

УДК 614.8.084

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ ПРИ ТРАНСПОРТНЫХ АВАРИЯХ С УЧАСТИЕМ ЖЕЛТОГО ФОСФОРА

Н.М. Ишмаев, Е.С. Николина, В.А. Мамонтов, Н.И. Бурдаков

(кафедра химической технологии и новых материалов; e-mail: ishmaev@rector.msu.ru)

С учетом опасных свойств фосфора, являющихся следствием его высокой реакционной способности, проведено прогнозирование поражающих факторов, которые могут развиваться в результате аварии при перевозке этого химического вещества. Приведенный метод расчета последствий можно использовать для решения задач управления техногенным риском на этапе транспортировки рассматриваемого продукта химической промышленности.

Ключевые слова: желтый фосфор, промышленная безопасность, поражающий фактор, прогнозирование риска, транспортные аварии.

Современное промышленное производство связано с интенсивным развитием химической технологии как одной из важнейших составляющих технического прогресса. Однако для любого химического производства характерна бóльшая или меньшая степень опасности для персонала предприятий, населения, проживающего за пределами границы производственной площадки, а также для окружающей среды. По данным международных организаций, 75% всех смертельных случаев, возникающих в результате промышленных аварий, связаны с воздействием химических поражающих факторов на человека и окружающую среду [1]. В этой связи особую актуальность приобретают прогноз сценариев развития аварии и оценка негативного воздействия поражающих факторов, проводимая на основе расчетов. Анализ статистики промышленных аварий последних лет показывает, что тенденция повышения вероятности аварий химической природы будет сохраняться, а угроза негативного воздействия опасных (поражающих) химических факторов на человека и окружающую среду – возрастать. В полной мере это относится к химическим авариям при перевозке воспламеняющихся, окисляющихся, горючих, взрывчатых и токсичных веществ.

До 80% всех опасных химических веществ (ОХВ) перевозится железнодорожным транспортом. Средний маршрут движения при этом превышает многие тысячи километров и проходит по густонаселенным территориям страны. По прогнозам к 2035 г. интенсивность этих перевозок в Европейских странах возрастет в 2 раза. Если учесть, что при транспортировке ОХВ происходит пятая часть всех аварий

с их участием, становится очевидной необходимость тщательного изучения этого вопроса.

Аварии с участием высокоопасного белого (желтого) фосфора, мировой объем производства которого превышает 1 млн т в год, относятся к малоизученным редким событиям. Известны две такие аварии, произошедшие на железных дорогах в 1986 г. в США [2] и в 2007 г. на Украине [3–5]. Ущерб от этих аварий в обоих случаях измерялся миллионами долларов; производилась массовая эвакуация населения.

Особенностью аварий с участием ОХВ является то, что в результате могут развиваться сразу несколько факторов поражения человека: токсические и барические эффекты, термическая радиация, механические воздействия при разрушении конструкций от взрывных или иных явлений [6].

В данной работе рассмотрена авария, при которой происходит разгерметизация стандартной цистерны, наполненной белым фосфором, с последующим его разлитием и самовоспламенением. При этом наибольшую опасность будут представлять развитие термического поражающего фактора ввиду исключительной реакционной способности фосфора, самовоспламеняющегося на воздухе и дающего высокотемпературное пламя, и токсического фактора, обусловленного воздействием продуктов горения фосфора на организм человека [7].

Для прогнозирования последствий воздействия теплового излучения пламени на людей в данной работе рассчитывали интенсивность теплового излучения q (кВт/м²), согласно выражению [8]:

$$q = E_f F_q \cdot \tau, \quad (1)$$

где E_f – среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени (кВт/м^2), F_q – угловой коэффициент облученности (фактор видения); τ – коэффициент пропускания атмосферы.

Величина F_q зависит от позиции и ориентации облучаемого объекта относительно излучателя. Значения коэффициента облученности были рассчитаны в приближении вертикального цилиндрического излучателя, т.е. форма пламени фосфора аппроксимировалась цилиндром. Тогда значение фактора для единичной произвольно ориентированной площадки будет составлять среднее геометрическое вертикальной и горизонтальной компонент:

$$F_q = \sqrt{F_V^2 + F_H^2}, \quad (2)$$

где

$$F_V = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{S} \cdot \arctg\left(\frac{h}{\sqrt{S^2 - 1}}\right) - \frac{h}{S} \left\{ \begin{array}{l} \arctg\left(\frac{\sqrt{S-1}}{\sqrt{S^2-1}}\right) - \frac{A}{\sqrt{A^2-1}} \times \\ \times \arctg\left(\frac{\sqrt{(A+1)(S-1)}}{\sqrt{(A-1)(S+1)}}\right) \end{array} \right\} \right],$$

