

Методы прогноза вероятности причинения ущерба человеческим и материальным ресурсам

© М.С. Кузьмина

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены методы прогноза вероятности причинения ущерба человеческим и материальным ресурсам. Представлены методы расчета ущерба от токсического воздействия, загрязнения гидро- и атмосферы, а также от ущерба, нанесенного зданиям и людям. Собрана и обобщена информация по этой тематике. Особое внимание уделено пробит-функции и ее применению в данной области. Приведен пример расчета риска аварий на магистральных нефтепроводах.

Ключевые слова: пробит-функция, методы прогноза, ущерб, поражающий фактор, стоимость, критерий.

Введение. Наметившийся экономический рост в современной России затруднен без внедрения эффективных методов управления производством. Методология анализа риска техногенных происшествий — действенный инструмент принятия и обоснованных управленческих решений при обеспечении промышленной, пожарной и экологической безопасности опасных производственных объектов. Рассмотренные методы расчета ущерба от токсического воздействия, загрязнения гидро- и атмосферы, а также от ущерба, нанесенного зданиям и людям должны помочь при решении данной проблемы.

Пробит-функция. После сбора информации о регионе и технологической специфике потенциально опасных объектов следующий этап исследования — определение критериев допустимого воздействия этих объектов на человека и окружающую среду. Этот этап весьма важный, поскольку принятые критерии представляют собой базовые характеристики как для расчета масштабов переноса вещества или распространения энергии, так и последствий от действия аварийных процессов или систематического загрязнения окружающей среды.

Исходя из специфики объектов химической технологии, основными физиологическими и биологическими факторами поражения для человека можно считать: барические эффекты (взрывы паров и газов), термическая радиация (пожары разлития, огневые шары, струевые пламена), механические воздействия при разрушениях конструкций от взрывных или иных явлений, токсические воздействия вредных веществ при их попадании в организм человека.

Известно, что в общем случае одна и та же мера воздействия (количество поглощенного вещества, доза термической радиации или импульс давления) приводит к последствиям различной степени тяжести у разных людей, т. е. эффект поражения носит вероятностный характер [1]:

$$P_{\text{пор}} = f(Pr) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr} e^{-t^2/2},$$

где верхний предел интегральной функции является так называемой пробит-функцией, отражающей связь между вероятностью поражения и поглощенной дозой. Пробит-функцию можно вычислить с помощью следующего уравнения [2]:

$$Pr = a + b \ln(D). \#$$

Здесь a и b — константы для каждого вещества или процесса, характеризующие специфику и меру опасности его воздействия; D — токсическая нагрузка (поглощенная субъектом доза негативного воздействия).

В ряде зарубежных исследований используют также уравнение

$$P_{\text{пор}} = f(Pr - 5) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr} e^{-t^2/2}.$$

По сути значение Pr — верхний предел интегрирования функции ошибок Гаусса, так называемой эрфик-функцией Q , используемой для оценки вероятности причинения конкретного ущерба. Отметим также, что на практике применяют два подхода к расчету функции $Q = erf(Pr)$ и определению значений пробит-функции [3]:

$$Q = erf1 \text{ при } Pr = 0,$$

$$Q = erf2 \text{ при } Pr = 5.$$

Последнее обстоятельство приводит к сложностям, связанным с совпадением значений ее коэффициентов, приведенных в различной литературе.

В ходе прогнозирования исхода воздействия поражающего фактора (априорной оценки вероятности Q) с помощью пробит-функции, входящие в нее коэффициенты предварительно следует проверить на достоверность. Для того чтобы убедиться в их правильности и устранить возможные сомнения, параметры a и b совместно с другими константами аргумента (табл. 1) необходимо подставить в выражение для $Q(Pr)$. В первом случае значение пробит-функции должно быть равно нулю, а во втором — пяти.

Вероятность причинения ущерба, определяемая с помощью пробит- и эрфик-функций (табл. 2).

