

СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ОБЩЕСТВЕННЫЕ НАУКИ



УДК 614.8.084

Оценка профессионального заболевания на основе полной линейки исходов «отравление метилбензолом – удушье – летальный исход»

Е.А. Степаненко, Ю.В. Есипов

Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Аннотация. В рамках системы «факторы – защита – работник» на примере действия метилбензола рассмотрена и апробирована по степени опасности линейка возможных исходов «отравление – удушье – летальный исход», чем была конкретизирована параметрическая модель вида «воздействие – ослабление – восприимчивость». С учетом применения защиты на рабочем месте маляра в интервале концентраций метилбензола от 75 000 мг/м³ до 7 500 мг/м³ вероятность летального исхода рабочего снижается от значения 0,9963 до 0,0001. При этом показано, что полученные ослабленные уровни воздействия были достигнуты благодаря комплексному применению коллективной и индивидуальной системы защиты, которая включает: использование вентиляционной системы — установка отсосов и приточно-вытяжной вентиляции; разбавление концентрации метилбензола в рабочей зоне свежим воздухом; регулярные очистка и санитарная обработка рабочей зоны; применение работником средств индивидуальной защиты (респиратор, противогаз).

Ключевые слова: профессиональное заболевание, метилбензол, толуол, концентрация, отравление, удушье, летальный исход, восприимчивость, воздействие.

Occupational Disease Assessment Based on a Full Line of Outcomes "Methylbenzene Poisoning – Choking – Death"

Elena A Stepanenko, Yuriy V Esipov

Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Abstract. Within the framework of the "factors – protection – worker" system, using the example of the action of methylbenzene, the following line of possible outcomes "poisoning – choking – death" was considered and tested according to the degree of danger, which concretized the parametric model of the type "impact – weakening – susceptibility". Taking into account the use of protection at the painter's workplace in the range of methylbenzene concentrations from 75000 mg/m³ to 7500 mg/m³, the probability of a lethal outcome of a worker decreases from 0.9963 to 0.0001. At the same time, it is shown that the obtained weakened levels of exposure were achieved through the integrated use of a collective and individual protection system, which includes: the use of a ventilation system — installation of suction and supply and exhaust ventilation; dilution of the concentration of methylbenzene in the working area with fresh air; regular cleaning and sanitization of the working area; the use by the employee of personal protective equipment (respirator, gas mask).

Keywords: occupational disease, methylbenzene, toluene, concentration, poisoning, suffocation, death, susceptibility, exposure.

Введение. Маляр выполняет следующие работы: подготовка окрасочных материалов и поверхностей под окраску, окраска поверхностей различными методами, а также обработка (шлифование, полирование) и сушка лакокрасочных покрытий. В процессе трудовой деятельности на него оказывают вредное воздействие различные химические вещества, содержащиеся в составах красок и их растворителях. Поэтому работники, имеющие данную профессию, подвержены развитию ряда профессиональных заболеваний, характеризующихся поражением следующих систем и органов:

– центральной нервной системы (астеноневротический синдром, токсическая энцефалопатия, полиневропатия);

- дыхательных путей (острые и хронические токсические риниты, фарингиты, бронхиты, пневмонии, острый токсический отек легких);
- печени (острый и хронический токсический гепатит);
- крови и кроветворения (гемолитические анемии, гипохромные анемии, лейкоз);
- кожи и подкожной клетчатки (контактный дерматит, эпидермит, экзема).

В работе рассмотрим действие на маляров вредного химического вещества — метилбензола.

Толуол — общепринятое название метилбензола. Это прозрачная, бесцветная, летучая жидкость, которая воспламеняется и взрывается в воздухе.

Толуол представляет собой важный в промышленном отношении промежуточный химический продукт, производство которого во всем мире достигает огромных величин. Он производится как в виде самостоятельного продукта, так и в качестве компонента различных смесей. Чаще всего его используют в качестве растворителя для красок.

Работники подвергаются значительному воздействию толуола в производственных условиях. Установленные в разных странах допустимые уровни профессионального воздействия варьируются от 200 до 750 мг/м³ и они представляют собой средневзвешенные во времени величины концентрации для 8-часового рабочего дня и 40-часовой недели. В ряде стран установлена предельно допустимая концентрация (ПДК) на уровне 50–100 мг/ м³ [1].