$$F_H = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\begin{array}{l} \frac{(B-1/S)}{\sqrt{B^2-1}} \cdot \arctg\left(\frac{\sqrt{(B+1) \cdot (S-1)}}{\sqrt{(B-1) \cdot (S+1)}}\right) - \\ - \frac{(A-1/S)}{\sqrt{A^2-1}} \cdot \arctg\left(\frac{\sqrt{(A+1)(S-1)}}{\sqrt{(A-1)(S+1)}}\right) \end{array} \right],$$

где A, B, S, h равны соответственно:

$$A = (h^2 + S^2 + 1)/2S, \quad B = (1 + S^2)/2S, \quad S = 2x/d, \quad h = 2H/d.$$

Здесь x – расстояние от геометрического центра пролива до облучаемого объекта (м), d – эффективный диаметр пролива (м), H – высота пламени (м):

$$H = 42 \cdot d \left[\frac{\dot{m}}{\rho_b \sqrt{gd}} \right]^{0,61},$$

где ρ_b – плотность воздуха (кг/м^3), g – ускорение свободного падения (м/с^2), \dot{m} – массовая скорость выгорания ($\text{кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$).

Коэффициент атмосферной трансмиссии τ_a , учитывающий поглощение теплового излучения воздухом, присутствующим между излучателем и облучаемым объектом, определяли согласно выражению [8]:

$$\tau_a = \exp[-7 \cdot 10^{-4}(x - 0,5d)]. \quad (3)$$

Известно, что термическое воздействие связано с прогревом и последующими биохимическими изменениями верхних слоев кожного покрова. В результате воздействия «высоких тепловых нагрузок» наступает чувство боли. Болевой порог достигается, когда температура верхнего слоя кожного покрова ($\sim 0,1$ мм) повышается до 45°C [6].

Время достижения болевого порога (с) связано с интенсивностью теплового воздействия (кВт/м^2) зависимостью:

$$t_{\text{пор}} = (35/q)^{1,33}, \quad (4)$$

где q – интенсивность теплового излучения, действующего на человека (Вт/м^2).

С учетом известных данных по предельно допустимой интенсивности при пожарах разлития можно заключить, что на расстоянии 8 м от поверхности пламени через 6–8 с может возникнуть ожог первой степени, а через 12–16 с – ожог второй степени для открытых поверхностей кожи. На расстоянии ~ 45 м от поверхности пламени негативного воздействия на человека не наблюдается. Таким образом, расстояние до пламени >45 м может считаться безопасными для людей, находящихся в этой зоне.

Вероятность смертельного поражения при термическом воздействии определяется через пробит-функцию и связана с индексом дозы, который равен произведению интенсивности излучения на длительность прямоугольного теплового импульса:

$$Pr = -14,9 + 2,56 \cdot \ln(q^{4/3} \cdot t_b). \quad (5)$$

Здесь t_b – время экспозиции (с) для пожаров разлития:

$$t_b = t_p + (x/v),$$

где t_p – время реакции индивидуума, с (допускается принимать 5 с), x – расстояние от места расположения человека до зоны (м), где интенсивность теплового излучения не превышает 4 кВт/м^2 , v – скорость движения из опасной зоны, м/с (допускается принимать 5 м/с) [8]. В табл. 1 приведены результаты расчета опасности теплового излучения: значения интенсивности теплового излучения (q), рассчитанные в зависимости от расстояния до пламени (x), время достижения болевого порога ($t_{\text{боли}}$), вероятность смертельного поражения ($P_{\text{пор}}, \%$).

Из приведенного расчета термического поражающего фактора следует, что зона действия этого фактора относительно невелика и не превышает нескольких десятков метров. Если учесть, что железнодорожные пути лежат в полосе отчуждения шириной ~ 50 м, то можно предположить, что ущерб третьим лицам в результате воздействия термического фактора будет минимален (за исключением случаев, когда третьи лица

Т а б л и ц а 1

Результаты расчета термического поражающего фактора

q , кВт/м ²	x , м	$t_{\text{боли}}$, с	$P_{\text{пор}}$, %
18	10	2	71
12	11	4	29
10	12	5	10
8,4	13	8	3
7,0	14	8	<1
2,9	20	27	<1
1,0	30	120	<1
0,4	40	390	<1
0,2	50	> 10 мин	<1

выступают в роли участников железнодорожного движения, например, пассажиров). Следует отметить, что в зону воздействия термического фактора могут попасть и другие составы с воспламеняющимися грузами. В этом случае может произойти эскалация аварии (например, на маневровочных или разъездных путях).

