
ПОЖАРНАЯ ТАКТИКА, ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ТУШЕНИЯ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТОКСИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ПОЖАРОВ НА ОБЪЕКТАХ, СОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛЫ, ПРИ ВОЗГОРАНИИ КОТОРЫХ ОБРАЗУЮТСЯ ОПАСНЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА

**О.Н. Савчук, кандидат технических наук, профессор, заслуженный
работник высшей школы РФ.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Приводятся данные по количественному выходу аварийно химически опасных веществ при сгорании ряда материалов и предлагается методика прогнозирования зон химического заражения при пожарах на объектах с такого рода материалами при самых неблагоприятных метеоусловиях.

Ключевые слова: прогнозирование, аварийно химически опасное вещество, концентрация

FORECASTING OF TOXIC CONSEQUENCES OF FIRES FOR THE OBJECTS CONTAINING MATERIALS AT WHICH IGNITION DANGEROUS CHEMICAL SUBSTANCES

O.N. Savchuk. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

In article the data on a quantitative exit of under abnormal condition chemically dangerous substances is cited at combustion of some materials and the technique of forecasting of zones of chemical infection is offered at fires on objects with such materials under the most adverse meteoconditions.

Key words: the forecasting, under abnormal condition chemically dangerous substance, concentration

В практике выявления последствий при авариях (разрушениях) химически опасных объектов (ХОО) исходят из наличия (образования в результате технологического процесса) на объектах определенного количества аварийно химических опасных веществ (АХОВ), последствия химического заражения от которых являются одним из критериев отнесения их к потенциально опасным объектам. В то же время существует множество объектов, на которых хранятся (или накапливаются в производстве) материалы, которые, не являясь в обычных условиях эксплуатации токсичными, при возгорании выделяют вредные вещества, в том числе АХОВ [1]. Целесообразно, исходя из наличия таких материалов на объекте, оценить возможные последствия воздействия образующихся АХОВ при пожаре на окружающую среду и определить границы зон химического заражения. Это позволит рассматривать их по классификации, установленной по степеням химической опасности ХОО, и определить границы санитарно-защитной зоны.

За основу расчета концентрации АХОВ на таких объектах может быть использована существующая «Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий» ОНД-86 Госкомгидромет.

Согласно [2] максимальное значение концентрации вредного вещества ($\text{мг}/\text{м}^3$) определяется по формуле:

$$C_m = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T}}, \quad (1)$$

где A – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы; M – масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени, г/с; F – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседающих вредных веществ в атмосферном воздухе; m и n – коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника выброса; H – высота источника выброса над уровнем земли (для наземных источников при расчетах принимается $H = 2$ м); η – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности, в случае ровной или слабопересеченной местности с перепадом высот, не превышающим 50 м на 1 км, $\eta = 1$, в остальных случаях определяется по таблице; ΔT – разность между температурой выбрасываемой газовой смеси T_r и температурой окружающего атмосферного воздуха T_b , °С; V_1 – расход газовой смеси, $\text{м}^3/\text{с}$, определяемый по формуле

$$V_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \omega_o, \quad (2)$$

где D – диаметр устья источника выброса, м; ω_o – средняя скорость выхода газовой смеси из устья источника выброса, м/с.

Значение коэффициента A , соответствующее неблагоприятным метеорологическим условиям, при которых концентрация вредных веществ в атмосферном воздухе максимальна, принимается равным:

- а) 250 – для Бурятии и Читинской области;
- б) 200 – для Европейской территории России южнее 50° с.ш., районов Нижнего Поволжья, Кавказа, Дальнего Востока, Сибири;
- в) 180 – для Европейской территории России и Урала от 50 до 52° с.ш., за исключением попадающих в эту зону перечисленных выше районов;
- г) 160 – для Европейской территории России и Урала севернее 52° с.ш. (за исключением центра ЕТС);
- д) 140 – для Московской, Тульской, Рязанской, Владимирской, Калужской, Ивановской областей.

Значение мощности выброса M (г/с) и расхода газовой смеси V_1 ($\text{м}^3/\text{с}$) определяется расчетом в технологической части проекта или принимается в соответствии с действующими для данного производства нормативами.

При определении ΔT , °С принимается температура окружающего атмосферного воздуха T_b , °С, равная средней максимальной температуре наружного воздуха наиболее жаркого (летом) и холодного (зимой) месяца года по СНиП 2.01.01-82, а T_r , °С – по действующим для данного производства технологическим нормативам.