Параметры пробит-функции для поражающих факторов

Фактор и его последствия	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>D</i>
<i>1. Фугасный</i>			
Полное разрушение промышленных зданий	5	-0,22	$(40\ 000/\Delta p)^{7,3} + (460/I)^{11,3}$
Трудно реставрируемые повреждения зданий	5	-0,26	$(17\ 500/\Delta p)^{8,4} + (290/I)^{9,3}$
Гибель людей: от разрыва легких от метательного эффекта ВУВ	5	-5,74	$(738\ 000/\Delta p) + 13 \cdot 10^7 / (\Delta p I) +$ $+ 4,2 / (1 + \Delta p / p_0) +$ $+ 1,3 (p_0^{0,5} m^{1/3}) / I$
	5	-2,44	
Повреждение органов слуха человека	-12,6	1,52	Δp
<i>2. Осколочный</i>			
Режущие осколки массой до 0,1 кг	29,6	2,1	$mU^{5,12}$
Ударные осколки массой до 0,1 кг	-17,6	5,3	$0,5mU^2$
Осколки массой от 0,1 до 4,2 и более кг	-13,2	10,5	U
<i>3. Тепловой</i>			
Ожоги 1-й степени	-39,8	3,02	$\Delta t q^{4/3}$
Ожоги 2-й степени	-43,1	3,02	$\Delta t q^{4/3}$
Гибель людей без защитной одежды	-36,4	2,56	$\Delta t q^{4/3}$
Гибель людей в защитной одежде	-37,2	2,56	$\Delta t q^{4/3}$
<p><i>Примечания:</i> 1. ΔP — перепад давления, Па; $I \cong (\Delta p \Delta t) / 2$ — его импульс, Па · с; p_0 — атмосферное давление, Па; m — масса человека, кг. 2. m — масса осколка, кг; U — скорость движения осколка, м/с (для стекла $U \sim 20$ м/с). 3. Δt — время, с, q — плотность потока, Вт/м².</p>			

Значения пробит-функции

$P_{\text{пор}}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	–	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,90	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,56	6,64	6,75	6,88	7,05	7,19
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

Токсическое воздействие. Обычно в медицинской литературе для характеристики острого ингаляционного воздействия газообразных токсических веществ (ЛД50) приведены концентрации, вызывающие 50 %-ное поражение при экспозиции в течение некоторого времени T [4]. Эта характеристика определяет интегральную меру токсиканта, в случае получения которой возможен летальный исход у 50 % субъектов в группе. В более общем случае токсическую нагрузку следует вычислять с учетом изменения концентрации вещества за принятый период времени T :

$$D = \int_0^r C^n(\tau) d\tau.$$

Здесь $C(\tau)$ — функция (динамика изменения) концентрации в той точке пространства, куда помещен субъект, зависящая от относительной (по воздуху) плотности газа, параметра устойчивости атмосферы, скорости ветра, интенсивности и длительности выброса из источника, высоты самого источника относительно поверхности земли и целого ряда других факторов; n — показатель степени, характеризующий механизм воздействия и природу токсиканта.

Как отмечалось ранее, в наиболее общем случае относительную вероятность (от 0 до 1) поражения в результате получения субъектом определенной токсической нагрузки может быть представлена в виде аргумента пробит-функции.

В случае пребывания субъекта в атмосфере с постоянной концентрацией токсиканта пробит-функцию можно записать как

$$Pr = a + b \ln(C^n T). \#$$

Для различных токсичных и вредных веществ пробит-функция имеет разные константы, определяемые по результатам специальных медико-биологических исследований, и отнесенные к среднестатистическому составу населения или, если это оговорено специально, к определенному контингенту (группе) людей. В табл. 3 приведены параметры пробит-функции летального поражения технического персонала при воздействии некоторых химических веществ.

Таблица 3

**Параметры пробит-функции летального поражения
технического персонала**

Вещество	$Pr = a + b \ln(C^n T)$		
	a	b	n
Акролеин	-9,931	2,049	1,00
Акрилонитрил	-29,42	3,008	1,43
Аммиак	-35,90	1,85	2,00
Бензол	-109,78	5,3	2,00
Бром	-9,04	0,92	2,00
Угарный газ	-37,98	3,7	1,00
Четыреххлористый углерод	-6,29	0,408	2,5
Хлор	-8,29	0,92	2,00
Формальдегид	-12,24	1,30	2,00
Соляная кислота	-16,85	2,00	1,00
Цианистоводородная кислота	-29,42	3,008	1,43
Фтористоводородная кислота	-35,87	3,354	1,00
Сероводород	-31,42	3,008	1,43
Бромистый метил	-56,81	5,27	1,00
Метилизоцианат	-5,642	1,637	0,653
Диоксид азота	-13,79	1,4	2
Фосген	-19,27	3,686	1,00
Оксид пропилена	-7,415	0,509	2,00
Диоксид серы	-15,67	2,10	1,00
Толуол	-6,794	0,408	2,5

Отметим, что результаты токсикологического воздействия могут различаться весьма значительно в зависимости от текущего состояния человека, его возрастных и физических данных и ряда других особенностей. Это приводит к тому, что доля (процент) поражения может изменяться в 2–5 раз при поглощении одной и той же дозы токсиканта. Более того, в ряде научных работ значения пробит-функции определены с учетом поведения людей и их физиологической активности.

