

# Методические рекомендации по определению количества пострадавших при чрезвычайных ситуациях техногенного характера<sup>1</sup>

**В.А. Акимов, А.А. Быков, В.Ю. Востоков, Т.Л. Ляховец, В.П. Малышев**

*Центр стратегических исследований МЧС России, Москва*

## **Аннотация**

«Методические рекомендации...» (далее — Рекомендации) разработаны в соответствии с Планом-графиком выполнения мероприятий по созданию системы независимой оценки рисков и контроля в области пожарной безопасности, гражданской обороны и защиты населения от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации<sup>2</sup>. Областью применения данных Рекомендаций может также стать сфера действия готовящегося к принятию во втором чтении ФЗ «Об обязательном страховании гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда в результате аварии на опасном объекте».

В основу разработки Рекомендаций положен принцип компромисса между точностью оценок и простотой расчетов. Этот принцип был ранее реализован в международном документе «Руководство по классификации и определению приоритетности рисков, связанных с крупными авариями на объектах перерабатывающей и смежных отраслей промышленности», где сформирована система таблиц, позволяющая по виду и объему опасных веществ оценить размер и форму зоны безвозвратных потерь среди персонала и населения и по простому алгоритму рассчитать количество погибших в случае аварии. При разработке Рекомендаций идея формирования системы таблиц была реализована на возможность упрощенного расчета максимально возможного количества пострадавших при чрезвычайных ситуациях (количество людей, погибших или получивших ущерб здоровью, т.е. сумма безвозвратных и санитарных потерь) без существенной потери точности. В процессе работы были определены типы геометрических форм для зон санитарных потерь (одновременно произведена корректировка одной из форм зоны безвозвратных потерь); реструктурирована кодификация и упрощена система классификации опасных веществ; упрощен алгоритм расчета зоны безвозвратных потерь; получены точные и приближенные решения для масштаба зоны санитарных потерь, размера поперечного сечения и площади; выведены соотношения указанных параметров для зон безвозвратных и санитарных потерь; рассчитаны площади и размеры зоны санитарных потерь в соответствии с введенной классификацией. Подробное описание полученных решений содержится в Приложении к Рекомендациям.

## **Ключевые слова:**

*чрезвычайная ситуация, авария, зона поражения, пожары, взрывы, аварийно химически опасные вещества, пострадавшие, погибшие, ущерб здоровью*

<sup>1</sup> Утверждены первым заместителем Министра Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Р.Х. Цаликовым 1 сентября 2007 г. № 1-4-60-9-9. Публикуется в журнальном варианте с сокращениями.

<sup>2</sup> Утвержден Министром Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий С.К. Шойгу 27.03.2007, № 1-4-50-10-9.

# Methodical Recommendations for Estimation of the Number of Fatalities in Technological Emergencies<sup>3</sup>

V.A. Akimov, A.A. Bykov, V.Yu. Vostokov, T.L. Liakhovets, V.P. Malyshev

Center for Strategic Research in Civil Defense, EMERCOM of Russia, Moscow

## Abstract

The Recommendations were developed under the Action Plan for Creation of a System of Independent Risk Assessment and Control in Fire Safety, Civil Defense and Protection of Population against Natural and Technological Emergency Situations in the Russian Federation.<sup>4</sup> The Recommendations may also be applicable within the scope of the pending Federal Law on *Compulsory Liability Insurance of Owners of Hazardous Enterprises for the Infliction of Harm as a Result of an Accident at the Hazardous Facility*.

The Recommendations are based on a trade-off between the accuracy of estimates and the calculation simplicity.

This trade-off principle was first implemented in the *Manual for the classification and prioritization of risks due to major accidents in process and related industries* prepared by the International Atomic Energy Agency, where they had, among other things, compiled a set of tables, using which one could assess the size and shape of an area of permanent losses among the personnel and the population and then, using a simple algorithm, calculate the number of fatalities in case of an accident. In these Recommendations, the idea is implemented of using a set of compiled tables to simplify the calculation of maximum possible number of victims in emergency situations (the total number of dead and injured, i.e. the sum of permanent and sanitary losses) without a significant loss in accuracy. In the course of the work, we defined the types of the geometric shapes for areas of sanitary losses (and corrected one of the shapes of permanent loss areas); restructured the codification and simplified the classification of hazardous substances; simplified the calculation algorithm for a zones of permanent losses; obtained exact and approximate solutions for the scale of a zone of sanitary losses, its cross-section and area; derived the ratios of the said parameters for zones of permanent and sanitary losses; calculated the areas and dimensions of zones of sanitary losses in accordance with the proposed classification. A detailed description of the obtained solutions is given in the Appendix to the Recommendations.

## Key words:

emergency, accident, effect area, fires, explosions, hazardous chemical substances, victims, fatalities, damage to health

## Содержание

1. Общие положения

2. Процедура определения количества пострадавших

3. Примеры оценки количества пострадавших

Приложение. Теоретическое обоснование разработки методических рекомендаций по определению количества пострадавших при ЧС

Литература

<sup>3</sup> Approved by First Deputy Minister R.Kh.Tsalikov of the Russian Federation Ministry for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, September 1, 2007, No. 1-4-60-9-9. This publication is an abridged version for the journal.

<sup>4</sup> The Action Plan was approved by the Russian Federation Minister for Civil Defense, Emergency Situations and Natural Disaster Damage Control S.K. Shoigu on 27.03.2007, No. 1-4-50-10-9.

## **1. Общие положения**

### **1.1. Основание и цели**

а) Настоящие методические рекомендации (далее — Рекомендации) разработаны в соответствии с «План-графиком выполнения мероприятий по созданию системы независимой оценки рисков и контроля в области пожарной безопасности, гражданской обороны и защиты населения от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации»<sup>5</sup>.

б) Рекомендации устанавливают методические принципы, соответствующие упрощенные алгоритмы и процедуру определения максимально возможного количества пострадавших в результате аварии на опасных объектах, не имеющих в своем составе сложных технических систем (автозаправочные станции, объекты хранения аварийно химически опасных веществ и др.).

в) Рекомендации разработаны на основе подходов, предложенных в международном «Руководстве по классификации и определению приоритетности рисков, связанных с крупными авариями на объектах перерабатывающей и смежных отраслей промышленности»<sup>6</sup>.

### **1.2. Основные понятия, область и границы применения**

а) Под числом пострадавших в соответствии с Постановлением правительства Российской Федерации от 21 мая 2007 года № 2640 понимается количество людей, погибших или получивших в результате чрезвычайной ситуации ущерб здоровью.

б) Под последствиями аварии понимается количество пострадавших из числа проживающих или работающих на территории, прилегающей к объекту, на котором осуществляется деятельность с использованием пожаровзрывоопасных и аварийно химически опасных веществ или транспортировка указанных веществ трубопроводным транспортом.

в) В Рекомендациях учитываются последствия, обусловленные:

- пожарами;
- взрывами;
- выбросами токсических веществ за пределы опасных объектов.

г) В Рекомендациях не учитываются последствия:

- для здоровья персонала объектов;
- для окружающей природной среды.

д) Оценки количества пострадавших, полученные при использовании Рекомендаций, могут служить основанием для проведения более детального количественного анализа, если принятие конкретных решений требует этого.

## **2. Процедура определения количества пострадавших**

### **2.1. 1-й шаг: идентификация кода опасного объекта**

На первом этапе оценки количества пострадавших необходимо идентифицировать объект по виду опасного вещества и форме его использования (хранение, производство, переработка). Для этого по таблице 2.1.1 (стационарные объекты) или таблице 2.1.2 (объекты трубопроводного транспорта) следует определить необходимый для дальнейших оценок цифровой код, соответствующий конкретному опасному веществу и форме его использования или транспортировки.

### **2.2. 2-й шаг: определение класса воздействия опасного объекта**

На втором этапе оценки количества пострадавших по цифровому коду, идентифицирующему объект, и объему (массе) опасного вещества, находящегося на этом объекте, по таблице 2.2.1 (стационарные объекты) или коду и максимальному размеру диаметра трубопровода по таблице 2.2.2 (объекты трубопроводного транспорта) определяется класс воздействия опасного объекта.

### **2.3. 3-й шаг: определение параметров зоны поражения**

На третьем этапе оценки количества пострадавших определяются параметры зоны поражения (рис. 2.3.1), состоящей из:

- **области безвозвратных потерь** (считается, что в результате чрезвычайной ситуации все оказавшиеся в этой области люди должны погибнуть, при этом предполагается, что за ее пределами гибели людей не происходит);
- **области санитарных потерь** (считается, что в результате чрезвычайной ситуации здоровью

<sup>5</sup> Утвержден Министром Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий 27.03.2007 № 1-4-50-10-9.

<sup>6</sup> Manual for the classification and prioritization of risks due to major accidents in process and related industries. IAEA, Vienna, 1993. IAEA-TECDOC-727. ISSN 1011-4289 (Статус документа, подходы и алгоритмы, применяемые в нем, а также обоснование их использования для оценки количества пострадавших представлены в приложении).

Таблица 2.1.1

Перечень опасных веществ, видов деятельности и их цифровые коды для стационарных объектов

Тип вещества	Свойства	Вещества (примеры)		Форма использования	Код
Взрывчатые вещества, в том числе взрывоопасные пыли		Боеприпасы Взрывоопасные пыли Нитрат аммония Нитроглицерин	Органические пероксиды (тип В) Тринитротолуол	Хранение навалом	1
				Хранение на стеллажах	2
Горючие жидкости	Давление насыщенных паров при 20 °С менее 0,3 бар	Аллиловый спирт Анилин Ацеталь Ацетальдегид Ацетон Ацетонитрил Бензальдегид Бензилхлорид Бензол Бутадион Бутанол Бутанон Бутилдигликоль Бутилформиат Бутилхлорид Винилацетат Гексан Гептан Дизельное топливо Диметилкарбонат Диметилформамид Диметилциклогексан Диоксан Дихлорбензол Дихлорбутан Дихлорпропан Дихлорпропен Диэтиламин Диэтилкарбонат Диэтилкетон Изоамиловый спирт Изобутанол Изобутилацетат Изопропанол Изопропиловый эфир Ксилен	Метанол Метилацетат Метилбутилкетон Метилвинилкетон Метилгликоль Метилгликоляцетат Метилизобутилкетон Метилметакрилат Метилпропионат Метилциклогексан Нафталин Нефть Нитробензол Октан Пиперидин Пиридин Пропилацетат Стирол Толуол Топливное масло Триоксан Триэтиламин Фенол Фурилкарбинол Фурфурол Циклогексен Этанол Этаноламин Этилбензол Этиленгликоль Этиленхлоргидрин Этилгликоляцетат Этилкарбонат Этилакрилат Этилсиликат Этилформиат	Хранение в заглубленных резервуарах	3
				Другие формы хранения, производство, переработка	4
	Давление насыщенных паров при 20 °С более 0,3 бар	Бензин (газолин) Дисульфид углерода Диэтиловый эфир Изопропен Изопропиловый спирт Лигроин (керосин) Метилформиат	Пентан Природный газоконденсат Пропанол Пропиленоксид Раствор коллодия Циклопентан Этилбромид	Хранение в заглубленных резервуарах	5
				Другие формы хранения, производство, переработка	6