Значение безразмерного коэффициента F для газообразных вредных веществ и мелкодисперсных аэрозолей [2] принимается равным 1.

Значения безразмерных коэффициентов m и n определяются в зависимости от параметров f , \mathcal{G}_m , \mathcal{G}'_m и f_e :

$$f = 1000 \cdot \frac{\omega_o^2 \cdot D}{H^2 \cdot \Delta T} \text{ (безразмерный);} \quad (3)$$

$$g_M = 0.65 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_1 \cdot \Delta T}{H}} \text{ м/с;}$$

$$g'_M = 1.3 \cdot \frac{\omega_o \cdot D}{H} \text{ (безразмерный);} \quad (4)$$

$$f_e = 800 \cdot (g'_M)^3 \text{ (безразмерный).}$$

Коэффициент m определяется в зависимости от f по формуле:

$$m = \frac{1}{0.67 + 0.1 \cdot \sqrt{f} + 0.34 \cdot \sqrt[3]{f}} \text{ при } f < 100 \quad (5)$$

$$m = \frac{1.47}{\sqrt[3]{f}} \text{ при } f \geq 100.$$

Для $f_e < f < 100$ значение коэффициента m вычисляется при $f = f_e$.

Коэффициент n при $f < 100$ определяется в зависимости от g_M по формулам:

$$\begin{aligned} n &= 1 \text{ при } g_M \geq 2; \\ n &= 0.532 \cdot g_M^2 - 2.13 \cdot g_M + 3.13 \text{ при } 0.5 \leq g_M < 2; \\ n &= 4.4 \cdot g_M \text{ при } g_M < 0.5. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, используя формулу (1) с учетом специфики процессов, возникающих при пожаре, можно рассчитать максимальное значение приземной концентрации АХОВ, образующихся при сгорании потенциально опасных материалов по формуле:

$$C_M = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K \frac{A \cdot M_{ij} \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T}}, \quad (7)$$

где $M_{ij} = Q_j \cdot m_{ij} \cdot S_{0 \text{ выг}j}$ (7а); M_{ij} – масса i -го АХОВ, выбрасываемая в атмосферу в единицу времени при сгорании j -го материала; Q_j – скорость выгорания, определяется по табл. 1, кг/м²·мин; m_{ij} – удельный выход i -го АХОВ при сгорании j -го материала, определяется по табл. 1, мг/г; $S_{0 \text{ выг}j}$ – площадь выгорания j -го материала в начальный период, м², которая будет зависеть от конфигурации укладки j -го материала и в упрощенном варианте может быть определена, как

$$S_{0 \text{ выг}j} = \frac{Q_{0j}^*}{\rho_j \cdot h_{ук}} + 2h_{ук} \left(l_{ук} + \frac{Q_{0j}^*}{\rho_j \cdot h_{ук} \cdot l_{ук}} \right),$$

где Q_{0j}^* – первоначальная масса j -го материала, т; ρ_j – плотность j -го материала, т/м³; $h_{ук}$ – высота укладки j -го материала, м; $l_{ук}$ – длина укладки j -го материала, м; V_l – расход газовоздушной смеси, определяемой по формуле

$$V_l = S_{выб} \cdot \omega_o,$$

где $S_{выб}$ – площадь источника выброса образующихся АХОВ (суммарная площадь проемов здания, в котором произошло возгорание материалов), определяемая как

$$S_{выб} = \sum S_{ок} + \sum S_{дв} + \sum S_{технпр},$$

где $\sum S_{ок}$ – суммарная площадь окон; $\sum S_{дв}$ – суммарная площадь дверей; $\sum S_{технпр}$ – суммарная площадь технологических проемов; N – количество АХОВ, образующиеся при возгорании из материалов j -й номенклатуры; K – количество j -х материалов, из которых при возгорании образуется АХОВ.

