

О. Н. САВЧУК, канд. техн. наук, профессор, профессор кафедры "Сервис безопасности" Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: oleg-savcuk@mail.ru)

В. П. КРЕЙТОР, канд. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой "Сервис безопасности" Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: serwis.bezopasnosti2010@yandex.ru)

А. А. АКСЕНОВ, адъюнкт кафедры "Сервис безопасности" Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: serwis.bezopasnosti2010@yandex.ru)

УДК 658.382.3

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ РИСКА ХИМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ АХОВ АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ

На основе анализа существующих методик прогнозирования последствий химических аварий выявлены недостатки и неправомерные допущения по площади разлива и инфильтрации аварийно-химически опасных веществ (АХОВ) в подстилающую поверхность. По результатам эксперимента рассчитаны коэффициенты, уточняющие площадь разлива основных видов АХОВ и степень их инфильтрации в подстилающую поверхность. Приведена усовершенствованная методика оценки риска последствий химических аварий с учетом коэффициентов растекания и инфильтрации АХОВ, а также ее программная реализация на ЭВМ. Дана сравнительная оценка правомерности предложенной методики на примере оценки риска химической опасности на маршруте перевозки АХОВ автомобильным транспортом.

Ключевые слова: риск химической опасности; аварийно-химически опасное вещество; площадь разлива; инфильтрация; подстилающая поверхность; методика прогнозирования.

DOI: 10.18322/PVB.2018.27.10.46-55

Введение

Основу анализа химической безопасности территорий составляет оценка риска при авариях на химически опасных объектах (ХОО) и построение полей риска химической опасности. Анализ риска при чрезвычайных ситуациях базируется на разработке и совершенствовании методов прогнозирования возможных последствий ЧС. В настоящее время существует множество методик оценки риска химической опасности и прогнозирования последствий аварий, связанных с выбросом аварийно-химически опасных веществ (АХОВ).

В методиках, приведенных в работах [1–21], принят ряд допущений, не учитывающих множество факторов, влияющих на результаты расчетов. Так, например, допущение, что площадь разлива АХОВ идентична площади разлива нефтепродуктов [14], является некорректным, что обусловлено различием коэффициентов вязкости и химического состава АХОВ. Кроме того, не учитывается степень проникновения АХОВ в подстилающую поверхность, что приводит к завышенным значениям глубины заражения и риска химической опасности. В связи с

этим цель написания настоящей статьи — показать пути совершенствования известных методик прогнозирования и оценки риска химической опасности для повышения точности результатов прогнозирования и оценки риска. Данная задача достигается путем использования в расчетах глубины зон химического заражения коэффициента поверхности растекания, уточняющего площадь разлива основных типов АХОВ, и коэффициента инфильтрации этих АХОВ с учетом особенностей подстилающей поверхности, полученных на основе экспериментальных данных.

Методология

Исходя из анализа методик оценки риска химической опасности при аварии на подвижных ХОО, в качестве объекта исследования была взята методика, приведенная в работе [14]. В основе расчета риска на подвижных ХОО требуется знание вероятности нахождения человека в зоне опасности, частоты возникновения аварий (разрушений) на подвижных ХОО, условной вероятности поражения человека при попадании в зону химического заражения.

© Савчук О. Н., Крейтор В. П., Аксенов А. А., 2018

Вероятность пребывания человека в зоне химического заражения определяют исходя из производственной деятельности персонала, поэтому расчет условной вероятности поражения или математического ожидания ущерба от негативного воздействия АХОВ представляет определенную трудность, связанную с токсическим воздействием на человека различных по физико-химическим свойствам типов АХОВ и неодинаковым временем экспозиции в зависимости от их пребывания в зоне химического заражения, а также физиологической восприимчивости различного по возрасту контингента.

Условная вероятность поражения человека R_i при нахождении в зоне химического заражения с учетом высоты подъема облака будет в основном определяться зоной поражения, образованной за счет распространения зараженного облака на населенный пункт, как на участке торможения, так и в районе аварийной остановки транспорта с АХОВ [14]:

$$R_i = \frac{S_{п.т} + S_{п.ост}}{S_{пп}}, \quad (1)$$

где $S_{п.т}$ — площадь порогового химического поражения на участке торможения, км²;

$S_{п.ост}$ — площадь порогового химического поражения в районе аварийной остановки транспорта с АХОВ, км²;

$S_{пп}$ — площадь населенного пункта, км².

Таким образом, при расчете риска химической опасности на объектах такого рода одним из важных аспектов является определение достоверных значений глубины порогового и смертельного химического заражения и высоты подъема их облака.

В методике [14] рассматривается ситуация, когда, несмотря на образование пробойны (трещины) в днище или боковой части резервуара с АХОВ, автоцистерна продолжает движение. Разлив АХОВ через пробойну в этом случае будет происходить до остановки поврежденного автотранспорта.

Большое значение имеет оценка достоверной ширины разлива АХОВ и его высоты $h_{разл}$ на участке торможения, которые будут определяться количеством АХОВ, разлитого на этом участке пути m_t до аварийной остановки поврежденного транспорта, и временем испарения (поражающего действия), что в конечном счете влияет на глубину химического заражения.

Принятое в методике [3] допущение $h_{разл} = 0,05$ м неправомерно на участке торможения вследствие незначительного количества разлитого АХОВ m_t при небольшой степени разгерметизации на сравнительно длинном пути торможения. Исходя из этого следует определять высоту разлива АХОВ на подстилающую поверхность с учетом ширины и длины участка разлива, плотности АХОВ. Однако до-

пущение, принятое в методике [14], о том, что определение ширины разлива АХОВ тождественно разливу нефтепродуктов (1 л разливается на 0,15 м² дороги), также не соответствует действительности в силу различных физико-химических свойств АХОВ.