Особую группу, подвергающуюся воздействию толуола, составляют токсикоманы, намеренно употребляющие толуолсодержащие растворяющие смеси в качестве наркотиков, а также лица, подвергшиеся случайному отравлению толуолом. Использование растворителей в качестве наркотиков становится повсеместной проблемой, и хронические токсикоманы обычно подвергаются воздействию концентраций, превышающих 3750 мг/ м³.

Действие на человека. Изучение токсичности толуола для человека проводилось главным образом на лицах, подвергавшихся ингаляционному воздействию в экспериментальных производственных условиях или при намеренном употреблении в качестве наркотиков растворяющих смесей, содержащих толуол.

Толуол действует прежде всего на ЦНС. Это действие может проявляться депрессией или возбуждением с эйфорией в фазе индукции, за которой следуют дезориентировка, дрожание, неустойчивость настроения, ощущение шума в ушах, диплопия, галлюцинации, дизартрия, атаксия, судороги, кома и летальный исход [1].

Острые контролируемые и профессиональные воздействия толуола в диапазоне 750–5 625 мг/м³ (200–1500 ч/млн) вызывали дозозависимые изменения со стороны ЦНС. При остром воздействии в больших дозах (например, 37 500 мг/м³ и выше в течение нескольких минут) во время аварий на производстве отмечались вначале признаки возбуждения ЦНС (повышенная психическая активность, эйфория, галлюцинации), а затем прогрессирующее расстройство сознания, завершающееся в конце концов судорогами, коматозным состоянием и летальным исходом.

Однократные кратковременные воздействия толуола (750 мг/ м³ в течение 8 ч) вызывают проходящее раздражение слизистых оболочек дыхательных путей и глаз со слезотечением при дозе 1500 мг/ м³ [1].

Помимо риска возникновения профессионального заболевания, метилбензол может стать причиной аварии на производстве или наркотической зависимости.

Подготовка исходных данных для решения задачи, анализ показателей опасности и (или) вредности

Таблица 1

Экспериментальные данные о значениях концентрации паров, при которых возникают следующие исходы поражения

Степень поражения	Концентрация, мг/м ³
Пороговая	750
Поражающая	5626
Смертельная	37500

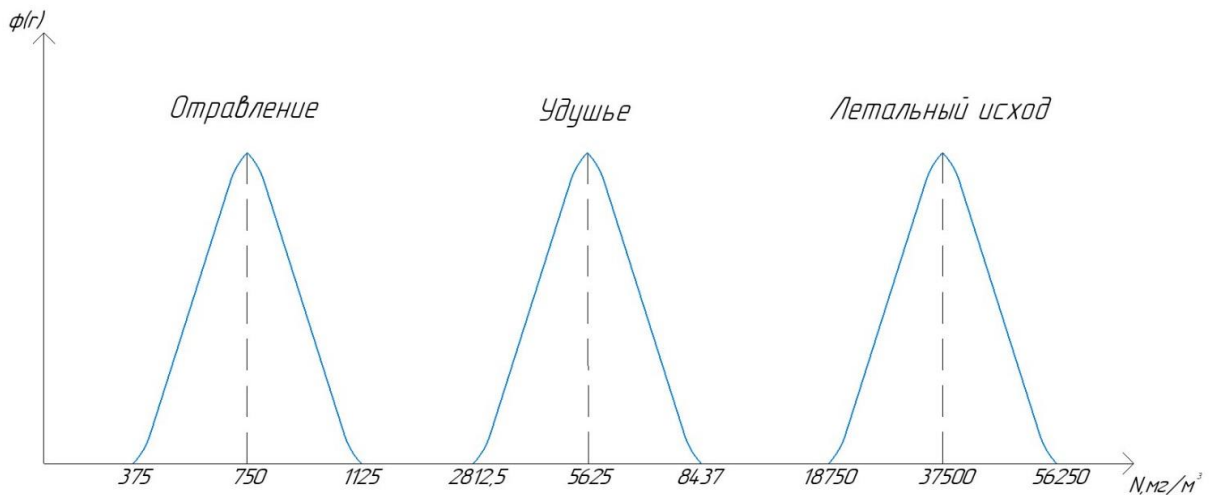


Рис. 1. Линейка значений случайных параметров восприимчивости к токсическому воздействию метилбензола на работника (в предположении о нормальном законе распределения этих параметров на каждом из i -х исходов)

Постановка и решение задачи. Оценка заболевания и(или) поражения работника при токсическом воздействии на всей возможной области проявления воздействия включает следующие этапы [2, 3].