Для прогнозирования возможных последствий токсического воздействия в результате разгерметизации вагона необходимо построить поле концентраций продуктов горения фосфора. При выборе математической модели концентрационного поля были приняты следующие допущения:

1) вредные продукты горения являются либо газами, либо паро-газовыми смесями с плотностью, не превышающей плотность воздуха, либо аэрозолями с размерами частиц до 10 мкм;

2) направление, скорость ветра и стратификация атмосферы не изменяются во время горения.

Первое условие можно принять выполненным, поскольку согласно исследованиям дисперсного состава тумана фосфорной кислоты, образующейся в результате поглощения оксидом фосфора влаги воздуха, средний диаметр аэрозольных капель составляет приблизительно 2 мкм [9]. Тогда на расстоянии от 100 м до 10 км от места горения фосфора применима модель гауссовского рассеяния примеси [10].

В данной работе использована модель Гаусса с параметрами Смита–Хоскера [11, 12] в приближении периодического точечного источника [13, 14], т.е. источник выброса продуктов горения с мощностью $q(t)$ (кг/с) возникает в момент времени $t = 0$ и прекращает свое действие в момент времени $t = \tau$, когда фосфор либо выгорит полностью, либо будет нейтрализован:

$$q(t) = q_0[H(t) - H(t - \tau)], \quad (6)$$

где $H(x)$ – функция Хевисайда:

$$H(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0. \end{cases}$$

В этом случае модель для концентрационного поля будет выглядеть следующим образом:

$$C(x, y, z, t) = \frac{q_0}{u} \frac{1}{4\pi\sigma_y\sigma_z} \times \left\{ \left[H(t) - H(t - \tau) \right] \left[\operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}\sigma_x}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x - ut}{\sqrt{2}\sigma_x}\right) \right] + \right. \\ \left. + H(t - \tau) \left[\operatorname{erf}\left(\frac{x - ut + u\tau}{\sqrt{2}\sigma_x}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x - ut}{\sqrt{2}\sigma_x}\right) \right] \right\} \times \\ \times \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \cdot \exp\left[\left(-\frac{(z - H_{\text{эф}})^2}{2\sigma_z^2}\right) + \right. \\ \left. + \exp\left(-\frac{(z + H_{\text{эф}})^2}{2\sigma_z^2}\right)\right], \quad (7)$$

$$\operatorname{erf}(k) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^k \exp(-\mu^2) d\mu \approx 1 - \frac{\sqrt{3} \exp(-k^2)}{2k + \sqrt{3 + k^2}},$$

$$\sigma_y(u_1 t) = 0,5 \cdot \sigma_x(u_1 t),$$

$$\sigma_z(x_1) = \begin{cases} g(u_1 t) \cdot F(u_1 t, z_0), & g(u_1 t) \cdot F(u_1 t, z_0) \leq \sigma_z^{\max}; \\ \sigma_z^{\max}, & g(u_1 t) \cdot F(u_1 t, z_0) > \sigma_z^{\max}; \end{cases}$$

$$g(x_1) = \frac{a_1 (u_1 t)^{b_1}}{1 + a_2 (u_1 t)^{b_2}},$$

$$F(u_1 t, z_0) = \begin{cases} \ln\left\{c_1 (u_1 t)^{d_1} \cdot \left[1 + (c_2 (u_1 t)^{d_2})^{-1}\right]\right\}, & z_0 > 0, 1; \\ \ln\left\{c_1 (u_1 t)^{d_1} \cdot \left[1 + (c_2 (u_1 t)^{d_2})^{-1}\right]\right\}, & z_0 \leq 0, 1. \end{cases}$$

В модели (7) $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – дисперсия рассеивания продуктов горения вдоль осей x, y, z (ось x выбирается вдоль направления ветра u). Эти дисперсии определены через эмпирические параметры Смита–Хоскера, учитывающие влияние рельефа местности, скорости ветра, класса устойчивости атмосферы по Паскуиллу–Гиффорду.