При остановке транспорта происходит разлив остального количества АХОВ $m_{ост}$, содержащегося в резервуаре: либо до полного его истечения при расположении отверстия в днище ($h_{отв} = 0$), либо частично при расположении пробойны в боковой стенке ($h_{отв} > 0$), либо до момента герметизации отверстия.

Глубину химического заражения $\Gamma_{расч}$ (м) принято определять согласно [14] по формуле

$$\Gamma_{расч} = \min \{ \Gamma_{п}(\Gamma_{см}); \Gamma_{пер} \}, \quad (2)$$

где $\Gamma_{п}$ — глубина заражения при пороговой степени поражения, м;

$$\Gamma_{п} = 0,95^{1+b+d} \sqrt{\frac{m}{0,13 (2\pi)^{3/2} a c C_{п}}} K_b K_t; \quad (3)$$

$\Gamma_{см}$ — глубина заражения при смертельной степени поражения, м;

$$\Gamma_{см} = 0,95^{1+b+d} \sqrt{\frac{m}{0,13 (2\pi)^{3/2} a c C_{см}}} K_b K_t; \quad (4)$$

m — масса АХОВ, разлитого на участке торможения m_t , или масса АХОВ, разлитого в районе аварийной остановки $m_{ост}$, кг;

a, b, c, d — коэффициенты степенных моделей дисперсии, определяемые по табл. 1 приложения 2 [22];

$C_{п}, C_{см}$ — концентрация соответственно порогового и смертельного поражения рассматриваемого типа АХОВ, г/м³;

K_b — коэффициент зависимости глубины заражения от скорости ветра;

K_t — коэффициент влияния температуры воздуха на глубину заражения АХОВ;

$\Gamma_{пер}$ — глубина переноса облака химического заражения, м.

Параметр $\Gamma_{пер}$ определяется по формуле [14]:

$$\Gamma_{пер} = U_{п} T_{п.д}, \quad (5)$$

где $U_{п}$ — скорость переноса переднего фронта облака при данных скорости ветра и степени вертикальной устойчивости воздуха, км/ч; определяется по табл. 2 приложения 1 [14];

$T_{п.д}$ — время поражающего действия, ч; определяется по формуле (4.94) [14].

Высота поражающего подъема облака с учетом укрытия населения в зданиях вычисляется по формулам:

- при пороговой степени поражения

$$H_{\Pi} = c \Gamma_{\Pi} \sqrt{2 \ln \frac{m \rho_{\text{в}} (1 - e^{-k_{\text{в}} t_{\text{лок}}})}{\rho_{\text{г}} \cdot 0,13 (2\pi)^{3/2} C_{\Pi} a c \Gamma_{\Pi}^{1+b+d}}}; \quad (6)$$

- при смертельной степени поражения

$$H_{\text{см}} = c \Gamma_{\text{см}} \sqrt{2 \ln \frac{m \rho_{\text{в}} (1 - e^{-k_{\text{в}} t_{\text{лок}}})}{\rho_{\text{г}} \cdot 0,13 (2\pi)^{3/2} C_{\text{см}} a c \Gamma_{\text{см}}^{1+b+d}}}, \quad (7)$$

где $\rho_{\text{в}}$, $\rho_{\text{г}}$ — плотность соответственно воздуха и газа типа АХОВ, кг/м³;

$k_{\text{в}}$ — кратность воздухообмена жилых помещений здания, ч⁻¹;

$t_{\text{лок}}$ — время локализации аварии, мин.

Совершенствование методики оценки риска должно предусматривать реалии транспортировки АХОВ автомобильным транспортом, возможную частичную разгерметизацию в случае террористических актов, учет достоверной массы разлива АХОВ.

Одними из основных параметров, влияющих на глубину вторичного облака заражения в результате аварии на ХОО с разливом АХОВ, является площадь разлива, высота слоя жидкости (толщина пленки разлива) и степень инфильтрации АХОВ в подстилающую поверхность. Определение реальной площади разлива АХОВ сопряжено с рядом трудностей из-за широкого спектра АХОВ, обладающих различными физическими свойствами, а толщина слоя жидкости может быть различной и зависеть от типа подстилающей поверхности.

Одним из путей решения проблемы влияния характера разлива АХОВ и степени проникновения его в подстилающую поверхность на результаты прогнозирования глубины химического заражения является экспериментальное определение площади разлива и степени инфильтрации АХОВ в подстилающую поверхность, что позволит рассчитать поправочные коэффициенты — поверхности растекания $K_{\text{п.ху}}$ и инфильтрации $K_{\text{инф.т}}$.

Коэффициент поверхности растекания учитывает влияние геометрических параметров разлива АХОВ у-го типа по подстилающей поверхности х-го типа и определяется по формуле

$$K_{\text{п.ху}} = \frac{S_{\text{разл.под.пов.ху}}}{S_{\text{разл.ид.пов.у}}}, \quad (8)$$

где $S_{\text{разл.под.пов.ху}}$ — площадь разлива АХОВ у-го типа по подстилающей поверхности х-го типа, м²;

$S_{\text{разл.ид.пов.у}}$ — площадь разлива АХОВ у-го типа по идеальной поверхности (стеклу), м².