<i>Тип вещества</i>	<i>Свойства</i>	<i>Вещества (примеры)</i>		<i>Форма использования</i>	<i>Код</i>
<b>Воспламеняющиеся газы</b>	Сжиженные давлением	1,3-бутадиен Бутан Бутен Винилметилэфир Винилфторид Винилхлорид Дифторэтан Диметилэфир Изобутан Изобутилен Метилэфир Метилфторид	Оксид углерода (II) Пропилен Пропан Пропилен СПГ Циклобутан Циклопропан Этан Этиленоксид Этилфторид Этилхлорид	Хранение в наземных хранилищах	7
				Другие формы хранения, производство, переработка	8
	Сжиженные охлаждением	Метан Метилацетилен Природный газ	Этилен (см. также 7—9)	Хранение в заглубленных резервуарах	9
				Другие формы хранения, производство, переработка	10
	Под давлением	Ацетилен Бутан Водород	СУГ Пропан	Баллоны и цистерны (25—100 кг)	11
<b>Токсичные жидкости</b>	Низкотоксичные	Аллиламин Аллилбромид Аллилхлорид Ацетилхлорид Винилиденхлорид Диметилгидразин Диметилсульфат Диметилсульфид Дихлордиэтиловый эфир Изопропиламин Метакролеин Метилгидразин Пентакарбонил железа Перхлорметилмеркаптан	Перхлорметилтиол Тетраметилсвинец Тетраэтилсвинец Тетраоксид осмия Трихлорсилан Фенилкарбиламинхлорид Фосфора оксихлорид Фосфора трихлорид Хлорид серы Хлоропикрин Эпихлорогидрин Этантол Этилизоцианат Этилтрихлорсилан	Хранение в заглубленных резервуарах	12
				Другие формы хранения, производство, переработка	13
	Среднетоксичные	Азотная кислота Акрилонитрил Акролеин Бром Диметилхлорсилан Изобутиламин Метилдихлорсилан Метилйодид Метилтрихлорсилан Метилхлорформиат Олеум Плавиковая кислота	Пропиленмин Пропиленоксид Сульфид углерода Тетрахлорид олова Формальдегид (p-p) Хлорацетальдегид Хлорметилэфир Цианбромид Этиленмин Этилхлорформиат	Хранение в заглубленных резервуарах	14
				Другие формы хранения, производство, переработка	15
	Высокотоксичные	Диоксид азота Карбонил никеля Метилизоцианат Пентаборан	Пентафторид серы Синильная кислота Триоксид серы Тетрабутиламин	Хранение в заглубленных резервуарах	16
				Другие формы хранения, производство, переработка	17

<i>Тип вещества</i>	<i>Свойства</i>	<i>Вещества (примеры)</i>		<i>Форма использования</i>	<i>Код</i>
<b>Токсичные газы (сжиженные давлением)</b>	Низко-токсичные	Винилхлорид Окись этилена Этилмин		Производство, переработка, хранение в заглубленных резервуарах и других формах	18
	Средне-токсичные	Аммиак Винилбромид Диметиламин Диоксид серы Метилбромид Окись углерода (II) Перхлорилфторид Силан	Тетрафторсилан Триметиламин Трифторид азота Трифторид бора Трифторид хлора Фтор Фтороводород	Производство, переработка, хранение в заглубленных резервуарах и других формах	19
	Высоко-токсичные	Арсин Борэтан Бромоводород Гексафторацетон Гексафторид селена Гексафторид теллура Диоксид хлора Дифторид кислорода Дихлорацетилен Карбонилфторид Карбонилхлорид (фосген) Кетен Метилхлорид Моноксид азота Нитрозилхлорид	Селеноводород Сероводород Статин Стибин Сульфурилфторид Сульфид карбонида Тетраоксид диазота Тетрафторид серы Трихлорид бора Формальдегид Фосфин Фтор Хлор Хлороводород Хлорциан	Производство, переработка, хранение в заглубленных резервуарах и других формах	20
<b>Токсичные газы (сжиженные охлаждением)</b>	Низко-токсичные	См. 18		См. 18—20	21
	Средне-токсичные	См. 19		См. 18—20	22
	Высоко-токсичные	См. 19		См. 18—20	23
<b>Продукты крупнотоннажных химических производств</b>		Пестициды		См. 18—20	24
		Удобрения (азотсодержащие)		См. 18—20	25
		Серная кислота		См. 18—20	26
		Пластики (хлорсодержащие)		См. 18—20	27

Таблица 2.1.2

## Перечень опасных веществ и их цифровые коды для объектов трубопроводного транспорта

<i>Тип вещества</i>	<i>Свойства</i>	<i>Вещества (примеры)</i>	<i>Код</i>
<b>Горючие жидкости</b>	Давление насыщенных паров при 20 °С менее 0,3 бар	Дизельное топливо, нефть	1*
	Давление насыщенных паров при 20 °С более 0,3 бар	Бензин, керосин	2*



Тип вещества	Свойства	Вещества (примеры)		Код
Воспламеняющиеся газы	Сжиженные давлением	Бутан, пропан		3*
	Под давлением	Водород Метан Этилен	Метилацетилен Природный газ	4*
Токсичные газы	Среднетоксичные	См. 19		5*
	Высокотоксичные	См. 20		6*
	Высокотоксичные (под давлением более 25 атм)	См. 20		7*

**Примечания:**

• Для веществ, не указанных в перечне таблицы 2.1.1, класс токсичности может быть определен по значению величины  $LC_{50}$  (в ppm, крысы, 4 ч): если значение указанного параметра меньше 0,1, то вещество относится к классу высокотоксичных, от 0,1 до 10 – среднетоксичных, больше 10 – низкотоксичных.

• Если опасность на объекте может быть вызвана более чем одним веществом, причем независимо друг от друга, необходимо проанализировать все варианты по отдельности. Также следует учесть возможное образование в процессах, сопровождающих чрезвычайную ситуацию, продуктов, относящихся к классу опасных веществ.

• Если вещества действуют совместно и имеют один цифровой код, то они рассматриваются как одно эквивалентное вещество.

• Если опасное вещество является и горючим (воспламеняющимся), и токсичным необходимо последовательно оценить последствия чрезвычайной ситуации, обусловленной горением/взрывом и токсическим воздействием.

Таблица 2.2.1

**Определение класса воздействия стационарного объекта**

Цифровой код	Количество вещества, т								
	до 1	1—5	5—10	10—50	50—200	200—1000	1000—5000	5000—10 000	свыше 10 000
1	A I	B I	B I	C I	C I	D I	—	—	—
2	B III	B III	C III	C I	C I	D I	—	—	—
3	—	—	—	—	—	A I	B I	B I	C I
4	—	—	—	A I	B I	C I	D II	—	—
5	—	—	—	—	—	B I	C II	C II	D II
6	—	—	—	B II	C II	D II	E II	—	—
7	—	A I	B I	C I	D I	E I	—	—	—
8	—	B II	C III	C III	D III	E III	—	—	—
9	—	—	—	—	—	B I	C II	C II	D II
10	—	—	—	B II	C II	D II	E II	—	—
11	—	—	C III	C II	C I	C I	—	—	—
12	—	—	—	—	—	A II	A II	B II	C III
13	—	—	—	A III	A II	B II	C II	C II	C II
14	—	—	—	A III	B III	D III	E III	F III	F III
15	—	B II	C III	D III	E III	F III	F III	—	—
16	—	—	A II	B III	C III	E III	F III	G III	G III
17	B II	C II	D III	E III	F III	F III	G III	—	—
18	A II	B II	B II	C III	C II	D III	D III	D III	E III
19	B II	C II	C II	D III	E III	F III	F III	G III	H III
20	C II	D III	E III	E III	F III	G III	G III	—	—
21	—	—	—	A II	A II	B II	B II	C II	D III
22	—	A II	B II	C II	D III	D III	E III	F III	G III
23	B II	C II	D III	E III	E III	F III	F III	G III	H III
24	—	—	—	B II	D III	E III	E III	—	—
25	—	A II	A II	C III	E III	F III	F III	—	—
26	—	—	A II	B II	C III	D III	D III	—	—
27	—	—	—	A II	C III	D III	D III	—	—

Таблица 2.2.2

Определение класса воздействия объекта трубопроводного транспорта

Цифровой код	Диаметр (максимальный) трубопровода, м						
	до 0,02	0,02—0,04	0,04—0,1	0,1—0,2	0,2—0,4	0,4—1	свыше 1
1*	—	—	—	—	A I	A I	A I
2*	—	—	—	—	A I	B II	B II
3*	C I	C I	C I	D I	E I	E I	E I
4*	—	—	—	—	A I	A I	B I
5*	E III	E III	E III	F III	—	—	—
6*	F III	F III	F III	G III	—	—	—
7*	D III	E III	F III	—	—	—	—

всех людей, оказавшихся в этой области, будет причинен в той или иной мере ущерб, при этом предполагается, что нанесение ущерба здоровью людей за ее пределами не происходит).



Рис. 2.3.1. Зона поражения

Код класса воздействия опасного объекта, определенный на втором этапе, имеет буквенную (А—Н) и цифровую (I—III) компоненту. Буквенная компонента кода класса воздействия по данным, представленным в таблице 2.3.1, позволяет оценить максимальный линейный масштаб зоны поражения  $R_z$ .

Таблица 2.3.1

Максимальный линейный масштаб зоны поражения  $R_z$

Буквенная компонента	$R_z$ , м
A	25
B	50
C	100
D	200
E	500
F	1 000
G	3 000
H	10 000

Цифровая компонента кода класса воздействия опасного объекта определяет тип зон поражения, схематически изображенных на рис. 2.3.2 — рис. 2.3.4.

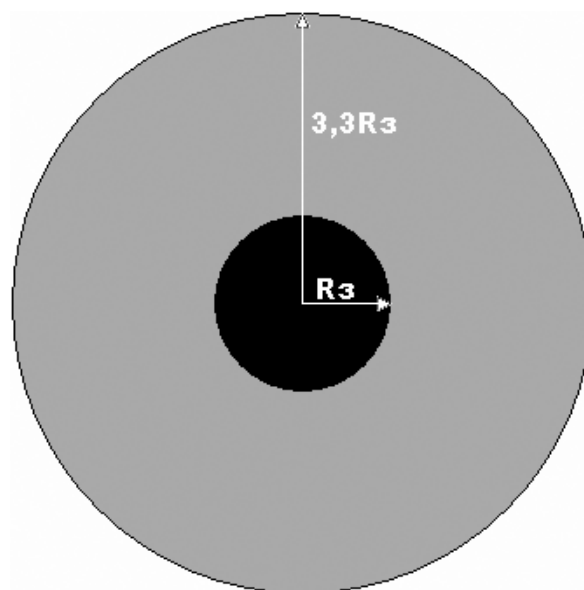


Рис. 2.3.2. Зона поражения — Тип I (круг) — характерна при взрывах

По коду класса воздействия из таблицы 2.3.2 можно определить максимальные площади областей безвозвратных и санитарных потерь.