Таблица 1. Характеристика и количественный выход АХОВ при сгорании материалов

Материал	Плотность материала, кг/м ³	Наибольшая t ⁰ пожара, С ⁰	Скорость выгорания		Количественный выход вещества, м/г				
			весовая, кг/м ³ * мин	линейная, м/мин	оксид углерода СО	цианистый водород HCN	формальдегид СН ₂ О	СН ₂	СО ₂
Древесина сосны	500	1000	0,9	1,02	179		0,07	3,65	10 ³
Целлюлоза сульфатнар		1070			270	0,74	0,2	9,5	620
Лигнин		550			450	0,03			1031
ДСП	800	500	0,8	1,7	151		3,1	0,27	965
Фанера фсф	683	400			121		0,41		540
Бумага мешочная		510	0,64	0,5-1	193	0,02	0,01	3,41	2985
Пенополистирол		1100	0,86		70,5	11,8			2142,7
ППУ-317 пенополиуретан	500	6500	0,4	1	98,2				1022
ППУ-316 пенополиуретан	100	650	0,9	0,5	104,2	6,7			1033
Текстолит		850-865	0,4						
Древесина сосновая в виде пиломатериалов	461	1300	6,7		179		0,07	3,65	10 ³
Древесина (мебель)			0,84						
Карболитовые изделия		530	0,5-0,8	1,5-2					
Картон		400	1	1,1	229	0,27	0,43	0,93	583
Поливинилхлоридные пленки ПВХ		600			0,02				
Линолеум ПВХ		600	0,7	1	20				
Резина			0,67	0,12					
Полиэтилен			0,62						

Винипласт					15				
Волокно ПВХ			0,4	0,8	50				
Декоративно-отделочная пленка					150				
Хлопок/Хлоп.+капрон			1,3 0,75	2,52 1,68	5,2				570
Капрон (волокно)						4 49,5			
Кожа искусств.			0,35	0,9	36				
Нитрон (волокно)						85 128			
Полистирол		1100	0,864		15				
Фенол формальдегид полимеры: -лак БС; -наволоченный СФ-100; -резальный СФ-340					9,4 9 25				
Шерсть			0,3	0,36	150				
Чехольная ткань для отделки вагонов						6,8			

С учетом условий образования АХОВ при пожаре формулу (7) можно преобразовать к следующему виду:

$$C_M = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K \frac{A \cdot M_{ij} \cdot \eta}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V} \cdot \Delta T \cdot (0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{f} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{f})}, \quad (8)$$

так как согласно [2] для газообразных вредных веществ и мелкодисперсных аэрозолей принимаем $F=1$; при пожаре будут характерны условия, когда значение коэффициента $f < 100$, тогда m определяется по формуле (5); $n=1$ согласно формуле (6). Для определения ΔT температура выбрасываемой газовой смеси T_r определяется по табл. 1.

В общем случае с учетом изменения $S_{выгj}$ во время пожара C_M может быть определено на различное время t от момента возгорания, как

$$C_M = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K \frac{A \cdot \eta \cdot Q_j \cdot m_{ij} \int_0^t S_{выгj} dt}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V} \cdot \Delta T \cdot (0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{f} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{f})}. \quad (8a)$$

Расстояние X_M (м) от источника выброса, на котором приземная концентрация C ($\text{мг}/\text{м}^3$) при неблагоприятных метеоусловиях достигает максимального значения C_M , определяется по формуле [2] с учетом $F=1$ как:

$$X_M = d \cdot H,$$

где безразмерный коэффициент d при $f < 100$ находится по формулам:

$$\begin{aligned}
d &= 2.48(1 + 0,28\sqrt[3]{f_e}) \text{ при } \mathcal{G}_M \leq 0.5; \\
d &= 4.95 \cdot \mathcal{G}_M (1 + 0,28\sqrt[3]{f}) \text{ при } 0.5 < \mathcal{G}_M \leq 2; \\
d &= 7 \cdot \sqrt{\mathcal{G}_M} (1 + 0,28\sqrt[3]{f}) \text{ при } \mathcal{G}_M > 2.
\end{aligned} \tag{9}$$

В условиях пожара в связи $S_{выб} \geq 1 \text{ м}^2$ и $H \leq 3 \text{ м}$ согласно (4) значение d будет определяться по формуле (9), так как $\mathcal{G}_M > 2$.