Расчет токсического поражающего фактора проводился на примере модельной аварии, связанной со сходом с рельс и мгновенной полной разгерметизацией одного стандартного вагона-цистерны типа 15-1525 (ТУ 24.00.518-84) грузоподъемностью 69 т

с учетом 80%-го заполнения. При моделировании распределения токсических продуктов горения фосфора делалось предположение, что основным продуктом реакции горения является высший оксид. Коэффициенты для расчета дисперсий, фигурирующие в модели, описанной выше, выбирали, принимая коэффициент шероховатости равным 0,04 м (случай открытой сельской местности) и наихудшие погодные условия, которые будут благоприятствовать распространению опасной токсической дозы в пространстве (консервативный сценарий): класс устойчивости атмосферы F (по Паскуиллу–Гиффорду), скорость ветра 1 м/с. Расчет проводили в сечении пространства $(x, y, 1,5, t)$, предложенного авторами [10].

После схода цистерны с пути происходит ее разгерметизация с последующим самопроизвольным возгоранием фосфора при контакте с кислородом воздуха. В результате интенсивного процесса горения образуется облако продуктов горения, которое под действием ветра принимает вытянутую в пространстве форму. При продолжительном времени горения процесс выходит на стационарный режим, и облако приобретает вид шлейфа, протяженность которого возрастает при переносе вдоль направления ветра. Размер зоны загрязнения определяется пространством, внутри которого концентрация продуктов горения превышает предельно допустимую концентрацию. Для высшего оксида фосфора, который является основным продуктом горения фосфора в атмосферном воздухе, максимально разовая предельно допустимая концентрация (ПДК_{мр}) при времени осреднения 30 мин составляет 1,0 мг/м³.

С использованием разработанной авторским коллективом программы были построены поля концентраций, отвечающие разным отрезкам времени после начала аварии. Концентрации выражались в виде отношения текущих концентраций к ПДК_{мр}. Данные расчета для первых часов аварии приведены в табл. 2 и на рис. 1.

В течение всего времени аварии на расстоянии до 1 км сохраняется превышение концентрации Р₄О₁₀ по отношению к ПДК_{мр} в 10–100 раз. Наибольшее превышение концентрации наблюдается на расстояниях до 400–500 м от места аварии. Превышение до 1,5 ПДК_{мр} сохраняется на расстояниях до 10 км (предел прогноза мезомасштабных Гауссовых моделей). Используемая модель показывает хорошее согласие с последствиями реальной аварии на Украине в 2007 г. [5].

Как правило, в медицинской литературе, посвященной вопросам токсикологии, для характеристики острого ингаляционного воздействия газообразных токсических веществ приводятся значения концентраций, вызывающих 50%-е поражение при экспозиции в течение некоторого времени t (ЛД₅₀). Эта характеристика по существу определяет интегральную дозу токсиканта, в случае получения которой возможен летальный исход у 50% субъектов в группе. Риск поражения в результате воздействия токсического фактора является функцией дозы токсиканта, поступившего в организм среднего представителя данной группы населения за всю жизнь. Применительно к загрязнению атмосферы доза токсиканта может быть

Таблица 2

Превышение предельно допустимой концентрации на различных расстояниях от места аварии вдоль направления ветра

Время, ч	с/ПДК _{мр} на расстоянии, м				
	100	1000	1500	3000	5000
0,5	5,7	0,6	0,41	0	0
0,75	29	3,0	2,0	0	0
1	53	5,7	3,8	2,0	0
1,25	71	7,8	5,1	2,7	0
1,5	84	8,7	6,0	3,2	2,0
1,75	92	9,6	6,5	3,5	2,2
2	96	10,1	6,9	3,	2,3
2,25	99	10,4	7,1	3,7	2,4
2,5	101	10,5	7,2	3,8	2,5
2,75	101	10,6	7,2	3,8	2,5
3	102	10,6	7,2	3,9	2,5