Таблица 2.3.2

Максимальные площади областей безвозвратных ( $S_{без}$ ) и санитарных ( $S_{сан}$ ) потерь, га<sup>7</sup>

Буквенная компонента кода	Цифровая компонента кода					
	I		II		III	
	$S_{без}$	$S_{сан}$	$S_{без}$	$S_{сан}$	$S_{без}$	$S_{сан}$
A	0,20	1,94	0,05	0,44	0,01	0,08
B	0,79	7,77	0,19	1,75	0,03	0,34
C	3,14	31,1	1,75	7,01	0,14	1,35
D	12,6	124	3,00	28,0	0,54	5,40
E	78,5	777	18,8	175	3,38	33,8
F	—	—	—	—	13,5	135
G	—	—	—	—	122	1 215
H	—	—	—	—	1 350	13 500

<sup>7</sup> 1га = 10<sup>4</sup> м<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> км<sup>2</sup>.



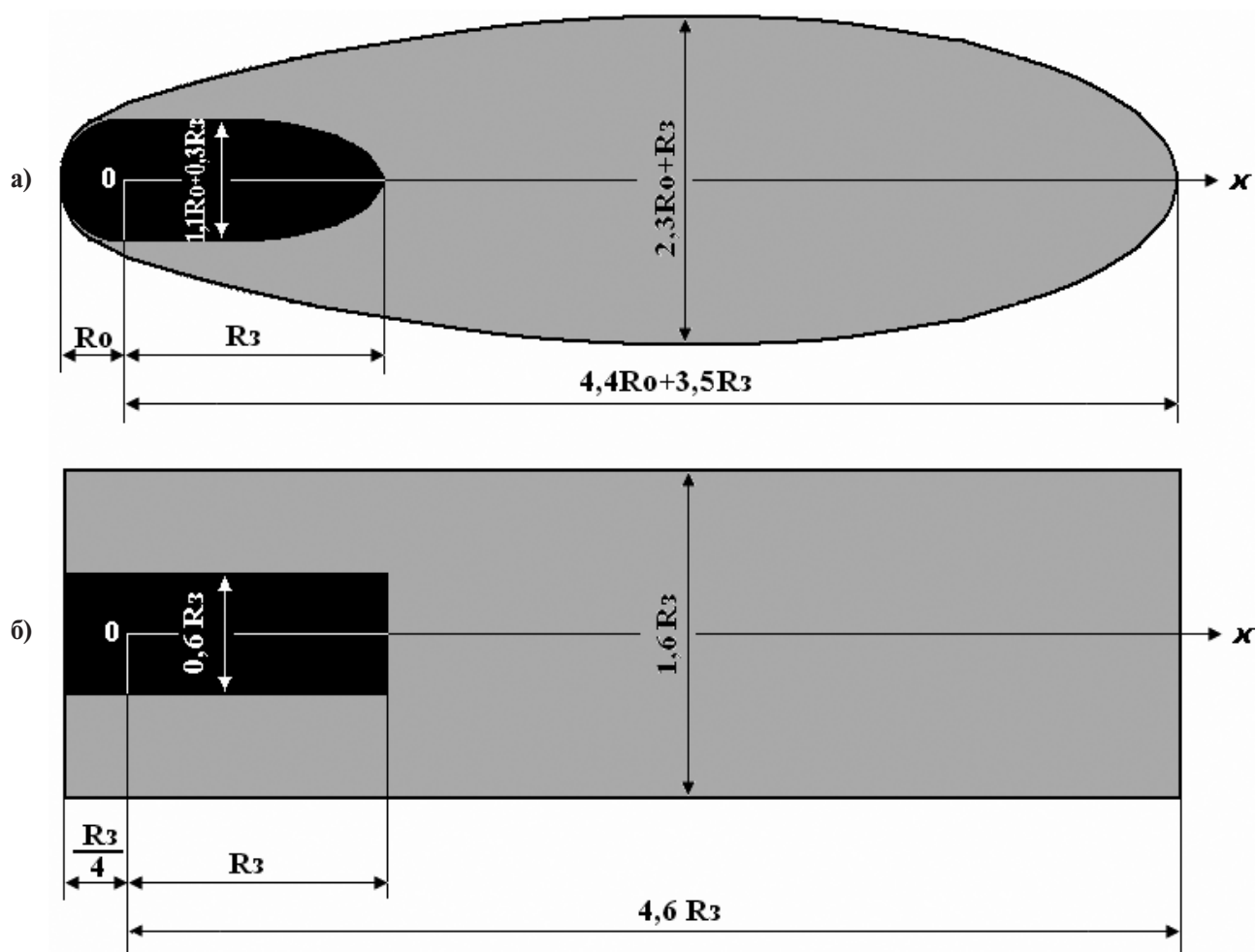


Рис. 2.3.3. Зона поражения — Тип II (широкая полоса) — характерна при горении облака воспламеняющегося газа и испарении больших проливов токсичных жидкостей (направление оси  $0x$  совпадает с направлением ветра): а) результат расчета, б) шаблон для упрощенной оценки площадей областей безвозвратных и санитарных потерь

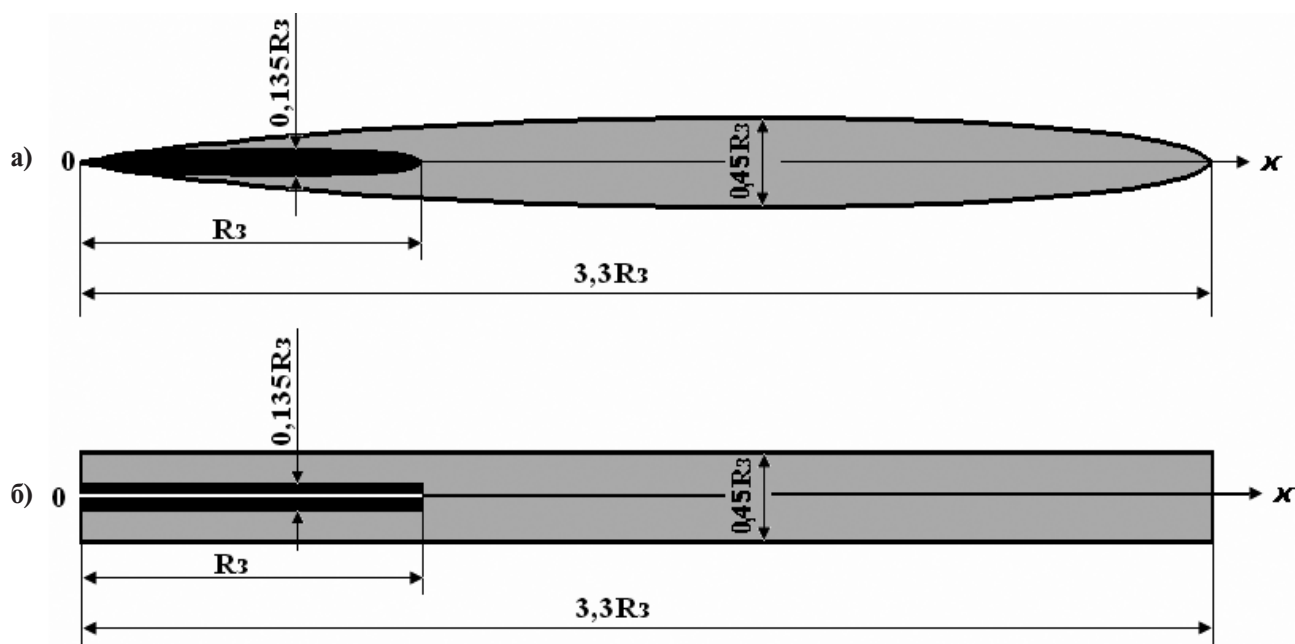


Рис. 2.3.4. Зона поражения — Тип III (узкая полоса) — характерна при дрейфе облака токсичного газа (направление оси  $0x$  совпадает с направлением ветра): а) результат расчета, б) шаблон для упрощенной оценки площадей областей безвозвратных и санитарных потерь

## 2.4. 4-й шаг: определение числа людей, попавших в зону поражения

На четвертом этапе оценки количества пострадавших определяется число людей, попавших в результате чрезвычайной ситуации в области безвозвратных ( $N_{без}$ ) и санитарных ( $N_{сан}$ ) потерь. Это можно сделать, умножив площади областей безвозвратных и/или санитарных потерь ( $S_{без}$ ,  $S_{сан}$ ) на соответствующие доли этих площадей ( $k_{без}$ ,  $k_{сан}$ ), попадающие в зоны постоянного пребывания людей, и на плотность распределения людей ( $c$ ):

$$N_{без} = c \cdot k_{без} \cdot S_{без};$$

$$N_{сан} = c \cdot k_{сан} \cdot S_{сан}.$$

Указанные доли площадей ( $k_{без}$ ,  $k_{сан}$ ) и/или сами площади ( $k_{без} \cdot S_{без}$ ,  $k_{сан} \cdot S_{сан}$ ) могут оцениваться приближенно, используя геоинформационные технологии, или вычисляются с помощью традиционных методов планиметрии при нанесении на карту шаблонов (рис. 2.3.2, рис. 2.3.3 б), рис. 2.3.4 б), выполненных в соответствующем масштабе.

Плотность распределения людей  $c$ , если она не известна и нет возможности ее определить, может быть взята из таблицы 2.4.1.

Таблица 2.4.1

Приближенная оценка плотности населения  
 $c$ , чел./га

Описание территории	$c$
Район фермерских хозяйств, хутора	5
Усадьбы	10
Деревни, зона индивидуальной застройки	20
Жилые районы низкоэтажной застройки	40
Жилые районы с застройкой повышенной этажности	80
Центральные части городов (магазины, учреждения культуры и т.д.)	160

При определении числа людей, попавших в результате чрезвычайной ситуации в зону поражения, необходимо учитывать, что оценку количества пострадавших выполняют для наиболее неблагоприятных условий. Тяжесть последствий для зон поражения II и III типов зависит от направления ветра, в связи с чем при оценке числа пострадавших следует направлять зону поражения (II и III типов) на наиболее заселенную часть территории, прилегающей к опасному объекту, как изображено на рис. 2.4.1.

## 2.5. 5-й шаг: определение количества пострадавших

Количество пострадавших — число безвозвратных ( $N_{без}^+$ ) и санитарных ( $N_{сан}^+$ ) потерь — может быть определено путем умножения числа

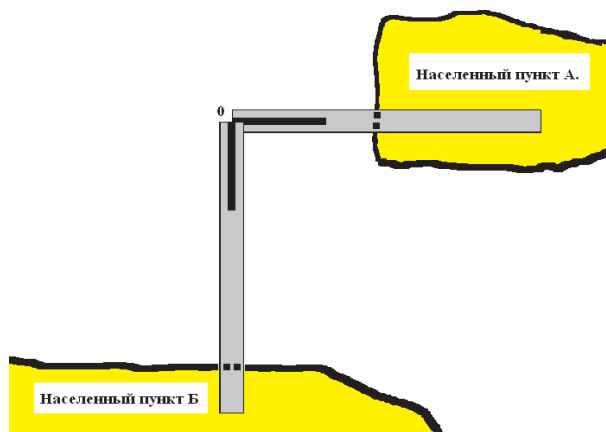


Рис. 2.4.1. Иллюстрация направления зоны поражения III типа на наиболее заселенную часть прилегающей к объекту «О» территории

**Примечание.** В представленном примере территория с постоянным проживанием людей не попадает в область безвозвратных потерь. Выбор населенного пункта (А или Б) для определения числа людей, попавших в область санитарных потерь, зависит от плотности населения в этих пунктах. (Выбирается вариант с большим количеством людей, попавших в зону поражения, — пример будет разобран в разделе 3.1.)