Коэффициент инфильтрации [23] определяется с учетом времени экспозиции t_3 с момента разлива на подстилающую поверхность и доли разлитой

массы АХОВ, участвующей в образовании зараженного облака, в зависимости от типа подстилающей поверхности, физических и химических свойств АХОВ:

$$K_{\text{инф.т}} = V(t_3)/V_{\text{нач}}, \quad (9)$$

где $V(t_3)$ — объем АХОВ в цилиндре на время экспозиции t_3 , м³;

$V_{\text{нач}}$ — начальный объем АХОВ в цилиндре, м³;

t_3 — время экспозиции, отсчитываемое от начала эксперимента, мин.

Результаты и их обсуждение

В целях определения $K_{\text{п.ху}}$ использовалась методика экспериментального исследования геометрических параметров разлива жидкостей [24]. На основе полученных в экспериментах данных проведен расчет коэффициентов поверхности растекания по формуле (8) основных типов АХОВ для подстилающих поверхностей (табл. 1).

В соответствии с выбранной методикой, описанной в работе [23], в полевых условиях определяли степень инфильтрации АХОВ в подстилающую поверхность и коэффициент инфильтрации $K_{\text{инф.т}}$, зависящий от количества АХОВ, оставшегося на поверхности после частичного просачивания в грунт за время экспозиции (5–30 мин). На основе экспериментальных данных произведен расчет коэффициентов инфильтрации по формуле (9), которые представлены в табл. 2.

В случае аварии с разливом АХОВ оперативное определение площади разлива играет ключевую роль при обеззараживании территории.

С учетом экспериментально установленного $K_{\text{п.ху}}$ площадь разлива АХОВ может быть определена по формуле

$$S_{\text{разл.ху}} = 3,14 (3,018 V_y^{0,393} \vartheta_y^{-0,116} t_{\text{рас}}^{0,115} K_{\text{п.ху}})^2, \quad (10)$$

где V_y — объем разлитого АХОВ у-го типа, м³;

ϑ_y — коэффициент кинематической вязкости АХОВ у-го вида, м²/с;

$t_{\text{рас}}$ — время растекания жидкости, мин.

Тогда высота разлива АХОВ у-го типа на подстилающую поверхность х-го типа $h_{\text{разл.ху}}$ (м) может быть определена с учетом $S_{\text{разл.ху}}$ по формуле

$$h_{\text{разл.ху}} = \frac{m_y}{\rho_{\text{ж.у}} S_{\text{разл.ху}}}, \quad (11)$$

где m_y — масса разлитого на подстилающую поверхность АХОВ у-го типа, кг;

$\rho_{\text{ж.у}}$ — плотность жидкости АХОВ у-го типа, кг/м³.

Таким образом, может быть реализован учет достоверного растекания АХОВ по подстилающей

Таблица 1. Коэффициент поверхности растекания $K_{п.ху}$ для основных типов АХОВ

Table 1. Spreading surface coefficient $K_{sur,xy}$ for the main types of chemically hazardous substance

Тип подстилающей поверхности Underlying surface	Сухая погода / Sunny						Дождь / Rain			
	$v_B = 0$ м/с $v_W = 0$ m/sec			$v_B = 5$ м/с $v_W = 5$ m/sec			$v_B = 0$ м/с $v_W = 0$ m/sec		$v_B = 5$ м/с $v_W = 5$ m/sec	
	$t_0 = 20$ °C	$t_0 = 0$ °C	$t_0 = -5$ °C	$t_0 = 20$ °C	$t_0 = 0$ °C	$t_0 = -5$ °C	$t_0 = 20$ °C	$t_0 = 0$ °C	$t_0 = 20$ °C	$t_0 = 0$ °C
<i>Аммиак / Ammonia</i>										
Песок / Sand	0,2090	0,2239	0,20404	0,2386	0,2185	0,20833	0,2044	0,2209	0,2225	0,2292
Асфальт / Asphalt	0,3023	0,3197	0,3051	0,2511	0,2762	0,3080	0,3002	0,3205	0,3129	0,3052
Чернозем / Chernozem	0,16531	0,1826	0,1758	0,1746	0,1573	0,1848	0,2068	0,2217	0,2046	0,2095
Серые лесные почвы / Gray forest soils	0,2057	0,2204	0,2060	0,1954	0,2151	0,2083	0,2202	0,2165	0,1870	0,2093
<i>Соляная кислота / Hydrochloric acid</i>										
Песок / Sand	0,1718	0,1692	0,1524	0,1917	0,1665	0,1623	0,2480	0,2283	0,2712	0,3112
Асфальт / Asphalt	0,2192	0,2222	0,2090	0,29722	0,2664	0,2367	0,3340	0,3244	0,3490	0,3540
Чернозем / Chernozem	0,1691	0,1540	0,1536	0,1921	0,1880	0,1708	0,2060	0,2042	0,2244	0,2220
Серые лесные почвы / Gray forest soils	0,1904	0,2018	0,1799	0,2092	0,1905	0,1861	0,2278	0,2300	0,2887	0,2887
<i>Серная кислота / Sulfuric acid</i>										
Песок / Sand	0,4390	0,4142	0,2146	0,5161	0,4719	0,2370	0,3651	0,3402	0,4729	0,4417
Асфальт / Asphalt	0,4604	0,4848	0,3196	0,4559	0,4534	0,3456	0,4592	0,4351	0,4770	0,4515
Чернозем / Chernozem	0,3202	0,2979	0,1949	0,4529	0,3820	0,2347	0,2637	0,2131	0,3127	0,2716
Серые лесные почвы / Gray forest soils	0,2854	0,2714	0,1851	0,3482	0,2942	0,2282	0,2183	0,2017	0,2598	0,2541
<i>Хлор / Chlorine</i>										
Песок / Sand	0,17062	0,16410	0,1638	0,19111	0,16746	0,1667	0,2471	0,2339	0,2701	0,2741
Асфальт / Asphalt	0,21801	0,22051	0,2296	0,29333	0,26794	0,2505	0,3333	0,3266	0,3467	0,3514
Чернозем / Chernozem	0,1706	0,1538	0,1592	0,1924	0,1866	0,1797	0,2039	0,20161	0,2229	0,2278
Серые лесные почвы / Gray forest soils	0,19052	0,2000	0,1991	0,2066	0,1909	0,2268	0,2286	0,2258	0,2846	0,2818

