} \right); \quad (2)$$

$$\cos \frac{\pi}{n} \geq \frac{R}{R + \ell}; \quad (3)$$

$$T_c(\ell, n, d, h_B, D, H, h, T_\phi, \varepsilon_\phi) \leq T_{c.кр.}; \quad (4)$$

$$T_B(\ell, n, d, h_B, D, H, h, T_\phi, \varepsilon_\phi) \leq T_{кип.}; \quad (5)$$

$$q(\ell, n, d, h_B, D, H, h, T_\phi, \varepsilon_\phi) \leq q_{кр.}; \quad (6)$$

где  $\ell$  – расстояние от резервуара до ствола;  $n$  – количество стволов;  $d$  – диаметр насадка;  $h_B$  – напор воды;  $D, H$  – диаметр и высота охлаждаемого резервуара;  $T_\phi, \varepsilon_\phi$  – температура и степень черноты факела, определяющие тепловой поток к сухой стенке резервуара;  $T_{c.кр.}$  – критическое значение температуры сухой стенки ( $T_{c.кр.} = 150^\circ\text{C}$ );  $T_{кип.} = 100^\circ\text{C}$  – температура кипения воды;  $q_{кр.}$  – критическое значение плотности теплового потока от пожара в точке, где расположен ствол;  $T_c$  – температура стенки резервуара;  $T_B$  – температура воды, стекающей по стенке резервуара;  $q$  – плотность теплового потока от пожара в точке, где размещен пожарный ствол.

В частности, при выборе в качестве критерия оптимизации минимума расхода воды целевая функция (1) имеет вид:

$$F = n \cdot Q(d, h_B),$$

где  $Q$  – расход воды пожарным стволом (табл. 1).

**Таблица 1 – Расход воды пожарными стволами**

Ствол	Диаметр ствола, мм	Напор воды, м		
		20	40	60
Лафетный	25	9,7	13,6	21
А	19	5,4	7,4	9
Б	13	2,7	3,7	4,5

Ограничение (2) соответствует условию досягаемости водой верхней кромки резервуара. Ограничение (3) обусловлено геометрическими соображениями (рис. 1): максимально возможный угол охлаждения  $\beta$  (т.е. минимально возможное значение  $\cos\beta$ ) достигается

при  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ .

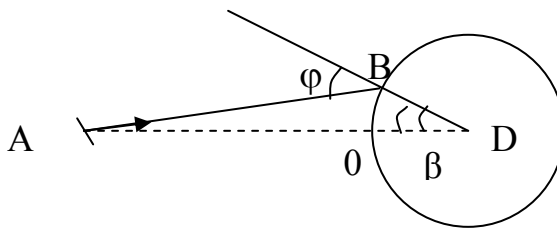


Рис. 1 – Определение угла падения струи на стенку резервуара

Ограничение (4) соответствует требованию о том, что температура стенки не должна превышать величины  $T_{с.кр.} = 150^{\circ}\text{C}$ . При этом зависимость температуры стенки от расстояния  $y$  до ее верхней кромки имеет вид [4]:

$$T_c(y) = T_2 + \frac{T_1 - T_2}{h} y, \quad (7)$$

где  $h$  – высота сухой стенки, а параметры  $T_1, T_2$  определяются из модели нагрева сухой стенки горящего резервуара [4].

Ограничение (5) соответствует условию о том, что средняя температура стекающей воды не должна быть выше температуры кипения. Ограничение (6) накладывает требования на допустимую плотность теплового потока, приходящегося на ствольщиков. При плотности теплового потока менее  $7,0 \text{ кВт/м}^2$  [1] работа ствольщиков не требует защиты водяной завесой. В противном случае такая защита нужна, и к целевой функции (1) должно быть добавлено слагаемое, равное расходу воды на защиту ствольщиков. Поэтому при решении задачи оптимизации 5 вначале следует решить задачу (1)-(6), т.е. (без ограничения на плотность теплового потока) защиты ствольщиков водяной завесой, а затем при (1)-(5), добавив при этом в целевую функцию слагаемое, равное расходу воды на защиту ствольщиков водяной завесой:

$$F = n \cdot Q(d, h_v) + nQ_{зашц},$$

где  $Q_{зашц}$  – расход воды на защиту одного ствола.

После этого необходимо сравнить решение этих двух задач и выбрать решение, обеспечивающее меньший расход воды.