людей, попавших в результате чрезвычайной ситуации в области безвозвратных и санитарных потерь, на поправочный коэффициент смягчения последствий аварий  $f_m$ :

$$N_{без}^+ = f_m \cdot N_{без};$$

$$N_{сан}^+ = f_m \cdot N_{сан}.$$

Корректировка оценки возможного количества пострадавших на возможные действия по уменьшению последствий необходима, так как из-за:

- возможности принятия мер по спасению людей до начала действия поражающего фактора аварии;
- наличия индивидуальных средств защиты и укрытий и т.п.

позволяет в ряде случаев значительно снизить количество пострадавших. Значения поправочного коэффициента  $f_m$  определяются на основе цифрового кода вещества по данным таблицы 2.5.1.

## 3. Примеры оценки количества пострадавших

### 3.1. Пример 1

#### Исходные данные.

- На объекте «О» хранится 5000 тонн хлора, сжиженного давлением.
- Объект находится:

Поправочный коэффициент смягчения последствий аварий  $f_m$

Вещества	Цифровой код	Поправка $f_m$
Взрывчатые вещества	(1—2)	1
Горючие жидкости	(3—6), (1*—2*)	1
Воспламеняющиеся газы	(7—10), (3*—4*)	1
Воспламеняющиеся газы	(11)	0,1
Токсичные жидкости	(12—17, 24—27)	0,05
Токсичные газы	(18—20, 23), (5*—7*)	0,1
Токсичные газы	(21—22)	0,05

**Примечание.** Возможные меры по уменьшению последствий в большой степени зависят от типа аварии и вызвавшего ее вещества. Например, в случае взрыва возможности по уменьшению последствий ограничены и, следовательно, поправку не применяют ( $f_m = 1$ ). Для баллонов с горючими газами (цифровой код — 11)  $f_m = 0,1$ , т.к. они взрываются последовательно, а не одновременно. Малые значения для токсичных веществ объясняются тем, что:

- при расчете зон поражения выбирались наиболее благоприятные условия для распространения газообразной примеси в атмосфере, вероятность осуществления которых не превышает 0,2;
- необходимо определенное время для того, чтобы человек получил соответствующую токсодозу;
- необходимо время для распространения вещества на большое расстояние;
- человек успевает отреагировать на опасность благодаря запаху опасного вещества и проч.

- в 4,5 км к западу от населенного пункта А (район фермерских хозяйств);
- в 8,8 км к северу от населенного пункта Б (жилые районы города с застройкой повышенной этажности).

#### Расчет количества пострадавших

##### Шаг 1-й — идентификация кода объекта

По таблице 2.1.1 определяем — объекту, на территории которого хранится высокотоксичный газ хлор, сжиженный давлением, соответствует **цифровой код 20**.

##### Шаг 2-й — определение класса воздействия опасного объекта

По таблице 2.2.1 определяем — **класс воздействия опасного объекта** с цифровым кодом 20 и 5000 тонн вещества относится к категории **Г III**.

##### Шаг 3-й — определение параметров зоны поражения

а) По таблице 2.3.1 (буквенная компонента класса воздействия опасного объекта **Г**) определяем — максимальный линейный масштаб зоны поражения составляет **3000 метров**.

б) По таблице 2.3.2 (цифровая компонента класса воздействия опасного объекта **III**) определяем:

- область безвозвратных потерь имеет размер  $S_{без} = 122$  га;
- область санитарных потерь имеет размер  $S_{сан} = 1215$  га.

##### Шаг 4-й — определение числа людей, попавших в зону поражения

Накладываем шаблон для зоны поражения **III** типа (рис. 2.3.4 б), выполненный в соответствующем масштабе, на карту прилегающих территорий (рис. 2.4.1). Из чего следует, что:

- территория населенных пунктов **А** и **Б** не попадает в зону безвозвратных потерь, то есть  $k_{без} = 0$ ;

- в зону санитарных потерь может попасть 729 га населенного пункта **А** ( $k_{сан} \approx 0,6$ ) или 148,5 га населенного пункта **Б** ( $k_{сан} \approx 0,12$ ).

В соответствии с данными таблицы 2.4.1:

- в зону санитарных потерь населенного пункта **А** ( $c = 5$  чел./га) может попасть

$$N_{сан} = 5 \text{ чел./га} \cdot 729 \text{ га} = 3645 \text{ чел.};$$

- в зону санитарных потерь населенного пункта **Б** ( $c = 80$  чел./га) может попасть

$$N_{сан} = 80 \text{ чел./га} \cdot 148,5 \text{ га} = 11\,880 \text{ чел.}$$

Исходя из принципа выбора наихудших последствий для определения количества пострадавших выбираем вариант, при котором в зону санитарных потерь попадает населенный пункт **Б**.

##### Шаг 5-й — определение количества пострадавших

По таблице 2.5.1 определяем — поправочный коэффициент смягчения последствий аварий  $f_m$  в рассматриваемом примере опасного объекта (цифровой код **20**) равняется 0,1. То есть количество пострадавших составляет:

$$N_{сан}^+ = 0,1 \cdot 11\,880 \text{ чел.} = 1188 \text{ чел.}$$

## 3.2. Пример 2

#### Исходные данные

- На объекте «О» храниться 1700 баллонов с пропаном и бутаном. Каждый баллон вместимостью 40 кг.

- Объект находится в городе на стыке двух районов:

- на востоке, на расстоянии 20 м от склада, расположена зона индивидуальной застройки;

— на западе, на расстоянии 200 м, жилой район города с застройкой повышенной этажности.

#### Расчет количества пострадавших

##### Шаг 1-й — идентификация кода объекта

По таблице 2.1.1 определяем — объекту, на котором хранятся пропан и бутан в баллонах, соответствует **цифровой код 11**.

##### Шаг 2-й — определение класса воздействия опасного объекта

По таблице 2.2.1 определяем — **класс воздействия опасного объекта** с цифровым кодом **11** и 68 тоннами вещества ( $1700 \text{ баллонов} \times 40 \text{ кг} = 68\,000 \text{ кг}$ ) относится к категории **С I**.

##### Шаг 3-й — определение параметров зоны поражения

а) По таблице 2.3.1 (буквенная компонента класса воздействия опасного объекта **С**) определяем — линейный масштаб зоны поражения составляет **100 метров**.

б) По таблице 2.3.2 (цифровая компонента класса воздействия опасного объекта **I**) определяем:

- область безвозвратных потерь имеет размер  $S_{\text{без}} = 3,14 \text{ га}$ ;
- область санитарных потерь —  $S_{\text{сан}} = 31,1 \text{ га}$ .

##### Шаг 4-й — определение числа людей, попавших в зону поражения

Накладываем шаблон для зоны поражения **I** типа (рис 2.3.2), выполненный в соответствующем масштабе, на карту прилегающих территорий (рис. 4.2.1). Из чего видно, что:

- в зону безвозвратных потерь может попасть 1,17 га ( $k_{\text{без}} \approx 0,37$ ) зоны индивидуальной застройки;
- в зону санитарных потерь может попасть 19,38 га ( $k_{\text{сан}} \approx 0,63$ ), в том числе 4,77 га ( $k_{\text{сан1}} \approx 0,15$ ) жилого района города с застройкой повышенной этажности и 14,61 га ( $k_{\text{сан2}} \approx 0,47$ ) зоны индивидуальной застройки.

В соответствии с данными таблицы 2.4.1:

- в зону безвозвратных потерь ( $c_2 = 20 \text{ чел./га}$ ) может попасть

$$N_{\text{без}} = 20 \text{ чел./га} \cdot 1,17 \text{ га} \approx 24 \text{ чел.};$$

- в зону санитарных потерь ( $c_1 = 80 \text{ чел./га}$ ,  $c_2 = 20 \text{ чел./га}$ ) может попасть

$$N_{\text{сан}} = 80 \text{ чел./га} \cdot 4,77 \text{ га} + 20 \text{ чел./га} \cdot 14,61 \text{ га} \approx 674 \text{ чел.}$$

Исходя из принципа выбора наихудших последствий при определении числа людей, которые могут попасть в зону поражения, так же как и при других вычислениях округление всех значений производится в большую сторону.



Рис. 4.2.1. Иллюстрация к примеру 2

##### Шаг 5-й — определение количества пострадавших

По таблице 2.5.1 определяем — поправочный коэффициент смягчения последствий аварий в рассматриваемом примере опасного объекта (цифровой код 11) равняется 0,1. То есть количество пострадавших составляет:

$$N_{\text{без}}^+ = 0,1 \cdot 24 \text{ чел.} \approx 3 \text{ чел.}$$

$$N_{\text{сан}}^+ = 0,1 \cdot 674 \text{ чел.} \approx 68 \text{ чел.}$$

Общее количество пострадавших составляет  $3 + 68 \approx 71$  человек.

## Приложение. Теоретическое обоснование разработки методических рекомендаций по определению количества пострадавших при ЧС

В 1993 году Международное агентство по атомной энергии (IAEA) выпустило «Руководство по классификации и определению приоритетности рисков, связанных с крупными авариями на объектах перерабатывающей и смежных отраслей промышленности» (IAEA-TEC-DOC-727) [1]. Этот документ был результатом совместного проекта IAEA с Программой ООН по охране окружающей среды (UNEP), Организацией объединенных наций по промышленному развитию (UNIDO) и Всемирной организацией здравоохранения (WHO).

Описанные в Руководстве [1] подходы и алгоритмы могут быть использованы при оценке последствий крупных аварий как на стационарных промышленных объектах, на которых осуществляется применение или хранение опасных веществ, так и при их транспортировке автомобильным, железнодорожным, трубопроводным и внутренним водным транспортом. Указанный

документ содержит систему таблиц, позволяющую по виду (240 наименований) и объему (от 0,2 до 10 000 тонн) опасных веществ оценить размер и форму зоны безвозвратных потерь среди персонала и населения в случае аварии. В различных редакциях Руководство [1] используется до сих пор.

Анализ методики, используемой в [1], показал, что на ее базе возможна разработка методических рекомендаций по определению количества пострадавших при чрезвычайных ситуациях, под которыми в соответствии с [2] понимается количество людей, погибших или получивших ущерб здоровью, то есть сумма безвозвратных и санитарных потерь.

## 1. Критерий определения границ зоны безвозвратных потерь

В работе [1] принимается, что зона, где физическое или токсическое воздействие приводит к смертности с вероятностью выше 50%, является зоной безвозвратных потерь, то есть все люди, оказавшиеся там, должны погибнуть, при этом предполагается, что за ее пределами гибели людей не происходит. Такое предположение с математической точки зрения представляется рациональным, что может быть проиллюстрировано на следующем примере.