Значение опасной скорости U_M (м/с) на уровне флюгера, при которой достигается наибольшее значение приземной концентрации АХОВ в случае $f < 100$, вычисляется по формуле:

$$U_M = \mathcal{G}_M (1 + 0,12\sqrt{f}) \text{ при } \mathcal{G}_M > 2. \tag{10}$$

В общем случае C_{MU} при неблагоприятных метеоусловиях и скорости ветра U (м/с), определяется по формуле:

$$C_{MU} = r \cdot C_M,$$

где r – безразмерная величина, определяемая в зависимости от отношения U/U_M по формулам

$$r = 0.67 \cdot (U/U_M) + 1.67 \cdot (U/U_M)^2 - 1.34 \cdot (U/U_M)^3 \text{ при } U/U_M \leq 1;$$

$$r = \frac{3 \cdot (U/U_M)}{2 \cdot (U/U_M)^2 - (U/U_M) + 2} \text{ при } U/U_M > 1.$$

С учетом $U/U_M \leq 1$ (неблагоприятные условия) и формулы (10)

$$C_{MU} = [0.67 \cdot (U/U_M) + 1.67 \cdot (U/U_M)^2 - 1.34 \cdot (U/U_M)^3] \cdot C_M. \tag{11}$$

В этом случае расстояние от источника выброса X_{MU} (м), на котором при скорости ветра U и неблагоприятных метеоусловиях приземная концентрация АХОВ достигает максимального значения C_{MU} , определяется по формуле:

$$X_{MU} = P_3 \cdot d \cdot H,$$

где P_3 – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от отношения U/U_M по формулам:

$$P_3 = 3 \text{ при } U/U_M \leq 0,25;$$

$$P_3 = 8,43 \cdot (1 - U/U_M)^5 + 1 \quad \text{при} \quad 0,25 < U/U_M \leq 1.$$

Принимая наихудшие условия:

$$X_{MU} = 3 \cdot d \cdot H. \quad (12)$$

При опасной скорости ветра U_M для низких и наземных источников (H не более 10 м) при значениях $X/X_M \leq 1$ концентрация C_{U_M} по оси факела выброса на различных расстояниях X от источника выброса определяется по формуле:

$$C_{U_M} = C_M \cdot S_1^H,$$

где S_1^H – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от отношения X/X_M и H по формуле:

$$S_1^H = 0,125 \cdot (10 - H) + 0,125 \cdot (H - 2) \cdot S_1 \quad \text{при} \quad 2 \leq H < 10;$$

$$S_1 = 3 \cdot (X/X_M)^4 - 8 \cdot (X/X_M)^3 + 6 \cdot (X/X_M)^2 \quad \text{при} \quad X/X_M \leq 1.$$

Концентрация АХОВ в атмосфере C_Y на расстоянии y (м) по перпендикуляру к оси факела выброса будет определяться по формуле:

$$C_Y = S_2 \cdot C_{MU}, \quad (13)$$

где S_2 – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от скорости ветра U и отношения y/x по значению аргумента t_y :

$$t_y = \frac{U \cdot y^2}{x^2} \quad \text{при} \quad U \leq 5; \quad (14)$$

$$t_y = \frac{5 \cdot y^2}{x^2} \quad \text{при} \quad U > 5; \quad (15)$$

по формуле:

$$S_2 = \frac{1}{(1 + 5 \cdot t_y + 12,8 \cdot t_y^2 + 17 \cdot t_y^3 + 45,1 \cdot t_y^4)^2}. \quad (16)$$

Определение суммарной концентрации АХОВ по формуле (8) не дает возможности проведения оценки поражающего действия, так как нет нормативных данных по ПДК суммарной концентрации различных АХОВ, что затрудняет проведение выявления и оценки обстановки.

В этих условиях предлагается вести расчет C_M по каждому из образующихся АХОВ при сгорании k материалов, а затем рассчитать приведенную суммарную концентрацию к одному из N АХОВ, то есть:

$$C_{Mnp}^1 = C_M^1 + C_M^2 \cdot \frac{ПДК_1}{ПДК_2} + \dots + C_M^N \cdot \frac{ПДК_1}{ПДК_N} \quad (17)$$

Далее согласно формуле (24) определяется максимальное значение концентрации C_{MU} при неблагоприятных метеоусловиях и скорости ветра U на расстоянии X_M

$$C_{MU} = [0.67 \cdot (U/U_M) + 1.67 \cdot (U/U_M)^2 - 1.34(U/U_M)^3] \cdot C_{Mnp}^1,$$