Примечание. v_B — скорость ветра, t_0 — температура воздуха.

Note. v_W — wind speed, t_0 — temperature of air.

поверхности и тем самым определена реальная толщина пленки разлива АХОВ.

С учетом коэффициента инфильтрации уточняется масса АХОВ, подлежащая возможному испарению с подстилающей поверхности, так как часть АХОВ, впитавшаяся в нее, не будет участвовать в образовании вторичного облака заражения.

Количество жидкого АХОВ на участке торможения m_T (кг) с учетом степени инфильтрации за время разлива до остановки поврежденного транспорта определяется по формуле

$$m_T = \int_0^{t_{ист.т}} G(t) dt = K_{инф} t \times \left(G_0 t_{ист.т} - \frac{\rho_{ж.у} g \mu^2 S_{отв}^2}{2 S_{см}} t_{ист.т}^2 \right), \quad (12)$$

где $t_{ист.т}$ — время истечения АХОВ с момента разгерметизации емкости до остановки поврежденного транспорта, с; $t_{ист.т} = t_{р.в} + L_{т.п} / V_{торм}$;

$t_{р.в}$ — время реакции водителя, с;

$L_{т.п}$ — участок тормозного пути, м;

$V_{торм}$ — усредненная скорость торможения, м/с;

$V_{торм} = V_{тр} / 2$;

$V_{тр}$ — начальная скорость торможения, м/с;

G_0 — массовый расход в начальный момент времени, кг/с, определяемый по формуле [25]:

$$G_0 = \mu \rho_{ж.у} S_{отв} \sqrt{2g(h_0 - h_{отв})}; \quad (13)$$

μ — коэффициент истечения, принимаемый равным 0,6–0,8;

$S_{отв}$ — площадь отверстия, м²;

h_0 — начальная высота столба жидкости в емкости, м;

Таблица 2. Коэффициент инфильтрации $K_{\text{инф } t}$ для основных типов АХОВ**Table 2.** Infiltration coefficient $K_{\text{инф } t}$ for the main types of chemically hazardous substance

Тип подстилающей поверхности Underlying surface	Сухая погода / Sunny						Дождь / Rain					
	Время экспозиции, мин / Exposure time, min											
	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30
Аммиак / Ammonia												
Чернозем / Chernozem	0,469	0,396	0,349	0,320	0,298	0,277	0,662	0,611	0,566	0,525	0,491	0,469
Серые лесные почвы / Gray forest soils	0,749	0,673	0,619	0,559	0,507	0,468	0,874	0,827	0,794	0,754	0,711	0,676
Песок / Sand	0,771	0,708	0,667	0,625	0,584	0,562	0,872	0,805	0,759	0,721	0,669	0,637
Соляная кислота / Hydrochloric acid												
Чернозем / Chernozem	0,728	0,608	0,494	0,443	0,405	0,368	0,792	0,739	0,697	0,667	0,634	0,609
Серые лесные почвы / Gray forest soils	0,828	0,806	0,761	0,707	0,651	0,606	0,910	0,876	0,849	0,817	0,788	0,761
Песок / Sand	0,856	0,791	0,758	0,719	0,680	0,655	0,901	0,862	0,819	0,789	0,758	0,732
Серная кислота / Sulfuric acid												
Чернозем / Chernozem	0,414	0,349	0,312	0,272	0,233	0,203	0,592	0,524	0,489	0,452	0,424	0,379
Серые лесные почвы / Gray forest soils	0,536	0,498	0,448	0,404	0,381	0,359	0,649	0,611	0,562	0,527	0,502	0,479
Песок / Sand	0,618	0,584	0,551	0,521	0,476	0,436	0,723	0,681	0,636	0,601	0,554	0,523
Хлор / Chlorine												
Чернозем / Chernozem	0,441	0,367	0,330	0,289	0,249	0,215	0,705	0,624	0,583	0,538	0,505	0,452
Серые лесные почвы / Gray forest soils	0,579	0,538	0,485	0,437	0,414	0,389	0,773	0,727	0,669	0,628	0,598	0,570
Песок / Sand	0,669	0,630	0,592	0,560	0,509	0,464	0,861	0,810	0,757	0,716	0,659	0,623

$h_{\text{отв}}$ — высота расположения отверстия, м.

Количество разлитого АХОВ $m_{\text{ост}}$ с учетом степени инфильтрации после остановки поврежденно-го транспорта определяется по формуле

$$m_{\text{ост}} = K_{\text{инф } t} \left(\mu_{\text{ж } y} S_{\text{отв}} \sqrt{2g(h'_0 - h_{\text{отв}})} t_{\text{ост}} - \frac{\rho_{\text{ж } y} g \mu^2 S_{\text{отв}}^2}{2S_{\text{ем}}} t_{\text{ост}}^2 \right), \quad (14)$$

где h'_0 — высота столба жидкости в емкости на момент остановки, м;

$S_{\text{ем}}$ — площадь сечения емкости, м^2 ;

$t_{\text{ост}}$ — время, исчисляемое от момента торможения до остановки, с.