1. Анализ неблагоприятных исходов действия вредных и опасных веществ на человека и представление их с помощью линейки восприимчивости. При этом должны быть установлены (или взяты) справочные или статистические данные о значениях концентрации паров, при которых возникают исходы поражения.

2. Построение такого рода линейки на основе введения по нарастанию опасности трех уровней неблагоприятных исходов и описания их математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением концентрации метилбензола, принимаемых как «параметры восприимчивости» к созданию этих исходов в условиях возможного токсичного воздействия метилбензола на работников.

3. Задание параметров воздействия на конкретного работника, принятие предположения о нормальном законе распределения и выражение этого воздействия с помощью математического ожидания и среднеквадратического отклонения концентрации.

4. Расчет значений приведенного параметрического запаса безопасности Z_B [3].

5. Расчет вероятности наступления возможных исходов по алгоритму п.2.4 [4] с помощью функции Лапласа [5–7].

6. Апробация алгоритма для решения задач, поставленных в [7], и на примере как оценки риска систем, так и обоснования эффективности защиты путем ослабления воздействия [8].

Рассмотрение этапов. На первом этапе используются экспериментальные данные о значениях концентрации паров, при которых возникают следующие исходы поражения (таблица 1), где представлены степени поражения работника в зависимости от уровня концентрации метилбензола [9]. На втором этапе с помощью данных таблицы 1 строится линейка как детерминированных, так и случайных параметров восприимчивости [3, 10] рабочего к действию метилбензола (рис. 1). При этом уровни параметров восприимчивости $\{r_1, r_2, r_3\}$ соответственно характеризуют следующие исходы или уровни поражения: 1 — отравление, 2 — потеря сознания, 3 — летальный исход.

Обобщенный вариант подготовки исходных данных. Параметры восприимчивости опишем с помощью линейки детерминированных (таблица 1) и случайных значений по возрастанию (рис. 1):

$$r_{det} = \{r_1, r_2, r_3\} = \{(m, \sigma)r_1, (m, \sigma)r_2, (m, \sigma)r_3\}, \quad (1)$$

где m, σ — соответственно математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение концентрации метилбензола для каждого уровня поражения г.

С другой стороны, параметры непосредственного воздействия метилбензола на работника определим по зависимости [3]:

$$s = fv, \quad (2)$$

где параметры s и v имеют размерность концентрации, параметр f — безразмерный коэффициент ослабления.

При этом, по аналогии с зависимостью (1), воздействия на соответствующих детерминированных уровнях опишем с помощью линейки случайных параметров (по возрастанию) [3]:

$$s_{det} = \{s_1, s_2, s_3\} = \{(m, \sigma)s_1, (m, \sigma)s_2, (m, \sigma)s_3\}. \quad (3)$$

Согласно теории измерений, абсолютную погрешность Δ определим как:

$$\Delta = 0,01\gamma n_B, \quad (4)$$

где γ — класс точности прибора (способа) измерений, %; n_B — предел шкалы измерения величины (концентрации) данного измерительного прибора.

Далее с учетом введенного выражения (1) принимаем, что измеренная концентрация аммиака, как действующего фактора $s_{i det}$, выражает собой математическое ожидание воздействия на соответствующем i -м уровне (рис. 1, 2):