При оценке числа безвозвратных потерь считается, что вероятность гибели человека  $v_{cm}$  в результате воздействия тех или иных поражающих факторов описывается соотношением, имеющим форму нормального закона распределения вероятности, аргументом которого служит так называемая пробит-функция  $Pr$ :

$$v_{cm} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du.$$

В нормативных документах и литературных источниках для оценки последствий взрыва используют различные варианты зависимости пробит-функции от таких параметров ударной волны как избыточное давление и импульс. (Подробный анализ этих зависимостей дан в [3].) Как представляется для определения вероятности гибели человека в результате воздействия на него воздушной ударной волны целесообразно применять пробит-функцию, имеющую следующий вид [4, 5]:

$$Pr = 5,0 - 5,74 \ln \left( \frac{4,2 P_0}{P_s + P_0} + \frac{1,3 P_0^{1/3} m^{1/3}}{i} \right), \quad (1)$$

где:  $P_s$  — избыточное давление ударной волны;  $P_0$  — атмосферное давление;  $i$  — импульс ударной волны;  $m$  — масса тела человека.

(Здесь и далее по тексту размерность всех параметров соответствует Международной системе единиц СИ.)

Используя соотношения, описывающие изменения избыточного давления и импульса ударной волны по мере ее удаления от эпицентра [6]:

$$\frac{P_s}{P_0} = \frac{0,95}{(R/q^{1/3})} + \frac{3,9}{(R/q^{1/3})^2} + \frac{13}{(R/q^{1/3})^3}, \quad (2)$$

$$i = 540 q^{2/3} / R,$$

где:  $R$  — расстояние от эпицентра взрыва,  $q$  — тротиловый эквивалент массы взрывчатых веществ, получим, что при постоянной плотности распределения людей на площади, прилегающей к месту взрыва (количество человек на единицу площади):

- число людей, находящихся внутри рассматриваемой зоны, от общего числа безвозвратных потерь составит:

$$\frac{\pi c R_{50}^2}{2\pi c \int_0^{R_{50}} v_{cm}(r) r dr} = (97,05 \div 98,05)\%, \quad (3a)$$

- доля погибших, находящихся внутри рассматриваемой зоны, составит:

$$\frac{2\pi c \int_0^{R_{50}} v_{cm}(r) r dr}{\pi c R_{50}^2} = (92,75 \div 93,75)\%, \quad (36)$$

- доля оставшихся в живых внутри «зоны безвозвратных потерь»:

$$\frac{2\pi c \int_0^{R_{50}} (1 - v_{cm}(r)) r dr}{\pi c R_{50}^2} = (6,25 \div 7,25)\%. \quad (3в)$$

В соотношениях (3):  $c$  — плотность распределения людей;  $R_{50}$  — радиус «зоны безвозвратных потерь» (расстояние от эпицентра на котором  $v_{cm}$  принимает значение, равное 50%).

Аналогичные оценки по определению границ зоны безвозвратных потерь можно провести и при других поражающих факторах (например, при тепловом излучении или токсическом воздействии) — в специальной литературе достаточно исследований, посвященных определению соответствующих пробит-функций.

## 2. Критерий определения границ зоны санитарных потерь

Определить границы зоны санитарных потерь сходным образом невозможно ввиду практического отсутствия подобных работ. Поэтому представляется целесообразным пойти другим путем.

Предположим, по аналогии с введением зоны безвозвратных потерь в [1], что всем людям, оказавшимся в зоне санитарных потерь, в той или иной мере будет нанесен ущерб здоровью (предполагаем, что за пределами этой зоны



ущерб здоровью людей нанесен быть невозможен). Исходя из этого принимаем, что площадь зоны санитарных потерь превышает площадь зоны безвозвратных потерь в 10 раз.

Предположение по поводу соотношения площадей основано на данных Major Accident Hazards Bureau (МАНВ)<sup>8</sup> о том, что при боевых действиях и техногенных катастрофах число погибших соотносится с числом получивших вред здоровью как 1:10 [7]. То есть площадь, находящаяся внутри внешней границы зоны санитарных потерь (рис. 1), должна превышать зону «безвозвратных потерь» в 11 раз. При этом соотношение, описывающее эту границу на плоскости, определяется постоянством параметра, обуславливающим поражающий фактор, характеризующий ту или иную чрезвычайную ситуацию.



Рис. 1. Зоны безвозвратных и санитарных потерь

С данными МАНВ [7] коррелируют и некоторые российские источники, например [8], согласно которому в результате воздействия отравляющих химических веществ число погибших соотносится с числом получивших вред здоро-

вью как 1:9. Однако зачастую в национальной литературе соотношение числа погибших к числу получивших вред здоровью в результате чрезвычайной ситуации принимается равным 1:6. Такое расхождение с европейскими данными, по мнению ряда отечественных специалистов [9—11], связано (рис. 2) с качеством и оперативностью оказания медицинской помощи пострадавшим.

### 3. Типы зон безвозвратных и санитарных потерь

В работе [1] рассматривается три типа зон «безвозвратных потерь», характеризующихся одним линейным масштабом  $R_z$  (рис. 3):

- тип I — круг радиусом  $R_z$  (круговая зона поражения типична, например, при детонации взрывчатых веществ);
- тип II — зона поражения, занимающая до 1/2 площади круга радиусом  $R_z$  (например, в результате испарения из проливов большой площади);
- тип III — зона поражения, занимающая до 1/10 площади круга радиусом  $R_z$  (например, при рассеивании дрейфующего облака).

#### 3А. Зоны безвозвратных и санитарных потерь — Тип I

Зона безвозвратных потерь в форме круга радиусом  $R_z = R_{50}$  согласно [1] будет иметь место в случае детонации взрывчатых веществ. Значение  $R_{50}$  с учетом (1) и уже упоминаемых соотношений из [6] в широком диапазоне значений тротилового эквивалента можно рассчитать по формуле:

$$R_{50} \approx 1,86q^{1/3}. \quad (4)$$

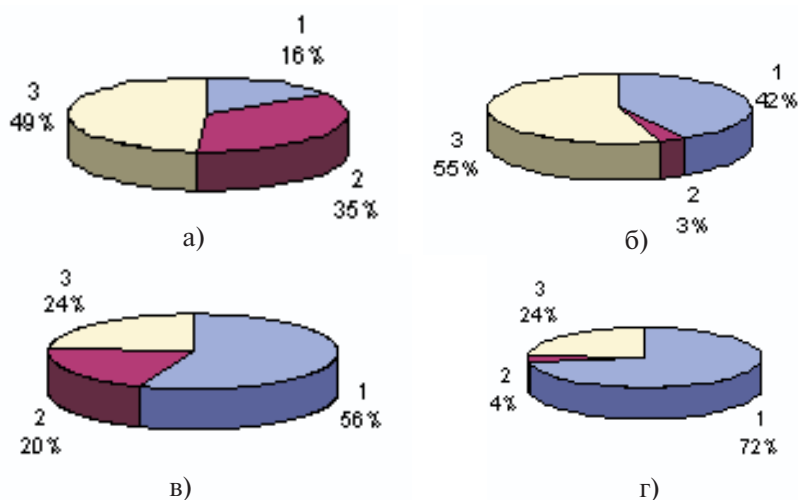


Рис. 2. Распределение числа погибших в результате нештатных ситуаций по времени смерти: а) ЧС, б) ДТП, в) пожары, г) аварии на водных объектах: 1 — погибли во время нештатной ситуации; 2 — умерли в медицинском учреждении; 3 — умерли после нештатной ситуации до прибытия в медицинское учреждение

<sup>8</sup> Специальный орган Генерального директората по вопросам экологии Европейской комиссии, название которого может быть переведено как *Бюро по анализу и мониторингу угроз крупных аварий*.



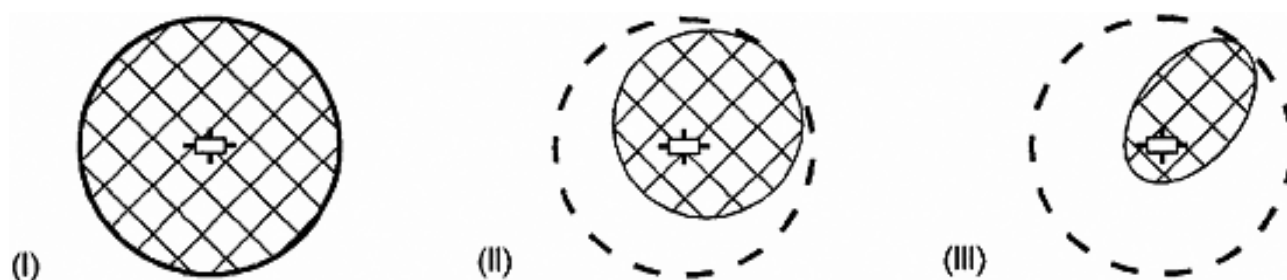


Рис. 3. Типы зон безвозвратных потерь

Для сравнения в таблице 1 представлены значения радиуса зоны безвозвратных потерь, рассчитанные по формуле (4), и значения, затабулированные в [1].

Таблица 1

Размер зоны безвозвратных потерь при детонации взрывчатых веществ

$q$ , т	1	10	200	1 000
$R_{50}$ (4), м	18,6	40,1	109	186
$R_z$ [1], м	25	50	100	200

На расстоянии  $R_{50}$  от эпицентра «импульсная» составляющая пробит-функции в (1) практического значения не имеет, так что при обсуждении границ зоны санитарных потерь целесообразно оперировать исключительно значением избыточного давления ударной волны.

Согласно (2) линии постоянного значения избыточного давления будут представлять собой окружности с центром в точке взрыва. Окружность с площадью в 11 раз превышающей площадь зоны безвозвратных потерь будет иметь радиус, равный:

$$R = \sqrt{11} R_{50} \approx 6,17 q^{1/3}. \quad (5)$$

На таком расстоянии от эпицентра значение избыточного давления ударной волны в соответствии с (2) будет составлять:

$$P_s \approx 0,31 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Использовать это значение избыточного давления в качестве определения границы зоны санитарных потерь в принципе возможно, так как согласно [12] при  $P_s = 0,39 \cdot 10^5 \text{ Па}$  имеют место преимущественно легкие поражения.

Таким образом, если за основу методики по оценке количества пострадавших взять Руководство [1], то зона санитарных потерь **Типа I** будет представлять собой концентрическую по отношению к зоне безвозвратных потерь окружность радиусом в  $3,3 R_z$  (рис. 4).