Количество АХОВ, разлитого в районе аварийной остановки, при полном истечении (разрушении) емкости с учетом степени инфильтрации определяется как

$$m_{\text{ост}} = K_{\text{инф } t} (Q_0 - m_{\text{т}}), \quad (15)$$

где Q_0 — начальная масса загрузки емкости, кг.

Представленная методика оценки риска химической опасности при перевозке АХОВ автомобильным транспортом была реализована [26] на языке программирования C# в среде Visual Studio на основе технологии .NET Framework.

Верификация предложенной методики была проведена по результатам сравнения расчета глубины химического заражения по программе “ТОКСИ” [27] на примере возможного варианта аварии. При перевозке аммиака автомобильным транспортом в результате террористического акта произошла разгерметизация цистерны с аммиаком массой 20 т, получившей пробойину площадью $0,04 \text{ м}^2$ в днище; начальная высота столба жидкости 1,5 м; скорость движения автотранспорта 60 км/ч; погода сухая, инверсия; температура воздуха 20°C ; скорость ветра 1 м/с; время локализации аварии 20 мин.

Результаты проведенных расчетов по предлагаемой методике и методике [27] подтверждают их сходимость: пороговая глубина заражения по предлагаемой методике — 746 м (по методике [27] — 749 м), смертельная — 305 м (276 м [27]), что является приемлемым результатом.

Для сравнительной возможной погрешности при оценке риска химической опасности при авариях на объектах такого рода был проведен расчет одного из вариантов перевозки АХОВ автомобильным транспортом на маршруте территории Республики Мордовия по методике [14] и предлагаемой уточненной методике. Был принят следующий вариант исходных данных аварии: площадь разгерметиза-

Таблица 3. Результаты оценки риска химической опасности при перевозке аммиака автомобильным транспортом
Table 3. Results of the assessment of the risk of chemical hazards in the transport of ammonia by road

Номер участка Site number	Участок маршрута, км The route section, km	Удаленность от населенного пункта, м Distance from built-up area, m	Риск химической опасности в соответствии Risk of chemical hazard in accordance	
			с уточненной методикой with refined methodology	с методикой [14] with methodology [14]
1	1–10	10	0,00004	0,0000468
2	10–20	200	0,0000041	0,000005925
3	20–30	2000	0	0
4	30–40	450	0,000073	0,0000975
5	40–50	50	0,00002	0,000035
6	50–60	1800	0	0
7	60–70	1000	0,000045	0,00005568
8	70–80	200	0,00008	0,0000887
9	90–97	500	0,000071	0,0000733

ции $0,04 \text{ м}^2$, масса перевозимого аммиака 10 т, пробоина в днище, класс устойчивости атмосферы — инверсия, погода сухая, скорость ветра 1 м/с, температура воздуха 20°C .

Результаты оценки риска химической опасности на маршруте, рассчитанные по уточненной методике и методике [14], представлены в табл. 3 и на рисунке.

Как видно из рисунка, на разных участках маршрута риски химической опасности будут различны. Это обусловлено тем, что перевозка осуществляется как вблизи населенных пунктов, где риск будет значительно выше, так и на отдаленные от селитебной части расстояния, где риск в результате аварии будет минимальным [22]. В данном случае наибольший риск химической опасности наблюдается на участках маршрута 30–40 и 70–90 км. Это обусловлено тем, что на данных участках маршрута расположены крупные населенные пункты. Самый вы-

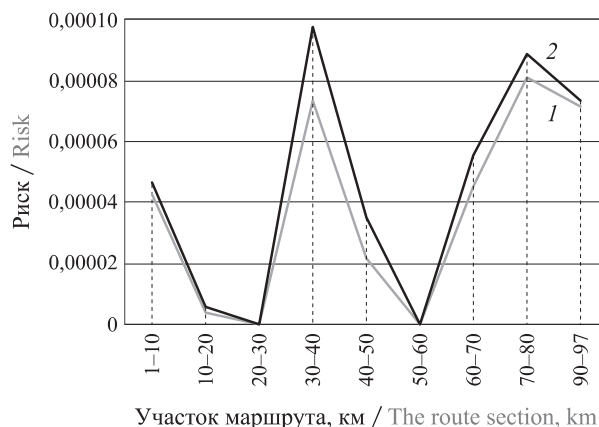


График риска химической опасности на участках маршрута: 1 — по уточненной методике; 2 — по методике [14]
 The chemical hazard risk chart on the route sections: 1 — refined methodology; 2 — methodology [14]

сокий риск химической опасности наблюдается на участке маршрута 30–40 км, где маршрут движения автомобильного транспорта с АХОВ проходит в районе селитебной зоны населенного пункта, находящегося в сельской местности. Неучет экспериментальных данных, как показывают расчеты на участке 30–40 км, приводят к завышенным значениям риска химической опасности до 25 %.