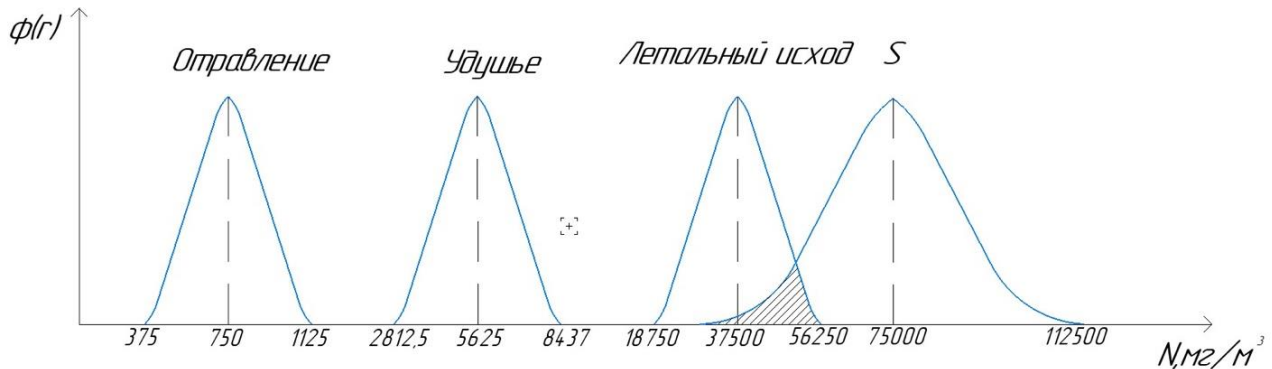


Рис. 2. Демонстрация варианта модельного примера и расчета вероятности летального исхода с помощью линейки исходов при условии измерения текущей концентрации метилбензола вблизи области летального исхода

$$m_{si} = s_{i det}. \quad (5)$$

Аналогично (1) в предположении о нормальном распределении концентрации метилбензола на рабочем месте абсолютную погрешность воздействия можно выразить как

$$\Delta = 3\sigma_{i0,997}, \quad (6)$$

где σ_i — среднеквадратическое отклонение концентрации на i -м уровне с квантилем доверия, равным 0,997.

Тогда из (6) получим зависимость

$$\sigma_i = \gamma s_{i det} / 3. \quad (7)$$

Зависимость (7) можно использовать для получения среднеквадратического отклонения воздействия на основе его измерения с классом точности γ на i -м уровне с квантилем доверия, равным 0,997.

Следовательно, на основе зависимостей (1) – (7) построены линейки случайных параметров восприимчивости (рис. 1) и воздействия (рис. 2) с учетом введения по нарастанию опасности трех уровней неблагоприятных исходов в условиях возможного токсичного воздействия аммиака на работника.

Расчет характеристик распределения параметров восприимчивости. Примем допущение, что уровни концентрации (таблица 2 правый столбец) определяют способом, класс точности γ которого составляет 50 %. Это соответствует принятому алгоритму экспериментального определения критического уровня L_{50} , мг/м³.

Таблица 2

Характеристики распределения параметров восприимчивости

Степень поражения	n_{Bi}	Δ_{ri}
Пороговая	750	375
Поражающая	5626	2815,5
Смертельная	37500	18750

Обозначив верхнюю границу восприимчивости как n_{Bi} , где i — индекс исхода, получим значения абсолютных погрешностей Δ_{ri} представления параметров восприимчивости на каждом уровне.

С учетом (6) и с помощью таблицы 2 рассчитаем значения среднеквадратических отклонений σ_i соответствующих параметров восприимчивости r_i с границей n_{Bi} :

$$\sigma_{ri} = \Delta_{ri} / 3 = 375 / 3 = 125,$$

$$\sigma_{ri} = \Delta_{ri} / 3 = 2815,3 / 3 = 938,5,$$

$$\sigma_{ri} = \Delta_{ri}/3 = 18750/3 = 625. \quad (8)$$

3. На третьем этапе в качестве параметра воздействия (в рамках принятой унифицированной модели, обозначается параметром S) принимается измеренное (здесь и сейчас — лат. in situ) в общем случае случайное значение концентрации метилбензола.