Учитывая изменения концентрации при прохождении облака по закону Гаусса и используя известное соотношение [8]

$$C_x = C_M \exp [-(X/\Gamma_{пор}) \ln (C_M/C_n)],$$

где C_x – концентрация на расстоянии X от рассматриваемой точки до очага аварии, мг/л; $\Gamma_{пор}$ – глубина зоны заражения, м; C_M – концентрация в очаге аварии, мг/л; C_n – концентрация, соответствующая пороговой токсодозе, определяемая как $D_n/30$ [8], можно определить глубину заражения при неблагоприятных метеоусловиях с учетом формулы (12), как

$$\Gamma_{пор} = \frac{3dH \cdot \ln \frac{C_M}{C_n}}{\ln \frac{C_M}{C_{MU}}}, \quad (18)$$

а глубину смертельного заражения, как

$$\Gamma_{см} = \Gamma_{пор} \frac{\ln \frac{C_M}{C_{см}}}{\ln \frac{C_M}{C_n}}, \quad (19)$$

где $C_{см}$ – значение смертельной концентрации.

Влияние застройки зданий и сооружений на распространение облака ЗВ связано с изменением характера воздушных течений вблизи зданий. При обтекании отдельных зданий или их групп могут образовываться ветровые тени (застойные зоны) с близкой к нулю средней скоростью ветра и интенсивным турбулентным перемешиванием.

Расчет заражения воздуха с учетом влияния застройки производится в случаях, когда здания удалены от места пожара опасного объекта на расстояние меньше x_M или когда источник образования АХОВ при пожаре расположен в зонах возможного образования ветровых теней.

В этом случае глубина заражения $\Gamma'_{пор}$ с учетом влияния застройки будет определяться по формуле

$$\Gamma'_{\text{пор}} = \Gamma_{\text{н. зас}} + (\Gamma_{\text{пор}} - \Gamma_{\text{н. зас}}) \eta_M,$$

где η_M – поправка, учитывающая влияние застройки [5]; $\Gamma_{\text{н. зас}}$ – удаление начала жилой застройки в городе по направлению ветра от объекта, м; $\Gamma_{\text{пор}}$ – глубина заражения АХОВ при сгорании материалов на объекте без учета рельефа местности и застройки, м.

Используя формулу (13) и (16) и соотношения (14) и (15), определяем расстояние y по перпендикуляру к оси факела выброса на удалении $\Gamma_{\text{пор}}$. Вначале путем несложных преобразований, используя формулы (13) и (16,) определяется аргумент t_y из решения уравнения

$$45,1 \cdot t_y^4 + 17 \cdot t_y^3 + 12,8 \cdot t_y^2 + 5 \cdot t_y + 1 = \sqrt{\frac{C_{MU}}{C_n}},$$

где C_n – значение пороговой концентрации АХОВ, выбранной из i -го количества АХОВ j -го материала для расчета суммарной концентрации от всех i -х АХОВ.

Затем, используя соотношения (14) и (15), определяем значение y (м), как

$$y = \sqrt{\frac{t_y \cdot \Gamma_{\text{пор}}^2}{U}} \quad \text{при } U \leq 5;$$

$$y = \sqrt{\frac{t_y \cdot \Gamma_{\text{пор}}^2}{5}} \quad \text{при } U > 5.$$

Анализ рассчитанных значений y в зависимости от U в интервале от 2 до 5 м/с показывает на их линейную зависимость при устойчивом ветре, с 6 до 15 м/с от U не зависит, что позволяет определить ориентировочно угол распространения выделяющихся АХОВ при пожаре φ (табл. 2), как

$$\varphi = 2 \arctg \frac{y}{\Gamma_{\text{пор}}}.$$

Таблица 2. Ориентировочное значение угла распространения φ

Скорость ветра м/с										
0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10–15
φ , град.										
93	62	43	34	28	26	26	26	26	26	26

Таким образом, определив глубину смертельного и порогового заражения по формулам (18), (19), а также угол φ по табл. 2, можно нанести зону химического заражения при пожаре на карту.

Оценка химической обстановки включает:

Определение времени подхода дымообразующегося токсического облака к объекту осуществляется по формуле

$$t_{\text{п. об.}} = R/V_{\text{п}},$$

где R – расстояние от источника пожара до объекта, км; $V_{п}$ – скорость распространения облака, определяемая по таблице [7], км/ч.