Заключение

Таким образом, совершенствование методики оценки риска химической опасности на основе методики [14] было реализовано на основе учета реальной площади разлива основных видов АХОВ по конкретным подстилающим поверхностям, а также степени инфильтрации АХОВ в подстилающую поверхность, полученных на основе экспериментальных данных. Уточненная методика оценки риска химической опасности позволяет более достоверно проводить оценку риска химической опасности при перевозке АХОВ автомобильным транспортом, что позволит с меньшими затратами обеспечить безопасность населения и ликвидацию последствий аварий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. НПБ 105–03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности : приказ МЧС России от 18.06.2003 № 314. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200032102> (дата обращения: 01.03.2018).
2. СО 11-04-АКТНП-006–2006. Методика оценки степени риска эксплуатации магистральных нефтепроводов ОАО “АК “Транснефтепродукт”. — М.: ОАО “АК “Транснефтепродукт”, 2006. — 108 с.
3. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : приказ МЧС России от 10.07.2009 № 404 (с изм. на 14.12.2010). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902170886> (дата обращения: 14.01.2018).
4. Савчук О. Н. Химическая безопасность. Системный анализ прогнозирования возможных последствий при авариях (разрушениях) химически опасных объектов : монография. — Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2013. — 456 с.

5. *Fthenakis V. M.* HGSYSTEM: a review, critique, and comparison with other models // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. — 1999. — Vol. 12, No. 6. — P. 525–531. DOI: 10.1016/s0950-4230(99)00029-7.
6. *Erkut E., Verter V.* A framework for hazardous materials transport risk assessment // *Risk Analysis*. — 1995. — Vol. 15, No. 5. — P. 589–601. DOI: 10.1111/j.1539-6924.1995.tb00755.x.
7. *Bubbico R., Di Cave S., Mazzarotta B.* Risk analysis for road and rail transport of hazardous materials: a simplified approach // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. — 2004. — Vol. 17, No. 6. — P. 477–482. DOI: 10.1016/j.jlp.2004.08.010.
8. *Bubbico R., Maschio G., Mazzarotta B., Milazzo M. F., Parisi E.* Risk management of road and rail transport of hazardous materials in Sicily // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. — 2006. — Vol. 19, No. 1. — P. 32–38. DOI: 10.1016/j.jlp.2005.05.011.
9. *Xie Y., Lu W., Wang W., Quadrifoglio L.* A multimodal location and routing model for hazardous materials transportation // *Journal of Hazardous Materials*. — 2012. — Vol. 227–228. — P. 135–141. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.05.028.
10. *Leonelli P., Bonvicini S., Spadoni G.* New detailed numerical procedures for calculating risk measures in hazardous materials transportation // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. — 1999. — Vol. 12, No. 6. — P. 507–515. DOI: 10.1016/s0950-4230(99)00023-6.
11. *Erkut E., Verter V.* Modeling of transport risk for hazardous materials // *Operations Research*. — 1998. — Vol. 46, No. 5. — P. 625–642. DOI: 10.1287/opre.46.5.625.
12. *Wu Z., Sun M.* Statistic analysis and countermeasure study on 200 road transportation accidents of dangerous chemicals // *Journal of Safety Science and Technology*. — 2006. — Vol. 2, No. 2. — P. 3–8. URL: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-LDBK200602001.htm (дата обращения: 14.01.2018).
13. Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий. — М.: ВНИИПО МЧС России, 2006. URL: http://infosait.ru/norma_doc/49/49262/index.htm (дата обращения: 07.05.2018).
14. *Савчук О. Н.* Особенности прогнозирования выявления последствий при авариях (разрушениях) резервуаров с аварийно химически опасными веществами при транспортировке автомобильным транспортом // *Проблемы управления рисками в техносфере*. — 2011. — № 1(17). — С. 40–50.
15. *Stoessel F.* Thermal safety of chemical processes: risk assessment and process design. — Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2008. — 393 p.
16. *Egeghy P. P., Vallero D. A., Hubal E. A. C.* Exposure-based prioritization of chemicals for risk assessment // *Environmental Science & Policy*. — 2011. — Vol. 14, No. 8. — P. 950–964. DOI: 10.1016/j.envsci.2011.07.010.
17. *Perkins E. J., Ankley G. T., Crofton K. M., Garcia-Reyero N., LaLone C. A., Johnson M. S., Tietge J. E., Villeneuve D. L.* Current perspectives on the use of alternative species in human health and ecological hazard assessments // *Environmental Health Perspectives*. — 2013. — Vol. 121, No. 9. — P. 1002–1010. DOI: 10.1289/ehp.1306638.
18. *Samuel C., Keren N., Shelley M. C., Freeman S. A.* Frequency analysis of hazardous material transportation incidents as a function of distance from origin to incident location // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. — 2009. — Vol. 22, No. 6. — P. 783–790. DOI: 10.1016/j.jlp.2009.08.013.
19. *Inanloo B., Tansel B.* Explosion impacts during transport of hazardous cargo: GIS-based characterization of overpressure impacts and delineation of flammable zones for ammonia // *Journal of Environmental Management*. — 2015. — Vol. 156. — P. 1–9. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.02.044.
20. *Li C., Ren J., Wang H.* A system dynamics simulation model of chemical supply chain transportation risk management systems // *Computers & Chemical Engineering*. — 2016. — Vol. 89. — P. 71–83. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2016.02.019.
21. *Smolander S., He Q., Mogensen D., Zhou L., Bäck J., Ruuskanen T., Noe S., Guenther A., Aaltonen H., Kulmala M., Boy M.* Comparing three vegetation monoterpene emission models to measured gas concentrations with a model of meteorology, air chemistry and chemical transport // *Biogeosciences*. — 2014. — Vol. 11, Issue 19. — P. 5425–5443. DOI: 10.5194/bg-11-5425-2014.
22. *Савчук О. Н., Аксенов А. А.* Особенности программной реализации на ЭВМ оценки риска химической опасности аварий автомобильного транспорта, перевозящего аварийно химически опасные вещества // *Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России*. — 2015. — № 4. — С. 52–60.
23. *Шеин Е. В.* Курс физики почв: учебник для вузов. — М.: Изд-во МГУ, 2005. — 432 с.