Таблица 3

Результаты расчета значений среднеквадратических отклонений σ_i восприимчивости на соответствующих уровнях тяжести

Степень поражения	σ_{ri}
Пороговая	125
Поражающая	938,5
Смертельная	6250

Таблица 4

Значения математического ожидания параметра воздействия находятся на областях соответственно вблизи уровней параметров восприимчивости

Степень поражения	n_{SBi}	Δ_{Si}	σ_s
Пороговая	1500	750	250
Поражающая	11252	5626	1875,3
Смертельная	75000	37500	12500

Аналогично (8) получим следующие значения абсолютных погрешностей воздействий на этих уровнях:

$$\begin{aligned} \Delta_{S1} &= \gamma n_{SB1} = 1500 \cdot 0,5 = 750, \\ \Delta_{S2} &= \gamma n_{SB2} = 11251 \cdot 0,5 = 5626, \\ \Delta_{S3} &= \gamma n_{SB3} = 75000 \cdot 0,5 = 37500, \end{aligned} \quad (9)$$

где n_{SB1} , n_{SB2} , n_{SB3} — верхние границы воздействия метилбензола на рабочего соответственно для отравления, удушья и летального исхода.

С учетом зависимости (6) с помощью значений абсолютных погрешностей воздействия рассчитаем значения среднеквадратических отклонений σ_i на соответствующих уровнях воздействия S с границей n_{Bi} :

$$\begin{aligned} \sigma_{Si} &= \Delta_{Si}/3 = 750/3 = 250, \\ \sigma_{ri} &= \Delta_{ri}/3 = 5626/3 = 1875,3, \\ \sigma_{ri} &= \Delta_{ri}/3 = 37500/3 = 12500. \end{aligned} \quad (10)$$

4. На четвертом этапе проведем расчет значений приведенного параметрического запаса безопасности [3]:

$$Z_b = (m_s - m_r)/(\sigma_r^2 + \sigma_s^2)^{0,5}, \quad (11)$$

где m_s , m_r — математическое ожидание соответственно воздействия и восприимчивости; σ_r и σ_s — среднеквадратическое отклонение параметров соответственно восприимчивости и воздействия.

Согласно (11), параметр Z_b представляет собой вероятностный приведенный параметрический запас безопасности, как отношение разности математических ожиданий воздействия и восприимчивости к их суммарному среднеквадратическому отклонению [3, 10].

Используя значения параметров воздействия и восприимчивости токсичного действия метилбензола на работника при летальном исходе в модельном примере (рис. 2), а также результаты, полученные в (8) – (11), найдем следующее значение приведенного параметрического запаса безопасности:

$$Z_b = (75000 - 37500)/(6250^2 + 12500^2)^{0,5} = 2,68.$$

5. На пятом этапе выполним расчет вероятности наступления возможных исходов с помощью функции Лапласа по алгоритму [3, 11]. Применительно к летальному исходу опишем зависимость параметров воздействия и восприимчивости при токсическом воздействии метилбензола на работника. Так как в конкретном расчетном случае

параметр воздействия превышает параметр восприимчивости, т.е. $m_s > m_r$, то используем для расчета следующую зависимость:

$$P_{\text{ЛИ}} = \text{Pro}(z > 0) = 0,5 + F[(m_s - m_r)/(\sigma_r^2 + \sigma_s^2)^{0,5}], \quad (12)$$

где z — переменная, которая распределена по нормальному закону с математическим ожиданием $m_z = m_s - m_r$, $z = S - r$.

В результате подстановки Z_B в (12), с учетом таблицы распределения функции Лапласа [6], получим:

$$P_{\text{ЛИ}} = 0,5 + \Phi(2,68) = 0,5 + 0,4963 = 0,9963$$

6. Апробация алгоритма на примере оценки эффективности защиты путем ослабления воздействия. Оценим роль защиты путем варьирования ослабления воздействия с коэффициентом ослабления f на следующих уровнях: $f_1 = 0,7; f_2 = 0,4; f_3 = 0,2; f_4 = 0,1$.

Для анализа возможности реализации летального исхода с помощью (2) рассчитаем линейку воздействий и соответствующих ей значений вероятности возможных исходов. Рассчитаем вероятность наступления летального исхода при применении конкретной защиты и с достижением уменьшения концентрации аммиака, действующего на работника. При этом используем условие: «математическое ожидание воздействия m_s больше математического ожидания восприимчивости m_r ».