1. Расчет возможных потерь населения предлагается осуществлять по формулам

$$\begin{aligned} \Pi_{см} &= \frac{\pi \cdot \varphi}{360^0} \{ [\Gamma_{н.зас} + (\Gamma_{см} - \Gamma_{н.зас}) \cdot \eta_m]^2 - \Gamma_{н.зас}^2 \} \cdot \Delta \cdot K_3, \\ \Pi_{пор} &= \frac{\pi \cdot \varphi}{360^0} \{ [(\Gamma_{н.зас} + (\Gamma_{пор} - \Gamma_{н.зас}) \cdot \eta_m)]^2 - \Gamma_{н.зас}^2 \} \cdot \Delta \cdot K_3, \\ \Pi_{сан} &= \Pi_{пор} - \Pi_{см}, \end{aligned} \quad (20)$$

где $\Pi_{см}$ – возможные смертельные потери населения, чел; $\Pi_{пор}$ – возможные общие потери населения, чел; $\Pi_{сан}$ – возможные санитарные потери населения, чел; $\Gamma_{см}$ – глубина распространения облака смертельного заражения АХОВ, м; $\Gamma_{пор}$ – глубина распространения облака порогового заражения АХОВ, м; $\Gamma_{н.зас}$ – начало жилой застройки, м; Δ – плотность населения, чел/м²; φ – угол зоны химического заражения, град; K_3 – коэффициент защиты населения; η_m – коэффициент, учитывающий условия застройки или шероховатости местности, определяемый по таблице [5].

3. Определение продолжительности поражающего действия, которое будет соответствовать наибольшему времени полного сгорания одного из j -х материалов или времени ликвидации пожара, осуществляется по формуле

$$T_{п.д.} = \min (t_{выг}, t_{лп}), \quad (21)$$

где $t_{выг} = \max_{j=1}^k t_{выг_j}$ – наибольшее время полного выгорания одного из всех K материалов, определяемого как

$$t_{выг_j} = \frac{M_j}{S_{выг_j} \cdot Q_j}, \quad (22)$$

где M_j – количество j -го материала, кг; $t_{лп}$ – время ликвидации пожара, мин.

4. Определение площади возможного химического заражения проводится согласно формулам

$$\begin{aligned} S_{пор} &= \frac{\pi \cdot \varphi}{360^0} \{ [\Gamma_{н.зас} + (\Gamma_{см} - \Gamma_{н.зас}) \cdot \eta_m]^2 - \Gamma_{н.зас}^2 \} \cdot M^2; \\ S_{см} &= \frac{\pi \cdot \varphi}{360^0} \{ [(\Gamma_{н.зас} + (\Gamma_{пор} - \Gamma_{н.зас}) \cdot \eta_m)]^2 - \Gamma_{н.зас}^2 \} \cdot M^2. \end{aligned} \quad (23)$$

Рассмотрим расчет зон опасного токсического распространения заражения воздуха на примере: на предприятии возник пожар, в одном из помещений которого хранится 20 т целлюлозы сульфатной. С учетом площади четырех окон и двери площадь выброса токсических веществ из помещения составляет $S_{выб} = 22 \text{ м}^2$, площадь выгорания $S_{выг} = 100 \text{ м}^2$, среднюю скорость выхода газовой смеси из проемов источника выброса принимаем $\omega_0 = 7 \text{ м/с}$, температура пожара согласно таблице 1 равна $1020 \text{ }^\circ\text{C}$, температура окружающего воздуха $+20 \text{ }^\circ\text{C}$, высота выброса $H = 3 \text{ м}$, местность слабо пересеченная, скорость ветра $U = 2 \text{ м/с}$.

Согласно (8) определяем максимальное значение концентрации АХОВ, образующихся при сгорании целлюлозы. Согласно табл. 1 при горении целлюлозы образуются следующие АХОВ: оксид углерода CO , цианистый водород HCN , акролеин CH_2 , формальдегид CH_2O .

Вначале определяем массу этих АХОВ, выбрасываемых в атмосферу в единицу времени согласно (7а)

$$M_{CO}^u = \frac{100 \cdot 270 \cdot 0,64}{60} = 288 \text{ г/с};$$

$$M_{HCN}^u = \frac{100 \cdot 0,74 \cdot 0,64}{60} = 0,79 \text{ г/с};$$

$$M_{CH_2O}^u = \frac{100 \cdot 0,2 \cdot 0,64}{60} = 0,21 \text{ г/с};$$

$$M_{CH_2}^u = \frac{100 \cdot 9,5 \cdot 0,64}{60} = 10,13 \text{ г/с}.$$

Согласно табл. 1 значение коэффициента А принимаем равным 160, по формуле (2)
 $V_1 = 22 \cdot 7 = 154 \text{ м}^3/\text{с}$, $\Delta T = 1020 - 20 = 1000^\circ \text{C}$, по формуле (3)