Этап выделения и обоснования критериев негативного токсического воздействия на человека во многом обуславливает получаемые в дальнейшем количественные характеристики риска. Например, критерии токсического воздействия, принятые для технического персонала предприятия, распространяемые на все население региона, приводит к значительному занижению показателей риска.

Особенности оценки ущерба поврежденным зданиям, сооружениям и людям. При оценке непосредственного ущерба поврежденным зданиям и сооружениям, следует использовать рекомендации ЦНИИОМТП РФ. Тогда среднюю относительную стоимость ремонтно-восстановительных работ, определяемую как процентная доля начальной цены рассматриваемых объектов, можно аппроксимировать полуэмпирическими формулами [5]:

$$C_{i\text{cp}} = 1 - e^{-f_2}, \quad f_2 = 0,05i_{\text{cp}}^{2,4}.$$

При отсутствии данных о начальной цене поврежденных зданий причиненный им ущерб рассчитывают путем оценки стоимости времени, необходимого для реставрационных работ, с помощью известной цены одного человеко-дня и их количество, определяемое перемножением среднего числа $N_{i\text{cp}}$ строительных рабочих (чел.) на продолжительность $\tau_{i\text{cp}}$ ремонта (дн). Эти параметры определяются следующими формулами:

$$N_{i\text{cp}} = 2(9 + 0,015C_{i\text{cp}}S_j),$$

$$\tau_{i\text{cp}} = \frac{(7,2C_{i\text{cp}}S_j)}{N_{i\text{cp}}},$$

где S_j — общая площадь восстанавливаемого здания, м².

Рассмотрим методы измерения и прогнозирования ущерба, связанного с гибелью или травмированием людей, как от тяжелых терактов, аварий и катастроф, так и от непрерывных вредных выбросов. Как и ранее, для оценки ущерба людским ресурсам, оказавшимся в зонах потенциального поражения, целесообразно применять выражение:

$$R_{\tau B} = M_{\tau} [Y] = \sum_{k=1}^m (Q_{kc} Y_{kc}) + \sum_{i=1}^n (Q_{IH} = 1) Y_{IH},$$

где Q_{kc}, Y_{kc} — вероятности возникновения происшествия каждого типа за время τ и размеры обусловленного ими среднего ущерба; $k = 1 \dots m$ — число типов происшествий (аварийных вредных выбросов), возможных при функционировании конкретного предприятия; $Q_{IH} = 1, Y_{IH}$ — вероятности появления за время τ выбросов каждого типа и размеры обусловленного ими среднего ущерба; $I = 1 \dots n$ — число типов непрерывных энергетических (шум, вибрации, тепло...) и материальных (дым, шлаки...) вредных выбросов:

$$R_{\tau B} = M_{\tau} [Y] = \sum_{k=1}^3 (Q_{kq} S_{kq} F_{kq} C_{kq}) + \sum_{k=1}^3 (Q_{kd} F_k C_k),$$

где Q_{kq} — вероятность причинения людским, материальным и природным ресурсам ущерба заданной степени тяжести за время τ ; S_{kq}, S_{kd} — площади зон вероятного и достоверного уничтожения рассматриваемых ресурсов поражающими факторами соответственно; C_k, F_k — средняя плотность и стоимость единицы каждого ресурса в зонах вероятного и достоверного поражения.

В качестве исходных данных, необходимых для определения плотности рассматриваемых ресурсов, следует учитывать число оказавшихся там людей.

Социально-экономический ущерб, вызванный их профессиональными заболеваниями и несчастными случаями с временной потерей трудоспособности, может оцениваться количеством человеко-дней, необходимых для лечения и реабилитации пострадавших. Согласно рекомендациям Международной организации труда, ущерб обществу от гибели одного, среднестатистического человека равен 6 000–7 500 потерянных человеко-дней, а ущерб от его увечий, приведших к потере трудоспособности, можно определить с помощью табл. 4.