Особенностью задачи оптимизации (2)-(6) является то, что множество значений, которые могут принимать оптимизируемые величины  $n, h, d_v$  дискретно:  $n$  – целые числа (из геометрических соображений  $n \geq 3$ );  $d, h_v$  – определяются таблицей 4.2. Четвертый пара-

метр  $\ell$  может принимать любое положительное значение. Кроме того ограничения (2)-(6) не линейны. В связи с этим применение классических методов оптимизации (метод наискорейшего спуска, метод Ньютона и др.) не представляется возможным. С другой стороны, малое количество допустимых значений параметров  $n$ ,  $h$ ,  $d_v$  позволяет осуществить полный перебор, определяя для каждой такой тройки оптимальное значение  $\ell$ .

Это может быть выполнено следующим образом. Поскольку  $\ell$  не входит в целевую функцию (1), а только в ограничение задачи, то достаточно выбрать любое  $\ell$ , которое бы удовлетворяло неравенствам (2)-(6). Для этого будем перебирать значения от

$$\ell_1 = \frac{R}{\cos \frac{\pi}{n}} - R \quad (8)$$

до

$$\ell_2 = \sqrt{(2h_v - H)^2 - H^2} \quad (9)$$

с шагом  $\Delta\ell$ . Здесь (8) определяется ограничением (4), а (9) – ограничением (3). Величину шага целесообразно выбирать порядка 1м. Это с одной стороны не потребует большого объема вычислений, а с другой – если и будет пропущено значение  $\ell^*$ , обеспечивающее выполнение условий (2)-(6), то практического применения оно не имеет, т.к. невозможно обеспечить такую точность расположения стволов.

В качестве примера рассмотрим выбор сил и средств для охлаждения горящего резервуара РВС-5000. В таблице 2 приведен результат работы алгоритма для различных нефтепродуктов (бензин, нефть, мазут) и различных уровней разлива (высота сухой стенки 2,5-7,5 м).

**Таблица 2 – Выбор сил и средств для охлаждения горящего резервуара РВС-5000 по критерию минимизации расхода воды в зависимости от условий горения**

Вид нефтепродукта	Высота сухой стенки, м	Тип ствола	Напор, м	Кол-во стволов	Расстояние, м	Расход воды, л/с	Интенсивность подачи воды л/(м <sup>2</sup> , с)	Кол-во личного состава	Кол-во автомобилей
Бензин	2,5	А	40	11	6-18	81,4	1,23	30	10
	5	А	40	10	6-18	74	1,12	20	5
	7,5	Б	40	10	6-18	37	0,56	10	3
Нефть	2,5	Б	60	10	15	45	0,68	10	3

	5	Б	40	9	9-18	29,6	0,44	9	3
	7,5	Б	40	6	9-18	22,2	0,33	6	2
Мазут	2,5	Б	40	8	9-18	29,6	0,44	8	2
	5	Б	40	6	9-18	22,2	0,33	6	2
	7,5	Б	40	4	18	14,8	0,22	4	1

**Выводы.** Решена задача оптимального выбора сил и средств для охлаждения горящего резервуара по критерию минимума расхода воды. Область допустимых решений обусловлена ограничениями, связанными с досягаемостью струей воды резервуара, тепловым воздействием пожара на личный состав, и ограничениями, связанными с необходимостью охлаждения стенки резервуара до температуры ниже критической.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванников В.П. Справочник руководителя тушения пожара / В.П. Иванников, П.П. Ключ. – М.: Стройиздат, 1987. – 288 с.

2. Інструкція щодо гасіння пожеж у резервуарах із нафтою та нафтопродуктами: НАПБ 05.02.–03. – Офіц. вид. – К.: М-во з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи, 2003. – 81 с. – (нормативний документ МНС України. Інструкція).

3. Луканин В.Н. Теплотехника / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер. – М.: Высшая школа, 2002. – 671 с.

4. Басманов А.Е. Математическая модель нагрева сухой стенки горящего резервуара с нефтепродуктом / А.Е. Басманов, А.А. Михайлюк // Проблемы пожарной безопасности. – 2008. – №23. – С. 35–40.

5. Басманов А.Е. Взаимодействие водной струи со стенкой резервуара при его охлаждении в условиях пожара / А.Е. Басманов, А.А. Михайлюк // Проблемы пожарной безопасности. – 2009. – №25. – С. 14–20.

nuczu.edu.ua

A.A. Mikhailiuk

### **Selection of and means for cooling tank on fire.**

A solution of the mathematical problem of optimal choice of forces and means for cooling the tank on fire on the criterion of minimum water flow.

**Key words:** reservoir, cooling flow rate.

A.A. Михайлюк

### **Вибір сил і засобів для охолодження горящих резервуара.**

Наведено рішення математичної задачі оптимального вибору сил і засобів для охолодження палаючого резервуару за критерієм мінімуму витрат води.

**Ключові слова:** резервуар, охолодження, інтенсивність подачі.