$$f = 1000 \cdot \frac{7^2 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 22}{3,14}}}{9 \cdot 1000} = 28,82, \quad \eta = 1, \quad \text{так как местность пересеченная.}$$

$$C_{M_{CO}}^{\text{CO}} = \frac{160 \cdot 288 \cdot 1}{9 \cdot \sqrt[3]{154 \cdot 1000} \cdot (0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{28,82} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{28,82})} = 42,453 \text{ г/м}^3;$$

$$C_{M_{HCN}}^{\text{HCN}} = \frac{160 \cdot 0,79 \cdot 1}{9 \cdot \sqrt[3]{154 \cdot 1000} \cdot (0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{28,82} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{28,82})} = 0,114 \text{ г/с};$$

$$C_{M_{CH_2O}}^{\text{CH}_2O} = \frac{160 \cdot 0,21 \cdot 1}{9 \cdot \sqrt[3]{154 \cdot 1000} \cdot (0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{28,82} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{28,82})} = 0,03 \text{ г/с};$$

$$C^{CH_2} = \frac{160 \cdot 10,13 \cdot 1}{9 \cdot \sqrt[3]{154 \cdot 1000} \cdot (0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{28,82} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{28,82})} = 1,493 \text{ г/м}^3.$$

Согласно (17)

$$C_{M_{CO}} = C_{M_{CO}}^{\text{CO}} + C_{M_{HCN}}^{\text{HCN}} \frac{C_{CO}^n}{C_{HCN}^n} + C_{M_{CH_2O}}^{\text{CH}_2O} \cdot \frac{C_{CO}^n}{C_{CH_2O}^n} +$$

$$C_{M_{CH_2}}^{\text{CH}_2} \cdot \frac{C_{CO}^n}{C_{CH_2}^n} = 42,453 + 0,114 \cdot \frac{10}{0,2} + 0,03 \cdot \frac{10}{0,6} + 1,493 \cdot \frac{10}{0,2} = 123,3 \text{ г/м}^3 \approx 123 \text{ мг/л}.$$

Расстояние X_M от источника выброса, на котором C_M достигает максимального значения при неблагоприятных метеоусловиях согласно (12), будет равно

$$X_M = 3 \cdot d \cdot H = 3 \cdot 64,1 \cdot 3 = 577 \text{ м}$$

$$d = 7 \cdot \sqrt{v_M} \cdot (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{f}) = 7 \cdot \sqrt{24,31} (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{28,82}) = 64,1$$

$$v_M = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_1 \cdot \Delta T}{H}} = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{154 \cdot 1000}{3}} = 24,31.$$

Согласно (11)

$$C_{MU} = C_{Mц} \cdot \left[0,67 \cdot \left(\frac{U}{U_M} \right) + 1,67 \cdot \left(\frac{U}{U_M} \right)^2 - 1,34 \cdot \left(\frac{U}{U_M} \right)^3 \right] = 4,52 \text{ мг/л},$$

при $U = 2 \text{ м/с}$ и согласно (10) $U_M = \mathcal{G}_M \cdot (1 + 0,12 \cdot \sqrt{f}) \approx 40 \text{ м/с}$.

Значения концентрации пороговой C_p и смертельной $C_{см}$ определяем по величине пороговой $PC_{t_{50}}$ и смертельной $LC_{t_{50}}$ токсодозам окиси углерода (СО), определяемой по таблице [10], как

$$C_p = PC_{t_{50}}^{CO} / 30 = \frac{10 \text{ мг} \cdot \text{мин} / \text{л}}{30 \text{ мин}} = 0,33 \text{ мг/л}, \quad C_{см} = LC_{t_{50}}^{CO} / 30 = \frac{37,5 \text{ мг} \cdot \text{мин} / \text{л}}{30 \text{ мин}} = 1,25 \text{ мг/л}.$$

Согласно формулам (18) и (19) определяем глубину порогового и смертельного химического заражения на открытой местности

$$\Gamma_{пор} = \frac{3 \cdot 64,1 \cdot 3 \text{Ln}123,3 / 0,333}{\text{Ln}123,3 / 4,52} = 1034 \text{ м};$$

$$\Gamma_{см} = 1034 \frac{\text{Ln}123,3 / 1,25}{\text{Ln}123,3 / 0,333} = 801 \text{ м}.$$

Согласно таблице 2 угол распространения токсического облака составляет $\varphi = 43^\circ$.