24. Чаусов Ю. П. Растекаемость особо опасных жидкостей на твердых поверхностях // Горючесть веществ и химические средства пожаротушения. — М., 1978. — Вып. 4. — С. 37–46.
25. Альтигуль А. Д., Животовский Л. С., Иванов Л. П. Гидравлика и аэродинамика : учебник для вузов. — М. : Стройиздат, 1987. — 414 с.
26. А. с. 2015610163 Российская Федерация. Прогнозирование последствий аварий на транспорте, перевозящем аварийно-химически опасные вещества (АХОВ) / Савчук О. Н., Аксенов А. А. — № 2014661405; заявл. 11.11.2014; опубл. 20.02.2015.
27. Агапов А. А., Лазукина И. О., Марухленко А. Л., Марухленко С. Л., Софьин А. С. Использование программного комплекса ТОКСИ+^{Risk} для оценки пожарного риска // Безопасность труда в промышленности. — 2010. — № 1. — С. 46–52.

Материал поступил в редакцию 12 сентября 2018 г.

Для цитирования: Савчук О. Н., Крейтор В. П., Аксенов А. А. Пути совершенствования методики оценки риска химической опасности при перевозке АХОВ автомобильным транспортом // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2018. — Т. 27, № 10. — С. 46–55. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.10.46-55.

English

WAYS OF IMPROVEMENT OF THE TECHNIQUE OF ASSESSMENT OF RISK OF CHEMICAL DANGER IN TRANSIT CHEMICALLY HAZARDOUS SUBSTANCE BY MOTOR TRANSPORT

O. N. SAVCHUK, Candidate of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Safety Service, Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: oleg-savcuk@mail.ru)

V. P. KREYTOR, Candidate of Technical Sciences, Professor, Chief of Department of Safety Service, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: servis.bezopasnosti2010@yandex.ru)

A. A. AKSENOV, Adjunct of Department of Safety Service, Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: servis.bezopasnosti2010@yandex.ru)

ABSTRACT

Introduction. Currently, the risk assessment method is widely used at the facilities. This is true in determining the chemical hazards arising in the storage infrastructure and transport of chemically dangerous substances. The basis of risk assessment analysis of chemical hazard is forecasting of the consequences of chemical accidents and contamination areas.

Methods. As a result, it was revealed that the methods contain wrong assumptions. In particular, the actual area of chemically dangerous substance spill and its absorption into the underlying surface are not taken into account. These assumptions are proposed to be eliminated by use spreading and infiltration coefficient in the risk assessment method of chemical hazards. These coefficients are calculated on the basis of experiments to determine the area of the spill and the proportion of infiltration in the underlying surface of the main types of chemically dangerous substance. The spreading surface coefficient clarifies the main features that effect on evaporation time, the area of the spill and the thickness of the film of chemically dangerous substance spill on the underlying surface.

Results and discussion. Infiltration coefficient determines the amount of chemically dangerous substance absorbed into the underlying surface. In addition, it is not taken into account in the secondary cloud formation of chemical contamination. The article presents the coefficients that are calculated for the main types of chemically dangerous substance and ways to obtain them. An assessment of

the chemical hazard was carried out using an improved methodology in the Republic of Mordovia. The procedure is compared with other methods.

Conclusion. Calculations show that the proposed methodology for chemical risk assessment will allow more accurate forecasting. It is better to assess the risk of chemical hazards.

Keywords: chemical hazard risk; chemically dangerous substance; spill area; infiltration; underlying surface; prediction technique.