Таблица 4

Ущерб от стойкой утраты трудоспособности человека

Причина утраты трудоспособности	Степень причиненного ущерба, %	Ущерб, человеко-дни
Полная утрата (смерть)	100	7 500
Постоянная полная инвалидность	100	8 750
Частичная утрата:		
потеря всей руки	35	2 600
потеря предплечья	30	2 250
потеря кисти	25	1 860
потеря ноги	20	1 500
потеря глаза	15	1 125

Стоимость одного человеко-дня можно выразить в эквивалентном ему денежном исчислении. Для определения ее значения следует поделить суточный валовой национальный доход государства или конкретной отрасли на число работающих, т. е. найти прибавочную стоимость одного работника за вычетом расходов на его жизнеобеспечение. В отдельных случаях можно исходить из субъективной оценки стоимости жизни или размеров страховых выплат на случай гибели человека.

Оценка ущерба от загрязнения атмо- и гидросферы. Укажем на особенности оценки ущерба, обусловленного непрерывными выбросами загрязняющих веществ в природную среду. В соответствии с требованиями для производственных и транспортных предприятий в расчетном периоде устанавливаются различные нормативы выплат за данные вредные выбросы: а — в пределах установленных для них лимитов и б — сверх них. Эти выплаты предназначены для снижения либо компенсации соответствующего социально-экономического ущерба [6].

В случае непревышения предельно допустимых выбросов в атмосферу и водные объекты размер выплат S_1 (руб.) рассчитывают следующим образом:

$$S_1 = \frac{\sum_{t=1}^T S_t}{\frac{t-1}{T}},$$

$$\sum_{t=1} S_{tL}$$

где t, T — год планового периода и его общая продолжительность; S_t, S_{tL} — затраты на снижение токсической дозы вредных выбросов в текущем году и приведенный лимит таких выбросов, установленный с учетом вида загрязняющих веществ, их допустимого объема и предельно допустимых концентраций в атмосферном воздухе или воде соответственно.

При превышении объема предельно допустимых выбросов, издержки предприятий S_2 (руб.) находят как

$$S_2 = \frac{S_{jT}}{dM_{jt}},$$

где S_{jT} — затраты предприятия, необходимые для достижения установленного лимита выбросов, руб./год; dM_{jt} — плановый приведенный объем вредных выбросов, установленный предприятию в текущем году.

Пример количественной оценки риска аварий на магистральных нефтепроводах. Энергетическая безопасность (в технологической сфере) — свойство системы энергообеспечения (производство — передача — распределение), сохранять состояние, при ко-

тором, ожидаемый ущерб потенциальным жертвам не превышает допустимого по социально-экономическим соображениям. Основная цель — минимизация аварийности, травматизма на производстве, отрицательно сказывающихся на качестве трудового процесса [7].

Основным принципом нормирования техногенного риска, во-первых, является приоритет нормирования его удельных показателей (индивидуальный риск гибели, удельный ожидаемый ущерб на единицу произведенной продукции и др.) над абсолютными (коллективный, социальный риск гибели, ожидаемый ущерб и др.). Во-вторых, это наличие и использование четкого и однозначного алгоритма оценки техногенного риска с соответствующими допущениями и исходными данными (соблюдение принципа триединства по одной методике, одной и той же рабочей группой и при одном и том же источнике постулируемых исходных данных). Кроме того, приоритет нормирования вероятностей появления наиболее крупных типичных техногенных происшествий или причинения прямого ущерба конкретной тяжести.

Теперь спрогнозируем риски аварий магистральных нефтепроводов «Приморск — Ярославль» и «Новороссийск — Комсомольская» (рис. 1).



Рис. 1. Карта нефтепроводов

Оцениваемые показатели [8]:

интенсивность (частота) аварий (1/год, 1/год/1000 км) (рис. 2);

возможные и ожидаемые массы утечки потерь нефти при авариях (т и т/год) (рис. 3);

возможные и ожидаемые ущербы от аварий, риск загрязнения окружающей среды (руб. и руб./год);
 коллективный риск смертельного поражения людей (чел./год).