Оценим последствия пожара на объекте (условия предыдущего примера по выявлению обстановки), если удаление 5-этажной жилой застройки с линейным расположением домов от объекта $\Gamma_{н.зас} = 300 \text{ м}$, плотность населения $0,01 \text{ чел/м}^2$, 70 % населения расположены открыто, 30 % – в жилых зданиях, время ликвидации пожара ориентировочно 30 мин.

1. Определяем время подхода токсического облака к жилой застройке

$$t_{п.об.} = 0,3 \sqrt{10} = 0,95 \text{ ч} = 1,8 \text{ мин}.$$

2. Определяем потери согласно формулам (20)

$$П_{пор} = \frac{3,14 \cdot 43}{360} \{ [300 + (1034 - 300) \cdot 0,31]^2 - 300^2 \} \cdot 0,01 \cdot (0,7 + 0,3 \sqrt{12}) = 862 \text{ чел.};$$

$$П_{см} = \frac{3,14 \cdot 43}{360} \{ [300 + (801 - 300) \cdot 0,31]^2 - 300^2 \} \cdot 0,01 \cdot (0,7 + 0,3 \sqrt{12}) = 642 \text{ чел}.$$

где $K_3 = 1$ – при открытом расположении; $K_3 = 12$ – при расположении населения в зданиях при времени действия АХОВ 15 мин согласно таблице [9]

$$П_{сан} = 862 - 642 = 220 \text{ чел}.$$

3. Определяем время поражающего действия согласно формулам (21) и (22)

$$T_{п.д.} = \min(312,5; 30) = 30 \text{ мин};$$

$$t_{выг} = \frac{20000}{0,64 \cdot 100} = 312,5 \text{ мин}.$$

4. Согласно формулам (23) определяем площади возможного заражения

$$S_{\text{пор}} = \frac{3,14 \cdot 43}{360} [300 + (1034 - 300) \cdot 0,31]^2 = 118945 \text{ м}^2;$$
$$S_{\text{см}} = \frac{3,14 \cdot 43}{360} [300 + (801 - 300) \cdot 0,31]^2 = 88603 \text{ м}^2.$$

На основе предлагаемой методики выявления последствий токсического заражения воздуха при пожарах на объектах с материалами, при возгорании которых возможно образование АХОВ, можно оценить риски токсического поражения на такого рода объектах населения, персонала и сотрудников ГПС, принимающих участие в ликвидации последствий.

Литература

1. Иличкин В.С., Леонович А.А., Яненко М.В. Термические превращения и токсичность продуктов горения древесины. Обзор. информ. Вып. 8/90. М.: МВД, Главный информ. 1990.
2. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий ОНД-86. Л.: Госкомгидромет, 1986.
3. Замышляев Б.В.. Влияние начальных размеров объемных источников выброса (истечения) невесомой примеси на оценку концентрационных полей, возникающих при распространении облаков гауссового типа // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 2006. № 3.
4. Савчук О.Н. Особенности прогнозирования аварий на химически опасных объектах, содержащих технологическое оборудование с аварийно химически опасными веществами в помещениях // Проблемы управления рисками в техносфере. 2009. № 3 (11).
5. Савчук О.Н. Пути совершенствования методики прогнозирования аварий на химически опасных объектах с учетом особенностей застройки населенных пунктов // Проблемы безопасности в энергетике: материалы науч.-метод. семинара «Проблемы риска в техносциальных сферах». Вып. 8. СПб.: СПбГТУ, 2009.
6. Быков П.Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере. М.: Academia, 2003.
7. Савчук О.Н. Методика выявления последствий чрезвычайных ситуаций мирного и военного времени: учеб. пособ. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2007.
8. Мастрюков Б.С., Овчинникова Т.И. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Прогнозирование и оценка обстановки при ЧС: учеб.-метод. пособие. М.: МГИ стали и сплавов, Технологич. ун.-т, изд-во «Учеба», 2004.
9. Капустин С.Ю., Малахов В.И. Методическое пособие по прогнозированию и оценке химической обстановки в чрезвычайных ситуациях. Иваново: ИГТА, 2001.
10. Методика оценки последствий аварийных выбросов опасных веществ (методика «Токси»). 5-е изд. М.: Промышленная безопасность, 2005.