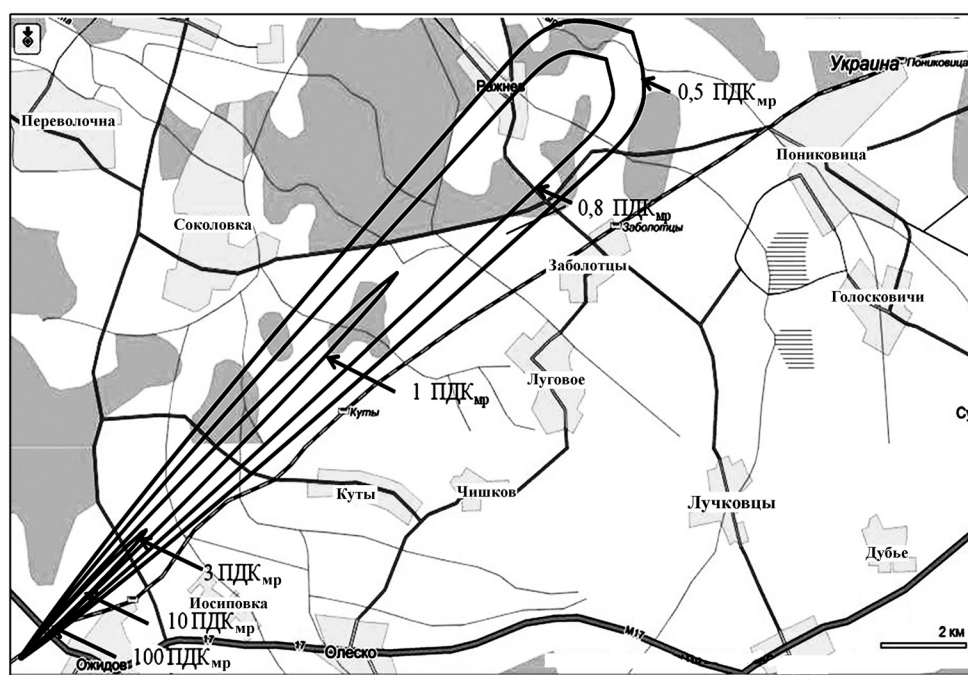


Рис. 1. Зоны загрязнения через 6 ч после аварии

оценена на основе данных о концентрации токсиканта в воздухе и времени пребывания людей в условиях загрязненной атмосферы.

Зависимость тяжести поражения от дозы в результате получения реципиентом определенной токсической нагрузки (дозы) определяется через пробит-функцию, согласно выражению [6]:

$$Pr = a + b \cdot \ln(D), \tag{8}$$

где a, b – коэффициенты, характеризующие токсическое воздействие вещества, D – токсическая нагрузка.

Для оценки вероятности поражения в результате воздействия токсиканта можно использовать зависимость [15]:

$$P_{\text{пор}} = 0,5 \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{Pr - 5}{\sqrt{2}} \right) \right]. \tag{9}$$

Для описания негативного воздействия токсиканта, которое может реализоваться в форме немедленных или хронических проявлений, используются, как правило, две группы моделей: пороговые и беспороговые. Острая токсичность (немедленные токсические проявления) имеет ярко выраженный пороговый характер. Для оценки риска немедленных токсических эффектов может быть использована модель индивидуальных порогов действия [16]. Применительно к загрязнению атмосферы эта модель может быть в общем виде описана зависимостью:

$$RI = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{a+b \lg c} \exp \left(-\frac{\tau^2}{2} \right) dt, \tag{10}$$

где c – концентрация токсиканта в окружающем реципиента воздухе. Причем рассматриваемый риск токсического поражения представляет собой условный индивидуальный риск, равный вероятности поражения (летального исхода или заболевания) при реализации механизма воздействия ОХВ j в выражении для территориального потенциального риска, т.е.

$$RI = P(L)_j. \tag{11}$$

Значения коэффициентов a и b определяются на основании специальных токсикологических исследований свойств ОХВ и, как правило, приводятся только в специальной литературе. Для выполнения практических расчетов представляется целесообразным связать коэффициенты a и b со значениями традиционных параметров, применяемых для характеристики токсичности веществ и нормирования их содержания в окружающей среде, таких, как класс токсичности ОХВ и ПДК [17]:

$$RI = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{a+b \lg(\text{ПДК}_{\text{мр}})} \exp \left(-\frac{\tau^2}{2} \right) d\tau, \tag{12}$$

где $\text{ПДК}_{\text{мр}}$ – предельно допустимая максимальная разовая концентрация ОХВ в воздухе. При этой кон-

центрации вдыхание воздуха в течение 30 мин не должно вызывать рефлекторных реакций в организме человека.

Для веществ II класса опасности, к которым относится высший оксид фосфора, предложены следующие эмпирические коэффициенты [17]:

$$Pr = -5,51 + 7,49 \lg(c/\text{ПДК}_{\text{мр}}). \quad (13)$$

С использованием значений вероятности поражения людей 90, 50, 10 и 1% были рассчитаны соответствующие концентрации P_4O_{10} и построены зоны токсического поражения (рис. 2).

Важно отметить, что число людей, подвергающихся риску, является функцией от скорости и направления ветра, а также класса устойчивости атмосферы. Поэтому прогноз для конкретной местности должен строиться с учетом средних метеорологических параметров, характерных для этого района. Полученные при расчете потенциального территориального риска данные могут быть использованы для решения задач

оценки риска при железнодорожных перевозках желтого (белого) фосфора.