### 3Б. Зоны безвозвратных и санитарных потерь — Тип II

Обычно в специальной литературе для характеристики острого ингаляционного воздействия газообразных токсичных веществ используется понятие токсической нагрузки, которая в общем виде

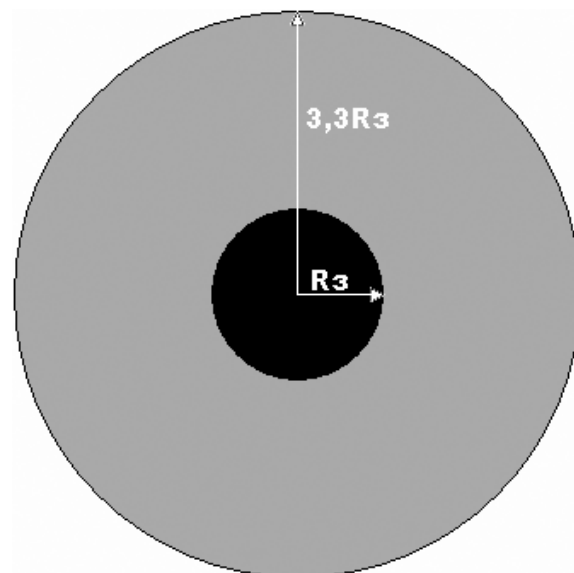


Рис. 4. Зоны санитарных и безвозвратных потерь (Тип I)

вычисляется с учетом изменения концентрации вещества за принятый период времени  $T$  как:

$$D = \int_0^T C^n(\tau) d\tau. \quad (6)$$

Причем показатель степени  $n$  зависит от вида вещества. Так согласно рекомендаций Центра изучения безопасности химических процессов американского института инженеров-химиков [13] при расчете токсической нагрузки при распространении аммиака показатель степени должен приниматься равным 2.

В отечественной литературе используется понятие токсодозы, которая судя по размерности (мг·мин./л) вычисляется по формуле (6) при  $n = 1$ . (Согласно [14] смертельная токсодоза для аммиака составляет 150 мг·мин./л, а пороговая токсодоза — в 10 раз меньше — 15 мг·мин./л). Тогда если поле концентрации, например, аммиака в воздухе, образованное в результате разлива, описывается уравнением двойной дисперсии Гаусса [15]:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{\pi \sigma_y(x) \sigma_z(x) U} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right) \right],$$

где:  $C(x, y, z)$  — средняя концентрация в точке  $(x, y, z)$ ;  $Q$  — мощность источника (скорость испа-

рения);  $U$  — скорость ветра, направление которого совпадает с направлением оси  $Ox$ ;  $\sigma_y(x)$ ,  $\sigma_z(x)$  — стандартные отклонения распределений концентраций в точке  $x$  соответственно в горизонтальном и вертикальном направлениях, перпендикулярно направлению ветра, то токсодоза на поверхности Земли ( $z = 0$ ) при времени экспозиции  $T$ , большем времени испарения пролива  $\tau_{исп}$ , будет определяться следующим соотношением:

$$D(x, y) = \frac{M}{\pi \sigma_y \sigma_z U} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right). \quad (7)$$

Здесь  $M$  — масса пролившейся жидкости.

Условие превышения времени экспозиции  $T$  над временем испарения пролива  $\tau_{исп}$ , по всей видимости, корректно. Это обусловлено тем, что:

- время экспозиции зачастую, в том числе и в [1], принимается равной 30 минутам,
- а время испарения пролива широкого класса интересующих нас жидкостей в условиях, рассматриваемых в [1], не превосходит  $T$  (оценки  $\tau_{исп}$  проводились с помощью различных методик, в том числе [14, 16–18]<sup>9</sup>).

Параметры  $\sigma_y(x)$ ,  $\sigma_z(x)$  — монотонно возрастающие функции. Для практического использования зависимости  $\sigma_y(x)$  и  $\sigma_z(x)$  определяются на основании экспериментальных данных. Однако практически все из них, как отмечают авторы, справедливы для расстояний от 100 метров до 10 километров, в то время как для зон безвозвратных потерь (тип II) значение  $R_z$  изменяется в диапазоне 25–100 метров. Исходя из этого представляется целесообразным использовать зависимости дисперсий Бриггса [20], который обрабатывал данные Пэксвилла-Гиффорда-Тернера для малых расстояний. Эти зависимости:

- в условиях городской застройки,
  - при расстояниях менее 1000 м,
  - при классе устойчивости атмосферы  $D$ , являющейся канонической для [1],
  - и принимая во внимание рекомендации [15] по учету размера пролива,
- имеют вид:

$$\sigma_y = \begin{cases} \frac{R_0}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\left(1 + \frac{x}{R_0}\right) \times} \\ \times \sqrt{\left(1 + \frac{x}{R_0} (0,32\sqrt{2\pi} - 1)\right)} & -R_0 \leq x \leq 0, \\ \frac{R_0}{\sqrt{2\pi}} + 0,16x & x \geq 0, \end{cases} \quad (8)$$

$$\sigma_z = 0,14(x + R_0) \quad x \geq -R_0.$$

Здесь  $R_0$  — радиус пролива, в центре которого помещено начало координат ( $x = 0$ ). Значение  $R_0$  определяется из соотношения:

$$R_0 = \sqrt{\frac{M}{\pi \rho_{ж} \delta}},$$

где:  $\rho_{ж}$  — плотность пролитой жидкости,  $\delta$  — толщина пролива.

А  $\sigma_y(x)$  при  $x \leq 0$  имеет вид единственной симметричной относительно оси  $Ox$  функции, из относящихся к классу конических сечений, как и форма пролива (окружность), обеспечивающей гладкость функции  $\sigma_y(x)$  в целом.

Из соотношения (7) следует, что линия постоянной токсодозы ( $D = const$ ) описывается уравнением:

$$y = \pm \sqrt{2} \sigma_y \sqrt{\ln\left(\frac{M}{\pi D U} \cdot \frac{1}{\sigma_y \sigma_z}\right)} = \pm \sqrt{2} \sigma_y \sqrt{\ln\left(\frac{\delta \rho_{ж}}{D U} \cdot \frac{R_0^2}{\sigma_y \sigma_z}\right)}. \quad (9)$$

Область определения соотношения (9) — отрезок:

$$x \in [-R_0; R^+],$$

на концах которого (в точках  $x = -R_0$  и  $x = R^+$ )  $y$  обращается в ноль, то есть линия постоянной токсодозы пересекается с осью  $Ox$ .

На рис. 5 представлены линии постоянной токсодозы при различных значениях безразмерного параметра  $p = \delta \rho_{ж} / D U$ .

Параметр  $R^+$  является решением уравнения:

$$\sigma_y(R^+) \cdot \sigma_z(R^+) = p R_0^2,$$

которое при выбранных зависимостях  $\sigma_y(x)$  и  $\sigma_z(x)$  (8) сводится к квадратному уравнению относительно  $R^+$ :

$$\left(\frac{R_0}{\sqrt{2\pi}} + 0,16R^+\right) 0,14(R^+ + R_0) = p R_0^2. \quad (10)$$

Решение квадратного уравнения (10) в широком диапазоне значений параметра  $p$  может быть с достаточной точностью представлено в виде:

$$\frac{R^+}{R_0} = 6,68\sqrt{p} - 1,75. \quad (11)$$

Для сравнения в таблице 2 представлены значения  $R^+$ , рассчитанные по формуле (11) при  $D^*$ , равной упомянутой ранее смертельной токсодозе для аммиака, и значения, затабулированные в [1] для пролива сжиженных при охлаждении газов средней токсичности, к которым в том числе относится и аммиак.

<sup>9</sup> Определенная некорректность указанных методик в определении  $\tau_{исп}$ , отмеченная в [19], в рассматриваемой задаче значения не имеет.

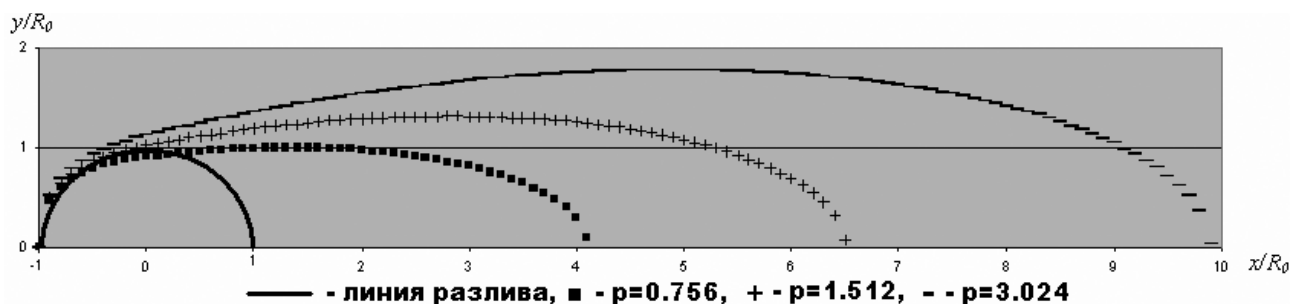


Рис. 5. Линия постоянной токсодозы

Таблица 2

Значения  $R_3$  при разливе аммиака

$M, \text{т}$	5	10	50
$R^+ (11), \text{м}$	28	40	89
$R_3 [1], \text{м}$	25	50	100

Расчет значений  $R^+$  по (11) производился при значениях скорости ветра  $U$ , равной 5 м/сек, устанавливаемой в [1], и  $R_0$ , соответствующей рекомендуемой в [14] толщине пролива аммиака ( $\delta = 5 \text{ см}$ )<sup>10</sup>. (Далее значение  $R^+$ , соответствующее токсодозе  $D^*$ , будет обозначаться  $R_3$ .)

Можно показать, что отношение площади, ограниченной кривой (9)

$$S = 2\sqrt{2} \int_{-R_0}^{R^+} \sigma_y(x) \sqrt{\ln \left( p \frac{R_0^2}{\sigma_y(x)\sigma_z(x)} \right)} dx,$$

к площади пролива определяется лишь значением параметра  $p$ , то есть:

$$\frac{S}{\pi R_0^2} = F(p),$$

где:  $F(p)$  — монотонно возрастающая функция, которая в интересующем нас диапазоне значений параметра  $p$  с хорошей точностью может быть аппроксимирована степенной зависимостью:

$$F(p) = 5,4719p^{0,9483}.$$

То есть площадь  $S$ , ограниченная кривой (9), в широком диапазоне изменения токсодозы  $D \leq D^*$  может быть описана следующим образом:

$$S = S^* \left( \frac{D^*}{D} \right)^{0,9483}, \quad (12)$$

где:  $S^*$  — площадь, ограниченная линией, на которой  $D = D^*$ , то есть площадь зоны безвозвратных потерь.

Из соотношения (12) следует, что площадь, в 11 раз превышающая площадь зоны безвозвратных потерь, соответствует токсодозе:

$$D^{**} = \frac{D^*}{11^{1/0,9483}} \approx 0,08D^*, \quad (13)$$

что несколько меньше упомянутой ранее пороговой токсодозы.

Подставив результат (13) в соотношение (10) вместо  $D$ , получим  $R_c$  расстояние от центра пролива до пересечения границы площади санитарных потерь с осью  $Ox$ :

$$R_c = 3,54R_3 + 4,44R_0$$

(Другими словами,  $R_c$  по аналогии с введенным ранее  $R_3$  есть значение  $R^+$ , соответствующее токсодозе  $D^{**}$ .)

Ширину (поперечный размер) зон безвозвратных и санитарных потерь можно оценить из следующих соображений.