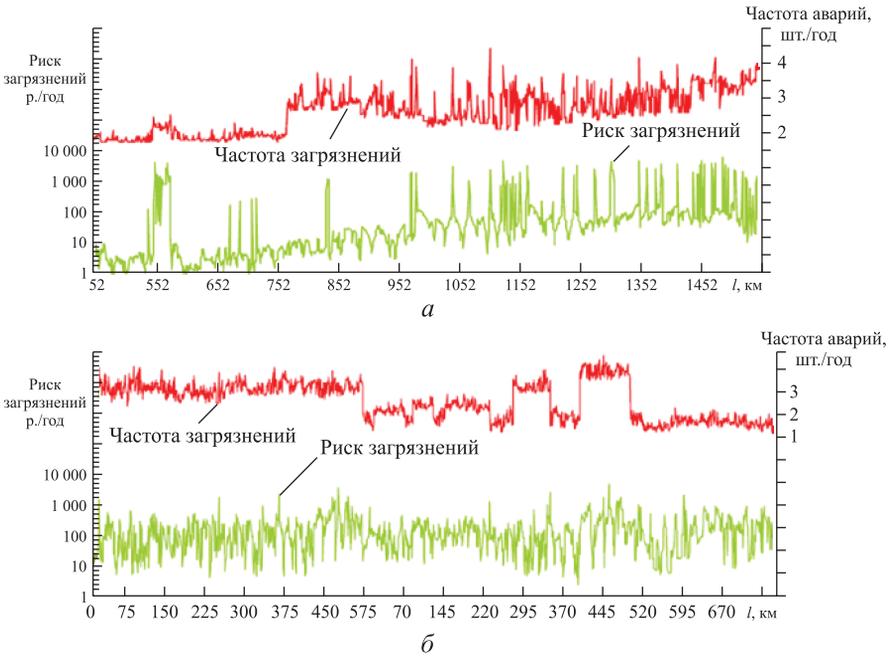


Рис. 2. Сравнительное распределение локальной частоты аварий и риска загрязнения окружающей среды

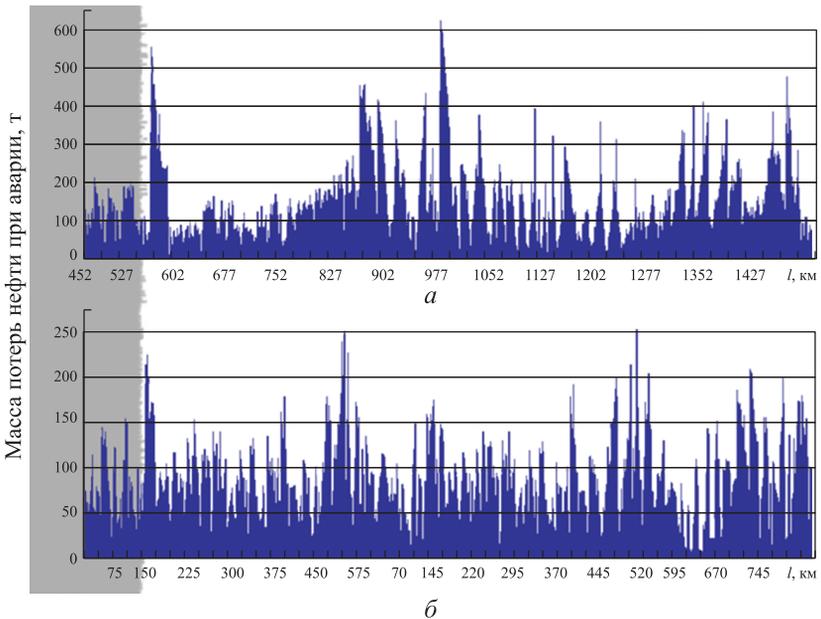


Рис. 3. Распределение средних аварийных потерь при утечке нефти на магистральных нефтепроводах «Новороссийск — Комсомольская» (а) и «Приморск — Ярославль» (б) протяженностью l