Знание величины удельного потенциального риска и распределение реципиентов вдоль маршрута движения состава позволяют оценить индивидуальный и социальный риски для населения, попадающего в зону аварии, а также прогнозировать аварийный риск при перевозке фосфора в широком диапазоне объема перевозимого опасного вещества и дальности перевозок.

При смещении зоны поражения вдоль маршрута движения состава с белым фосфором необходимо оценить число людей, подвергающихся риску аварии в зависимости от времени суток и возможности оповестить население. Это позволяет использовать в качестве критерия формирования маршрутов и графиков движения суммарное число людей, потенциально подвергающихся риску, и использовать для решения задачи управления риском известные методы исследования операций (теория расписаний).



Рис. 2. Зоны поражения на момент окончания аварии (6 ч)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция Федеральной целевой программы «Национальная система химической и биологической безопасности Российской Федерации (2009-2013 гг.)». Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 28.01.2008 № 74-р.
2. Scoville W., Springer S. // J. Hazardous Materials. 1989. 21. P. 47.
3. Зербіно Д.Д., Колінковський О.М., Петрук С.О., Похлебаєв О.О. // Журн. Український медичний часопис. 2008. 1. С. 71.
4. Варус В.І., Петрук С.О., Колінковський О.М. // Журн. Український медичний часопис. 2008. 1. С. 67.
5. Антонов А.А. // Сб. докл. VI Междунар. конф. «Актуальные проблемы промышленной безопасности: от проектирования до страхования». СПб., 2008. С. 50.

6. Сафонов В.С., Одишария Г.Э., Швыряев А.А. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности. М., 1996.
7. *Toxicological profile for white phosphorus*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Atlanta, 1997.
8. ГОСТ Р 12.3.047-98. Пожарная безопасность технологических процессов. М., 1998.
9. Вальдберг А.Ю., Ваулин Н.Е., Симнанский А.В., Антошин А.Э., Лазарев В.И. // Журн. химическое и нефтегазовое машиностроение. 2009. 12. С. 32.
10. Колодкин В.М., Мурин А.В., Петров А.К., Горский В.Г. / Под ред. В.М. Колодкина. Количественная оценка риска химических аварий. Ижевск, 2001.
11. Smith F. B. // Proc. of 3rd Meeting of an Expert Panel on Air Pollution Modelling, NATO/CCMS. Brussels, 1972.
12. Hosker R. P. // Proc. of a Symp. IAEM SM 181/19, Int. Atomic Energy. Vienna, 1974.
13. Замышляев Б.В. // Журн. Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2004. 4. С. 35.
14. Горский В.Г., Швецова-Шилова Т.Н., Путилов А.В. // Сб. XV Международ. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях». Т.4. Тамбов, 2002. С. 55.
15. Pontiggia M., Derudi M., Alba M., Scaioni M., Rota R. // J. Hazardous Materials. 2010. 176. P. 589.
16. Алымов В.Т., Тарасова Н.П. Техногенный риск: Анализ и оценка. М., 2005.
17. Киселев А.В., Фридман К.Б. Оценка риска здоровью. СПб., 1997.

Поступила в редакцию 25.10.12

FORECASTING OF STRIKING FACTORS AT TRANSPORTATION ACCIDENTS INVOLVING YELLOW PHOSPHORUS

N.M Ishmaev, E.S. Nikolina, V.A Mamontov, N.I. Burdakov

(Department of Chemical Engineering and New Materials)

Based on the hazardous properties of phosphorus, which are a consequence of its high reactivity, was carried out a forecast of striking factors that can arise from of an accident during transportation of phosphorus. The procedure can be used to manage the risk during transportation of this chemical product.

Key words: *yellow phosphorus, industrial safety, striking factor, risk forecasting, rail accidents.*

Сведения об авторах: *Ишмаев Николай Михайлович* – аспирант химического факультета МГУ (ishmaev@rector.msu.ru); *Николина Елена Семеновна* – ст. науч. сотр. кафедры химической технологии и новых материалов химического факультета МГУ, канд. хим. наук; *Мамонтов Владимир Александрович* – доцент кафедры химической технологии и новых материалов химического факультета МГУ, канд. хим. наук; *Бурдаков Николай Иванович* – глав. науч. сотр. эколого-аналитического центра газовой промышленности, докт. техн. наук.