Поперечный размер зоны, ограниченной линией постоянной токсодозы ( $D = \text{const}$ ),  $H^+$  в интересующем нас диапазоне значений  $p$  определяется как:

$$H^+ = 2|y_{\text{экс}}| = 2\sqrt{2}\sigma_y(x_{\text{экс}}) \sqrt{1 + \frac{0,75}{1 + x_{\text{экс}}/R_0}}, \quad (14)$$

где:  $y_{\text{экс}}$  — значение функции (9) в точке локального экстремума (минимума или максимума);  $x_{\text{экс}}$  — координата точки локального экстремума, которая является решением уравнения:

$$\ln \left( p \frac{R_0^2}{\sigma_y(x_{\text{экс}})\sigma_z(x_{\text{экс}})} \right) = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\sigma'_z(x_{\text{экс}})/\sigma_z(x_{\text{экс}})}{\sigma'_y(x_{\text{экс}})/\sigma_y(x_{\text{экс}})} \right)$$

(здесь  $\sigma'$  — первая производная функции  $\sigma$ ) или при выбранных зависимостях  $\sigma_y(x)$  и  $\sigma_z(x)$  согласно (8):

$$\ln \left( p \frac{R_0^2}{\sigma_y(x_{\text{экс}})\sigma_z(x_{\text{экс}})} \right) = 1 + \frac{0,75}{1 + x_{\text{экс}}/R_0}. \quad (15)$$

Пологий характер линии постоянной токсодозы на протяжении всей области определения функции (9) за исключением участков, прилегающих к границам области (см. рис. 5), минимизирует ошибку в определении  $H^+$  в случае наличия ошибки в определении  $x_{\text{экс}}$ . Поэтому представляется целесообразным для оценки поперечного размера зоны, ограниченной линией

<sup>10</sup> По поводу рекомендуемой толщины пролива аммиака смотри в уже упоминаемой работе [19].

постоянной токсодозы, в соотношении (14) использовать значение  $x_{\text{экс}}$ , полученное при решении уравнения (15) при  $p \rightarrow \infty$ :

$$x_{\text{экс}} = \frac{R^+}{\sqrt{e}}. \quad (16)$$

Использование соотношения (16) приведет к определенному повышению значения  $\sigma_y$ , что может быть некоторым образом компенсировано путем отбрасывания в уравнении (14) подкоренного множителя. В итоге можно получить довольно простое соотношение для оценки поперечного размера зоны, ограниченной линией постоянной токсодозы:

$$\frac{H^+}{R_0} \approx 2\sqrt{2} \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi}} + \frac{0,16 R^+}{\sqrt{e} R_0} \right). \quad (17)$$

Как видно из представленных расчетов (рис. 6), высказанные предложения являются вполне уместными.

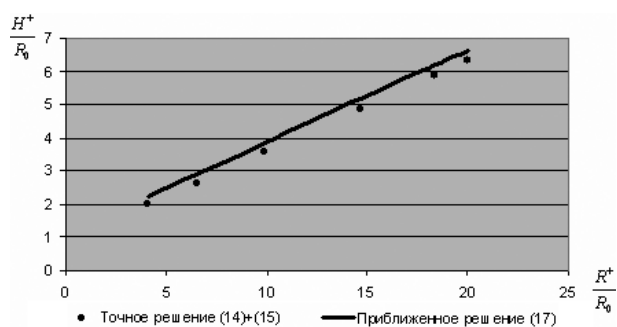


Рис. 6. Поперечный размер зоны, ограниченный линией постоянной токсодозы

Таким образом, используя соотношение (17), можно оценить поперечный размер зон безвозвратных ( $H_z$ ) и санитарных ( $H_c$ ) потерь следующим образом:

$$\begin{aligned} H_z &= 1,13R_0 + 0,27R_z \\ H_c &= 1,13R_0 + 0,27R_c = 2,33R_0 + 0,96R_z. \end{aligned}$$

На рис. 7 схематически изображены зоны безвозвратных и санитарных потерь с указанием их продольных и поперечных размеров.

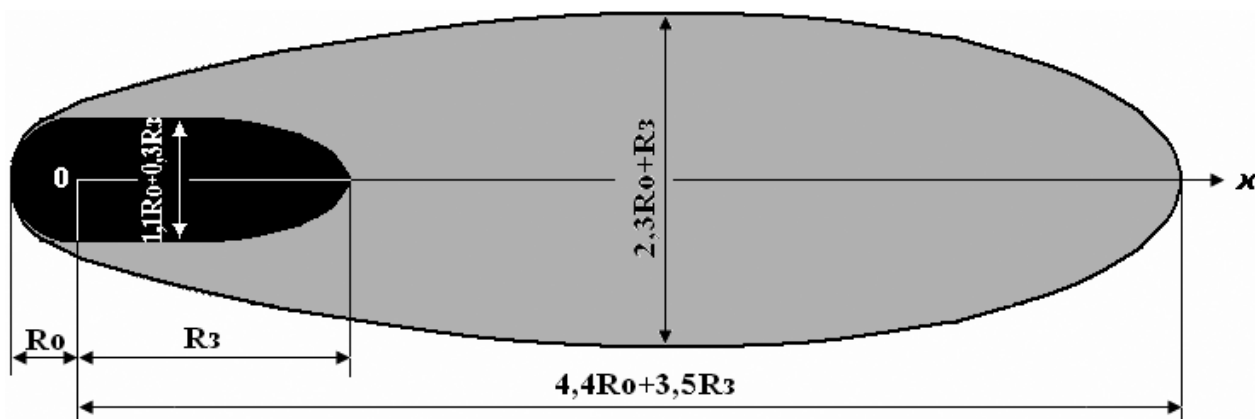


Рис. 7. Зоны санитарных и безвозвратных потерь (Тип II)

### 3В. Зоны безвозвратных и санитарных потерь — Тип III

При рассмотрении зон безвозвратных и санитарных потерь третьего типа было бы логично остаться в рамках Гауссовой модели концентрационного поля и дисперсионных зависимостей Бриггса, которые были использованы в предыдущем разделе при анализе ситуации, возникающей в результате испарения из проливов большой площади.

При рассеивании дрейфующего облака нестационарное концентрационное поле на поверхности Земли в рамках Гауссовой модели описывается следующим образом:

$$C(x, y, t) = \frac{2M}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \times \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{(x-Ut)^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} \right) \right]. \quad (18)$$

Модифицированные для нестационарного поля формулы Бриггса будут иметь вид [21]:

$$\sigma_x = 0,16Ut, \quad \sigma_y = 0,08Ut, \quad \sigma_z = 0,14Ut. \quad (19)$$

Как и в предыдущем разделе рассматриваются:

- условия городской застройки;
- расстояния  $L < 1000$  м;
- класс устойчивости атмосферы  $D$ .

Учитывая то, что масштаб времени рассматриваемой задачи ( $L/U = 200$  сек.) составляет порядка 10% времени экспозиции при определении токсодозы, можно уверенно заменить верхний предел интегрирования в соотношении (6) на бесконечность. То есть

$$D = \int_0^\infty C(t) dt. \quad (20)$$

Подставив (18) и (19) в (20) и проведя интегрирование, получим выражение, описывающее распределение токсодозы на поверхности Земли:

$$D = \frac{M}{U} b \cdot e^{-a^2} \frac{\left[ 1 + \sqrt{\pi} \mu e^{\mu^2} (1 + \operatorname{erf} \mu) \right]}{(x^2 + 4y^2)},$$

$$\text{где: } \mu = \frac{ax}{\sqrt{x^2 + 4y^2}}, a = \frac{1}{0,16\sqrt{2}} \approx 4,42, \\ b = \frac{4}{0,14(2\pi)^{3/2}} \approx 1,81.$$

Полученное соотношение не позволяет представить уравнение, описывающее линию постоянной токсодозы, в декартовых координатах в явном виде подобно (9). В полярных координатах это уравнение будет иметь вид:

$$\frac{R^2}{R^{+2}} = \frac{1}{1 + 3\sin^2 \varphi} \cdot \frac{e^{-a^2} + \sqrt{\pi}\mu e^{\mu^2 - a^2} (1 + \operatorname{erf} \mu)}{e^{-a^2} + \sqrt{\pi}a(1 + \operatorname{erf} a)} \approx \\ \approx 0,11 \frac{\mu e^{\mu^2 - a^2} (1 + \operatorname{erf} \mu)}{1 + 3\sin^2 \varphi}. \quad (21)$$

Здесь:  $\mu = \frac{a \cos \varphi}{\sqrt{1 + 3\sin^2 \varphi}}$ ;  $R^+$  — как и в предыдущем

разделе, расстояние от начала координат, на котором линия постоянной токсодозы пересекается с осью  $Ox$ , определяемое по формуле:

$$R^+ = \sqrt{\frac{M}{UD} b(e^{-a^2} + \sqrt{\pi}a(1 + \operatorname{erf} a))} \approx 5,3 \sqrt{\frac{M}{UD}}. \quad (22)$$

Для сравнения в таблице 3 представлены значения  $R^+$ , рассчитанные по формуле (22) при величинах  $D$  и  $U$ , используемых в предыдущем разделе (150 мг·мин./л и 5м/сек. соответственно), и значения, затабулированные в [1] для выброса сжиженных давлением газов средней токсичности, к которым в том числе относится и аммиак.

Таблица 3

Значения  $R_z$  при выбросе аммиака

$M$ , т	10	50	200	5000	10 000
$R^+$ (22), м	79,5	178	355	1775	2510
$R_z$ [1], м	100	200	500	1000	3000

Вид соотношения (21) говорит о том, что линии постоянной токсодозы являются подобными друг другу, то есть расстояние между любыми двумя точками линии постоянной токсодозы и/или области, ограниченной ею, при переходе от одного значения токсодозы к другому изменяется пропорционально изменению  $R^+$ .

Следствием этого свойства подобия является соотношение, определяющее изменение площади, ограниченной линией постоянной токсодозы, при изменении величины токсодозы, которое с учетом (22) имеет вид:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{R_1^{+2}}{R_2^{+2}} = \frac{D_2}{D_1}.$$

То есть, для того чтобы увеличить площадь, ограниченную линией постоянной токсодозы, в 11 раз, значение токсодозы нужно уменьшить в эти же 11 раз. При этом значение  $R^+$  увеличится примерно в 3,3 раза. Из этого следует, что:

$$D^{**} = \frac{D^*}{11} \approx 0,09 D^*, \\ R_c = \sqrt{11} R_z \approx 3,3 R_z.$$

Что касается поперечного размера зон безвозвратных ( $H_z$ ) и санитарных ( $H_c$ ) потерь, то расчеты показывают, что:

$$H^+ \approx 0,135 R^+$$

или что  $H_z \approx 0,135 R_z$ ,  $H_c \approx 0,135 R_c \approx 0,45 R_z$  (рис. 8).

#### Заключительные замечания

Соотношения (9) и (21), описывающие границы зон безвозвратных и санитарных потерь при распространении в атмосфере токсичных веществ, и их графическое воплощение (рис. 7 и рис. 8 соответственно) имеют в большей мере теоретическое значение, так как их применение на практике затруднено. Поэтому представляется целесообразным на основе полученных результатов построить шаблоны для упрощенной оценки площадей зон безвозвратных и санитарных потерь (рис. 9), которые и предлагается использовать в разработанных методических рекомендациях.