REFERENCES

1. Fire protection standards 105–03. *Determination of categories of rooms, buildings and external installations on explosion and fire hazard*. Order of Emercom of Russia on 18.06.2003 No. 314 (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200032102> (Accessed 1 March 2018).
2. SO 11-04-AKTNP-006–2006. *Methodology for assessing the risk level of operation of main oil product pipelines OAO “AK “Transnefteprodukt”*. Moscow, OAO “AK “Transnefteprodukt” Publ., 2006. 108 p. (in Russian).
3. *On the approval of technique of determination of settlement sizes of fire risk on production objects*. Order of Emercom of Russia on 10.07.2009 No. 404 (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902170886> (Accessed 14 January 2018).
4. Savchuk O. N. *Khimicheskaya bezopasnost. Sistemnyy analiz prognozirovaniya vozmozhnykh posledstviy pri avariakh (razrusheniyakh) khimicheskii opasnykh ob'yektov. Monografiya* [Chemical safety. System analysis of the forecasting of possible consequences during accidents (destruction) of chemically dangerous objects. Monograph]. Saarbrücken, Lambert Academic Publishing, 2013. 456 p. (in Russian).
5. Fthenakis V. M. HGSYSTEM: a review, critique, and comparison with other models. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1999, vol. 12, no. 6, pp. 525–531. DOI: 10.1016/S0950-4230(99)00029-7.
6. Erkut E., Verter V. A framework for hazardous materials transport risk assessment. *Risk Analysis*, 1995, vol. 15, no. 5, pp. 589–601. DOI: 10.1111/j.1539-6924.1995.tb00755.x.
7. Bubbico R., Di Cave S., Mazzarotta B. Risk analysis for road and rail transport of hazardous materials: a simplified approach. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2004, vol. 17, no. 6, pp. 477–482. DOI: 10.1016/j.jlp.2004.08.010.
8. Bubbico R., Maschio G., Mazzarotta B., Milazzo M. F., Parisi E. Risk management of road and rail transport of hazardous materials in Sicily. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, vol. 19, no. 1, pp. 32–38. DOI: 10.1016/j.jlp.2005.05.011.
9. Xie Y., Lu W., Wang W., Quadrioglio L. A multimodal location and routing model for hazardous materials transportation. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, vol. 227–228, pp. 135–141. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.05.028.
10. Leonelli P., Bonvicini S., Spadoni G. New detailed numerical procedures for calculating risk measures in hazardous materials transportation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1999, vol. 12, no. 6, pp. 507–515. DOI: 10.1016/S0950-4230(99)00023-6.
11. Erkut E., Verter V. Modeling of transport risk for hazardous materials. *Operations Research*, 1998, vol. 46, no. 5, pp. 625–642. DOI: 10.1287/opre.46.5.625.
12. Wu Z., Sun M. Statistic analysis and countermeasure study on 200 road transportation accidents of dangerous chemicals. *Journal of Safety Science and Technology*, 2006, vol. 2, no. 2, pp. 3–8. Available at: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-LDBK200602001.htm (Accessed 14 January 2018).
13. *Rukovodstvo po otsenke pozhnogo riska dlya promyshlennykh predpriyatiy* [Guidelines for the assessment of fire risk for industrial enterprises]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2006 (in Russian). Available at: http://infosait.ru/norma_doc/49/49262/index.htm (Accessed 7 May 2018).
14. Savchuk O. N. Features of forecasting of revealing of consequences at failures (destructions) of tanks with under abnormal condition chemically dangerous substances at transportation by motor transport. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of Technosphere Risk Management*, 2011, no. 1(17), pp. 40–50 (in Russian).
15. Stoessel F. *Thermal safety of chemical processes: risk assessment and process design*. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2008. 393 p.
16. Egeghy P. P., Vallero D. A., Hubal E. A. C. Exposure-based prioritization of chemicals for risk assessment. *Environmental Science & Policy*, 2011, vol. 14, no. 8, pp. 950–964. DOI: 10.1016/j.envsci.2011.07.010.

17. Perkins E. J., Ankley G. T., Crofton K. M., Garcia-Reyero N., LaLone C. A., Johnson M. S., Tietge J. E., Villeneuve D. L. Current perspectives on the use of alternative species in human health and ecological hazard assessments. *Environmental Health Perspectives*, 2013, vol. 121, no. 9, pp. 1002–1010. DOI: 10.1289/ehp.1306638.
18. Samuel C., Keren N., Shelley M. C., Freeman S. A. Frequency analysis of hazardous material transportation incidents as a function of distance from origin to incident location. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2009, vol. 22, no. 6, pp. 783–790. DOI: 10.1016/j.jlp.2009.08.013.
19. Inanloo B., Tansel B. Explosion impacts during transport of hazardous cargo: GIS-based characterization of overpressure impacts and delineation of flammable zones for ammonia. *Journal of Environmental Management*, 2015, vol. 156, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.02.044.
20. Li C., Ren J., Wang H. A system dynamics simulation model of chemical supply chain transportation risk management systems. *Computers & Chemical Engineering*, 2016, vol. 89, pp. 71–83. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2016.02.019.
21. Smolander S., He Q., Mogensen D., Zhou L., Bäck J., Ruuskanen T., Noe S., Guenther A., Aaltonen H., Kulmala M., Boy M. Comparing three vegetation monoterpene emission models to measured gas concentrations with a model of meteorology, air chemistry and chemical transport. *Biogeosciences*, 2014, vol. 11, issue 19, pp. 5425–5443. DOI: 10.5194/bg-11-5425-2014.
22. Savchuk O. N., Aksenov A. A. Features of the software implementation on a computer risk assessment chemical hazards of accidents of vehicles carrying dangerous chemical substances. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Herald of Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2015, no. 4, pp. 52–60 (in Russian).
23. Shein E. V. *Kurs fiziki pochv* [Course of soil physics]. Moscow, Moscow State University Publ., 2005. 432 p. (in Russian).
24. Chausov Yu. P. Flowability of extremely hazardous liquids on solid surfaces. In: *Goryuchestv i khimicheskiye sredstva pozharotusheniya* [Flammability of substances and chemical extinguishing agents]. Moscow, 1978, issue 4, pp. 37–46 (in Russian).
25. Altshul A. D., Zhivotovskiy L. S., Ivanov L. P. *Gidravlika i aerodinamika* [Hydraulics and aerodynamics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1987. 414 p. (in Russian).
26. Savchuk O. N., Aksenov A. A. Prediction consequences of accidents by transport, transporting chemical hazardous substances. Inventor's Certificate RU, No. 2015610163, publ. date 20.02.2015 (in Russian).
27. Agapov A. A., Lazukina I. O., Marukhlenko A. L., Marukhlenko S. L., Sofin A. S. Use of software package TOXI+^{Risk} for fire risk assessment. *Bezopasnost truda v promyshlennosti / Occupational Safety in Industry*, 2010, no. 1, pp. 46–52 (in Russian).

For citation: O. N. Savchuk, V. P. Kreytor, A. A. Aksenov. Ways of improvement of the technique of assessment of risk of chemical danger in transit chemically hazardous substance by motor transport. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 10, pp. 46–55 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.10.46-55.