После анализа и подстановки исходных данных получено:

$$P_{\text{ЛИ}(1)} = 0,5 + \Phi[(52500 - 37500)/(6250^2 + 8750^2)^{0,5}] = 0,5 + \Phi(1,394) = 0,5 + 0,4177 = 0,9177$$

При воздействиях S2 – S4 применяем альтернативное условие: «математическое ожидание воздействия m_s меньше математического ожидания восприимчивости m_r ».

$$P_{\text{ЛИ}(2)} = 0,5 - \Phi[(37500 - 30000)/(6250^2 + 5000^2)^{0,5}] = 0,5 - \Phi(0,937) = 0,5 - 0,3264 = 0,1736$$

$$P_{\text{ЛИ}(3)} = 0,5 - \Phi[(37500 - 15000)/(6250^2 + 2500^2)^{0,5}] = 0,5 - \Phi(3,342) = 0,5 - 0,49966 = 0,00034$$

$$P_{\text{ЛИ}(4)} = 0,5 - \Phi[(37500 - 7500)/(6250^2 + 1250^2)^{0,5}] = 0,5 - \Phi(4,706) = 0,5 - 0,4999 = 0,0001$$

Таблица 5

Результаты расчета оценки риска действия метилбензола на работника в модельном примере

Оценка риска действия метилбензола на работника	Параметры восприимчивости РЛИ	Воздействие на разных уровнях, с разными коэффициентами ослабления				
		S, f=1	S1, f=0,7	S2, f=0,4	S3, f=0,2	S4, f=0,1
Концентрация N	37500	75000	52500	30000	15000	7500
Абсолютная погрешность Δ	1000	37500	26250	15000	7500	3750
Среднеквадратическое отклонение σ	6250	6250	8750	5000	2500	1250
Запас безопасности Z_B	-	2,68	1,394	0,937	3,342	4,706
Вероятность летального исхода $P_{\text{ЛИ}}$	-	0,9963	0,9177	0,1736	0,00034	0,0001

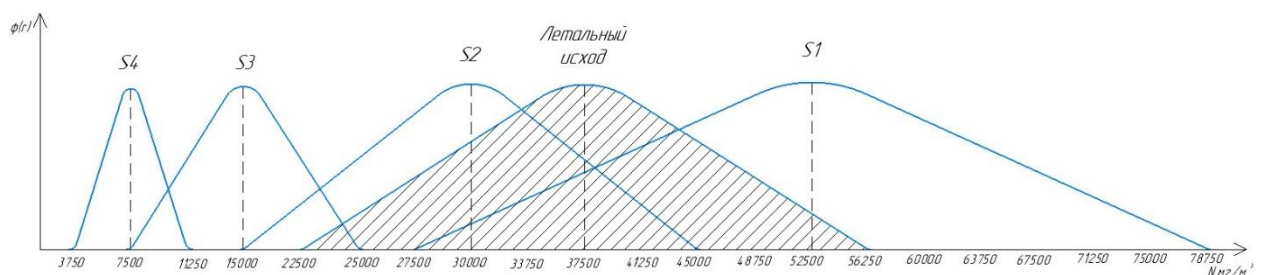


Рис. 3. Плотности распределения вероятности исходов РЛИ(1), РЛИ(2), РЛИ(3), РЛИ(4) в зависимости от приведенной разности воздействия и восприимчивости Z_B