#### Литература

1. Manual for the classification and prioritization of risks due to major accidents in process and related industries. IAEA, Vienna, 1993. IAEA-TECDOC-727. ISSN 1011-4289.
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 21 мая 2007 года № 2640.
3. Козлитин А.М. Вероятностные методы анализа последствий фугасного воздействия взрыва на человека, технологическое оборудование, здания, сооружения при аварийных ситуациях на предприятиях нефтегазовой отрасли. Международный научный сборник «Управление промышленной и экологической безопасностью производственных объектов на основе риска», Саратов: СГТУ, 2005.
4. Белов П.Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений. — М.: Издательский центр «Академия», 2003.
5. Елохин А.Н. Анализ и управление риском: теория и практика. — М.: Страховая группа «ЛУКОЙЛ», 2000.
6. Единые правила безопасности при взрывных работах. — М.: НПО ОБТ, 1992.
7. Major Accident Hazards Bureau, <http://mahbsrv.jrc.it/>
8. Методическое пособие по прогнозированию и оценке химической обстановки в чрезвычайных ситуациях. — М.: ВНИИ ГОЧС, 1993.
9. Результаты экспертного опроса специалистов ВЦМК «Защита» Минздрава России и Научно-практического центра экстренной медицинской помощи при Департаменте здравоохранения г. Москвы. — М.: ВНИИ ГОЧС, 2000.



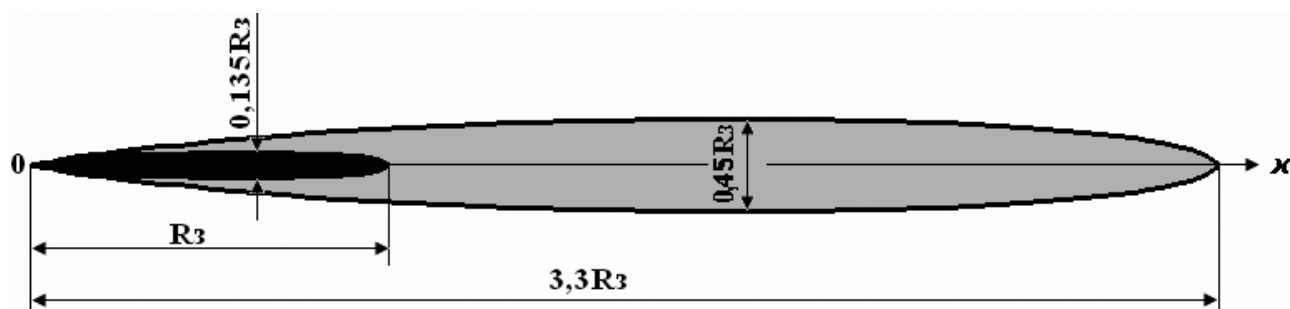


Рис. 8. Зоны санитарных и безвозвратных потерь (Тип III)

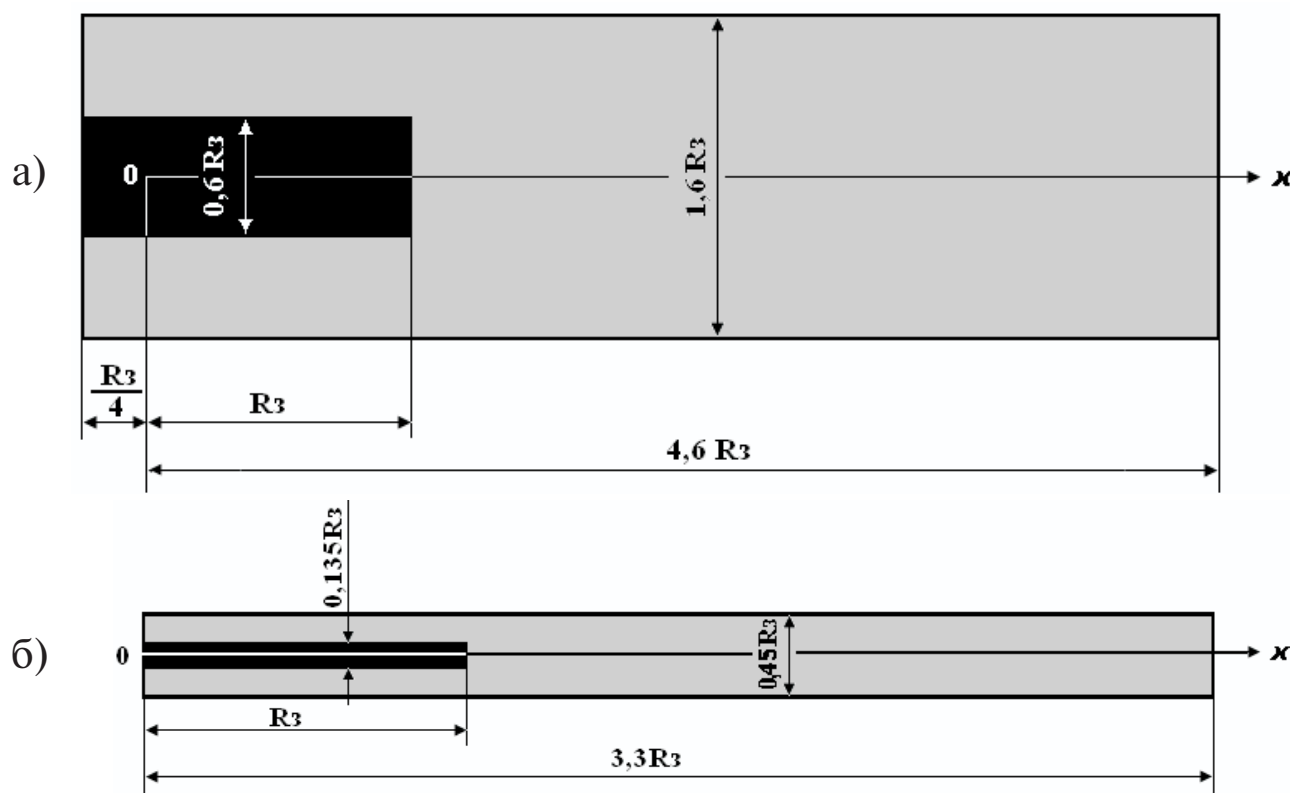


Рис. 9. Шаблоны для упрощенной оценки площадей зон безвозвратных и санитарных потерь: а) для зоны Типа II (рис. 7), б) для зоны Типа III (рис. 8)

10. Логинов В.И. и др. Характеристика потерь населения в чрезвычайных ситуациях в Российской Федерации (1997 и 1998 гг.). Журнал «Медицина катастроф», вып. 4 (28), 1999.
11. Колесников Д.В. и др. Результаты оценки факторов, влияющих на эффективность технологий спасения пострадавших в дорожно-транспортных происшествиях аварийно-спасательными формированиями МЧС России. Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях: Сборник статей. — М.: ВИНТИ, вып. 3, 2001.
12. База данных по ядерным и крупным химическим взрывам с выбросом в атмосферу: Свидетельство № 2863 от 12.12.1997: Зарегистрирована за № 0229703124 в Государственном реестре.
13. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, New York, 1989.
14. Методика расчета концентраций аммиака в воздухе и распространения газового облака при авариях на складах жидкого аммиака (Приложение 1 к ПБ 03-182-98 «Правила безопасности для наземных складов жидкого аммиака»). Сборник документов «Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах». Серия 27, Выпуск 2. — М.: ГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Гостехнадзора России», 2001.
15. Учет дисперсионных параметров атмосферы при выборе площадок для атомных электростанций. Руководство по безопасности. МАГАТЭ, Вена, 1982. STI/PUB/549. ISBN 92-0-423082-7.
16. ГОСТ Р 12.3.047-98. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.



17. Методика определения площади зоны защитных мероприятий, устанавливаемой вокруг объектов по хранению химического оружия и объектов по уничтожению химического оружия. Министерство обороны РФ. 1999 г.
18. Проект «Сахалин-II». Разработка Пилтун-Астохского и Лунского месторождений нефти и газа на условиях Соглашения о разделе продукции. Специальные технические условия. Анализ риска опасных производственных объектов проекта. Москва, 2004 г.
19. Востоков В.Ю. О методических подходах, используемых при расчете испарения пролитой жидкости. Проблемы анализа риска, 2006, т. 3, № 4, с. 379—382.
20. Briggs G.A. Diffusion Estimation for Small Emissions, in Environmental Research Laboratories. Air Resources Atmospheric Turbulence and Diffusion Laboratory 1973 Annual Report ATDL-106, National Oceanic and Atmospheric Administration, 1974.
21. Горский В.Г. и др. Научно-методические аспекты анализа аварийного риска. — М.: Экономика и информатика, 2002.



**Обеспечение населения защитными сооружениями гражданской обороны / Под общ. ред. П.В. Плата; МЧС России. — М.: Деловой экспресс, 2007. — 272 с. ISBN 978-5-89644-099-4**

В труде изложены основы обеспечения населения защитными сооружениями гражданской обороны в современных условиях, содержащие основные положения по организации инженерной защиты населения, пути накопления защитных сооружений, требования по их проектированию и строительству, по приспособлению подземного пространства городов и населенных пунктов для защиты населения, по эксплуатации и поддержанию защитных сооружений в готовности к приему укрываемых.

Труд предназначен для специалистов в области защиты населения от опасностей военного времени и от чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера, а также для преподавателей и учащихся учебных заведений, учебно-методических центров ГОЧС и курсов гражданской обороны. Представленные в труде материалы могут быть использованы при проектировании и ведении строительства защитных сооружений, а также при планировании мероприятий по приспособлению подземного пространства городов для укрытия населения.



**Современные технологии защиты и спасения / Под общ. ред. Р.Х. Цаликова; МЧС России. — М.: Деловой экспресс, 2007. — 288 с. ISBN 978-5-89644-098-7**

На основе анализа опыта организации и проведения мероприятий по защите населения, материальных и культурных ценностей в ходе вооруженных конфликтов конца XX — начала XXI века, ликвидации крупномасштабных аварий, катастроф, последствий стихийных бедствий и террористических актов в научно-методическом труде изложены:

современные технологии, способы и методы защиты; основные направления их дальнейшего развития и совершенствования с учетом изменений в характере вооруженных конфликтов, развития средств вооруженной борьбы, появления новых угроз и опасностей природного, техногенного и террористического характера;

сведения о современных и перспективных средствах защиты населения, материальных и культурных ценностей; средствах ведения аварийно-спасательных и других неотложных работ.

В научно-методическом труде систематизированы научные знания в области предупреждения кризисных ситуаций, обобщены достижения отечественных производителей средств защиты и спасения, опыт применения современных спасательных технологий при ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Материалы труда могут быть использованы при подготовке мероприятий в области предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, разработке программ технологического перевооружения органов и сил РСЧС, а также содействовать внедрению современных технологий и технических

средств защиты и спасения.

Книга предназначена для специалистов в области защиты населения и территорий от кризисных и чрезвычайных ситуаций, а также для преподавателей и студентов при изучении дисциплины «Безопасность жизнедеятельности».

[www.csi-mchs.ru](http://www.csi-mchs.ru)