Заключение. В статье описаны методы, позволяющие рассчитать ущерб от токсического воздействия, загрязнения гидро- и атмосферы, а также от ущерба, нанесенного зданиям и людям. Подробно рассмотрены методы прогноза вероятности причинения ущерба человеческим и материальным ресурсам. В качестве примера рассмотрены два магистральных нефтепровода «Приморск — Ярославль» и «Новороссийск — Комсомольская», частота аварий на которых и риск загрязнения окружающей среды наглядно демонстрируют необходимость прогнозирования ущерба различного рода.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Аронов И.З. Современные проблемы безопасности технических систем и анализа риска. *Стандарты и качество*, 1998, № 3, с. 45–51.
- [2] Грот М. Де. *Оптимальные статистические решения*, пер. с англ. Москва, Мир, 1974, 493 с.
- [3] Маганов Р.У., Александров А.И., Черноплеков А.Н. Как профессионально управлять промышленной безопасностью? Основные направления совершенствования системы управления промышленной безопасностью, охраной окружающей среды и труда. *Нефть России*, 2000, № 1, с. 36–43.
- [4] Маршалл В. *Основные опасности химических производств*. Москва, Мир, 1989, 671 с.
- [5] Гражданкин А.И., Лисанов М.В., Печеркин А.С. Использование вероятностных оценок при анализе безопасности опасных производственных объектов. *Безопасность труда в промышленности*, 2001, № 5, с. 33–36.
- [6] Киселев А.В., Савватеева Л.А. *Методические рекомендации по оценке риска здоровью населения от загрязнений атмосферного воздуха*. Санкт-Петербург, Дейта, 1995, 54 с.
- [7] Лисанов М.В., Мартынюк В.Ф., Печеркин А.С. и др. Перспективы нормативного обеспечения анализа риска магистральных нефтепроводов. *Трубопроводный транспорт нефти*, 1996, № 8, с. 8–19.
- [8] Лисанов М.В., Мартынюк В.Ф., Печеркин А.С. и др. Концепция методического руководства по оценке степени риска магистральных трубопроводов. *Трубопроводный транспорт нефти*, 1997, № 12, с. 8–14.

Статья поступила в редакцию 29.10.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кузьмина М.С. Методы прогноза вероятности причинения ущерба человеческим и материальным ресурсам. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 9. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/technic/1328.html>

Кузьмина Марина Сергеевна родилась в 1991 г., студентка 6-го курса кафедры «Высшая математика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор четырех научных работ. Область научных интересов: теория вероятностей, статистический анализ цензурированных данных, применение статистического анализа для расчета ущерба и рисков. e-mail: Puesta@yandex.ru

Methods of predicting a probability of damnification of human and material resources

© M.S. Kuzmina

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article considers methods of predicting damage to human and material resources. It presents methods of calculating damage from toxic impacts, from pollution of the hydro- and atmosphere, as well as damage caused to buildings and people. Information on this topic has been compiled and synthesized. Particular attention was paid to the probit function and its application in the field. An example of calculating risks of accidents on pipelines is given.

Keywords: *probit function, prediction method, damage, damaging factors, cost, criterion.*

REFERENCES

- [1] Aronov I.Z. *Standarty i kachestvo — Standards and Quality*, 1998, no. 3, pp. 45–51.
- [2] De Groot M.H. *Optimal statistical decisions*, 1970. Moscow, Mir Publ., 1974, 491 p. [in Russian].
- [3] Maganov R.U., Aleksandrov A.I., Chernoplekov A.N. *Neft' Rossii — Oil of Russia*, 2000, no. 1, pp. 36–43.
- [4] Marshall V.C. *Major Chemical Hazards*. Chichester, Ellis Horwood, Ltd. Publ., 1987.
- [5] Grazhdankin A.I., Lisanov M.V., Pecherkin A.S. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti — Safety in Industry*, 2001, no. 5, pp. 33–36.
- [6] Kiselev A.V., Savvateyeva L.A. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke riska zdorov'yu naseleniya ot zagryazneniy atmosfernogo vozdukha* [Methodical recommendations on the assessment of health risk from air pollution]. St.-Petersburg, News Agency "Deita", 1995, 54 p.
- [7] Lisanov M.V., Martynyuk V.F., Pecherkin A.S., et al. *Truboprovodnyi transport nefi — Pipeline transport of oil*, 1996, no. 8, pp. 8–19.
- [8] Lisanov M.V., Martynyuk V.F., Pecherkin A.S., et al. *Truboprovodnyi transport nefi — Pipeline transport of oil*, 1997, no. 12, pp. 8–14.

Kuzmina M.S. (b. 1991) is a 6th year student of the Higher Mathematics Department at Bauman Moscow State Technical University. She is the author of four published scientific work. Research interests: probability theory, statistical analysis of censored data, application of statistical analysis for calculation of damages and risks. e-mail: Puesta@yandex.ru