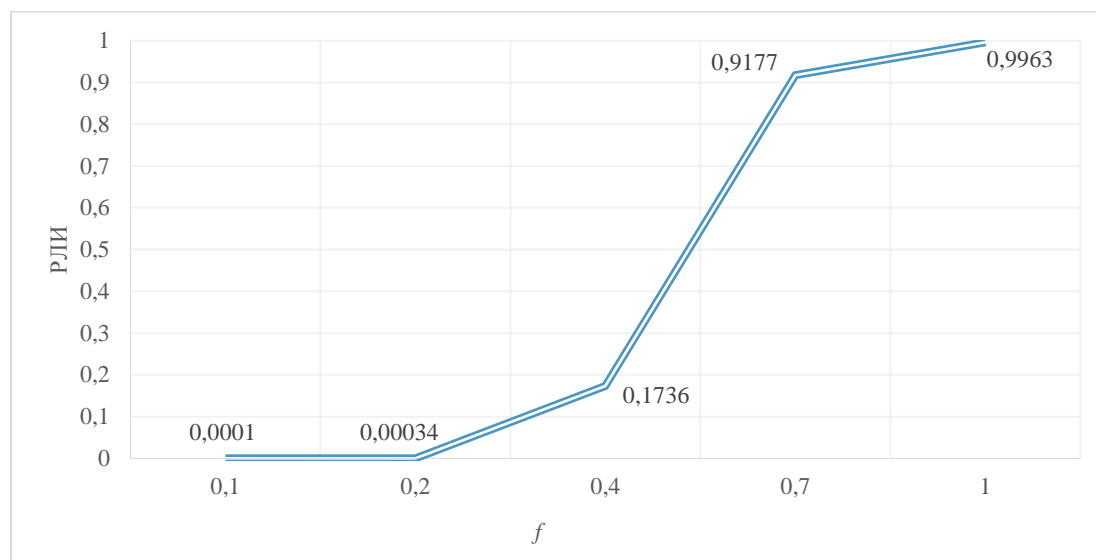


Рис. 4. Зависимость вероятности возникновения исхода в функции от коэффициента ослабления $P(f)$

Заключение. В теоретическом плане в рамках системы «факторы – защита – работник» на примере действия метилбензола рассмотрена и апробирована по степени опасности следующая линейка возможных исходов «отравление – удушье – летальный исход», чем была конкретизирована параметрическая модель вида «воздействие – ослабление – восприимчивость». В практическом плане получено, что с учетом применения защиты на рабочем месте маляра в интервале концентраций метилбензола от 75 000 мг/м³ до 7 500 мг/м³ вероятность летального исхода рабочего снижается от значения 0,9963 до 0,0001. При этом показано, что полученные ослабленные уровни воздействия были достигнуты благодаря комплексному применению коллективной и индивидуальной системы защиты, которая включает: использование вентиляционной системы — установка отсосов и приточно-вытяжной вентиляции; разбавление концентрации метилбензола в рабочей зоне свежим воздухом; регулярные очистка и санитарная обработка рабочей зоны; применение работником средств индивидуальной защиты (респиратор, противогаз).

Библиографический список

1. Гигиенические критерии состояния окружающей среды 52. *ТОЛУОЛ*, Всемирная организация здравоохранения, Женева; 1990. 128 с.
2. Пустовая Л.Е., Месхи Б.Ч. *Методы и приборы контроля окружающей среды. Экологический мониторинг*: учеб. пособие. Москва: ИНФРА-М; 2022. 246 с.
3. Есипов Ю.В., Мишенькина Ю.С., Черемисин А.И. *Модели и показатели техносферной безопасности*. Москва: ИНФРА-М; 2018. 154 с.
4. Поспелов Д.А. *Ситуационное управление: теория и практика*. Москва: Наука; 1986. 288 с.
5. Орловский С.А. *Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации*. Москва: Наука; 1981. 208 с.
6. Таблица значений функции Лапласа. URL: <https://math.semestr.ru/corel/table-laplas.php> (дата обращения: 10.06.2022).
7. О специальной оценке условий труда. Федер. закон от 28 дек. 2013 г. No 426-ФЗ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_156555/ (дата обращения: 10.06.2022).
8. Есипов Ю.В. Концепция возможностной оценки риска техногенных систем. *Автоматика и Телемеханика*. 2003;7:5–12.
9. Паспорт безопасности в соотв. с ГОСТ 30333-2007, Тoluол ROTISOLV® LSC. 3107, дата составления: 21.02.2019.
10. Болотин В.В. *Статистические методы в строительной механике*. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Стройиздат; 1965. 279 с.
11. Есипов Ю.В., Бухезна Б.Э., Джиладжи М.С. Способ оценки интегрального риска на примере системы «предприятие GL2Z — опасные и вредные факторы — работники». *Безопасность труда в промышленности*. 2021;10:77–81. DOI: [10.24000/0409-2961-2021-10-77-81](https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-10-77-81)

Об авторе:

Степаненко Елена Александровна, студент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), helen_stepanenko@mail.ru

Есипов Юрий Вениаминович, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, yu-yesipov5@yandex.ru

About the Authors:

Elena A Stepanenko, Master's degree student of the Life Safety and Environmental Protection Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), helen_stepanenko@mail.ru

Yuriy V Esipov, professor of the Life Safety and Environmental Protection Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), professor, Dr. Sci. (Eng), yu-yesipov5@yandex.ru