

ГЛАВА 10

МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ТРАНСФОРМАЦИИ И РАЗРУШИТЕЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ АВАРИЙНО ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ

Завершающей стадией процесса причинения техногенного ущерба в общем случае следует считать: а) опасное превращение выбросов ряда вредных веществ в новой среде; б) поражающее воздействие факторов, возникших при этом или связанных с аварийно высвободившимися потоками энергии, на оказавшиеся вблизи объекты. Именно в системном исследовании этих двух аспектов и заключается *цель* данной главы. Поскольку первый из них характерен лишь для аварийно-опасных химических веществ, то основное внимание при изучении излагаемого материала следует уделить уяснению закономерностей появления техногенного ущерба, а также знакомству с современными методиками априорной оценки его размеров и вероятности возникновения.

10.1. Особенности моделирования и системного анализа процесса трансформации и воздействия потоков энергии и вредного вещества

Как уже отмечалось ранее (см. разд. 8.2), определение характера возможной трансформации (взрыв, горение, испарение-конденсация) химически опасного вещества и разрушительного воздействия потоков энергии, возникших в результате подобных превращений или аварийно высвободившихся, связано с необходимостью учета большого числа факторов и параметров. Одни из них должны отражать специфику вредного выброса из объектов техносферы, другие – состав и те характеристики людских, материальных и природных ресурсов, которые определяют их стойкость по отношению к соответствующим воздействиям. При этом число существенных для причинения техногенного ущерба факторов велико; практически все они характеризуются разной направленностью действия и имеют недетерминистскую природу.

Проиллюстрируем обусловленную этим *сложность* моделирования и системного анализа процесса причинения ущерба от техногенного происшествия с помощью ориентированного графа, представленного на рис. 10.1. Приведенный на нем ветвящийся процесс начинается с возникновения аварийной ситуации (АС), которая с соответствующими безусловными $P(*)=1-Q(*)$ и условными $P(**/*, Q)$ вероятностями может завершаться либо адаптацией к ним человекомашинных систем (А), либо происшествиями (П) конкретного типа: катастрофа (К), несчастный случай (НС), авария с материальным ущербом (МУ) или загрязнением природной среды вредными веществами (ЗОС).

На данном рисунке показано также, что некоторые (**) из таких исходов происшествия, например НС, будут приводить к гибели (Г/НС, Q), увечьям (У/НС, Q) или временной потере трудоспособности персонала (ВПТ/НС, Q).

В то же время возможный смертельный несчастный случай может быть единичным (1Г/НС, Q) или групповым ($\geq 2Г/НС, Q$). Поясним также, что подобные последствия не исключены и для других проявлений аварийности и травматизма в техносфере, которые здесь не рассматриваются, хотя и изображены на этом орграфе в виде немаркированных стрелок.

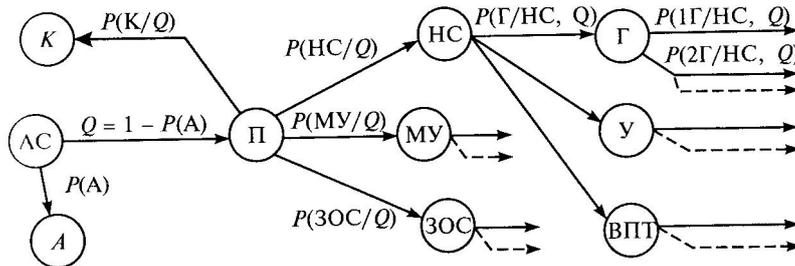


Рис. 10.1. Граф проявления ущерба от аварийности и травматизма

При принятых предположениях величина среднего ущерба от конкретного происшествия Y_k будет определяться суммой ущербов Y_j , связанных с каждым его исходом:

$$Y_k = \sum_j P(*)P(Y_j / *)Y_j \quad (10.1)$$

а математическое ожидание суммарного ущерба $M[Y]$, определяемого разнообразными сочетаниями указанных выше последствий, может рассчитываться по формуле

$$M[Y] = \sum_{k=1}^m C_m^k P^k (1 - P_k)^{m-k} \sum_j P(*)P(Y_j / *)Y_j \quad (10.2)$$

где m, k - соответственно количество человеко-машинных систем, занятых в проведении рассматриваемого техносферного процесса и та их часть, где имели место происшествия; C_m^k - число сочетаний из m по k единиц рассматриваемых человеко-машинных систем; $P_j, P(Y_j / *)$ и Y_j - вероятности возникновения конкретного происшествия, причинения некоторого ущерба при условии его появления, а также размеры такого техногенного ущерба.

Изучение перечисленных параметров довольно общей модели прогноза техногенного ущерба различным ресурсам подтверждает не только сложность, но и трудоемкость априорной количественной оценки соответствующего риска даже для отдельно взятого происшествия. Последняя оговорка означает, что одни и те же объекты из состава людских, материальных и природных ресурсов реально подвержены одновременному воздействию случайных и систематических вредных выбросов сразу от нескольких близлежащих предприятий региона. Поэтому учесть все это не так просто, тем более что каждый выброс и каждая его потенциальная жертва будут характеризоваться индивидуальными параметрами.

Следовательно, в подавляющем большинстве случаев такой прогноз можно осуществить лишь после принятия ряда упрощающих допущений в только что показанных зависимостях. А направлены они должны быть либо на возможность перехода от условных вероятностей к безусловным, а от

действительного ущерба к среднему, либо на приравнивание первых нулю или единице, а вторых – между собой. Именно с учетом подобных подмен или оговорок и составлены приведенные ранее математические соотношения (см. формулы (8.24) и (8.25)), используемые ниже для прогноза техногенного ущерба.

Если же коснуться физической сущности процессов и природы факторов, выражаемых упомянутыми выше и другими параметрами, то можно обнаружить и вторую (после введения допущений) особенность. Речь идет о специфичности той неопределенности, которая присуща причинению техногенного ущерба некоторым ресурсам, а стало быть, и о необходимости ее учета при выборе исследовательского инструментария. В самом деле, если процесс высвобождения и распространения вредных энергетических и материальных выбросов мог быть описан известными уравнениями термодинамики или вероятностно-статистическими соотношениями, то эффект от воздействия этих факторов характеризуется уже качественно другой *неопределенностью*.

Прежде всего, это относится как к стойкости конкретного человека или иной биологической особи по отношению к вредному воздействию определенного типа, так и к их живучести вообще, поскольку каждая такая потенциальная жертва по-своему уникальна. Дело в том, что существенные в этом смысле параметры разительно отличаются как для разных особей, так и для каждой из них в различные периоды ее жизненного цикла. Если же учесть невозможность натурального экспериментирования и ограниченность статистических данных об имевших место несчастных случаях с людьми то эмпирическая специфика уже упомянутых ранее зависимостей типа «доза-эффект» (см. рис. 8.3, а) становится особенно понятной.

Отсюда вытекает и третья особенность используемых здесь моделей и методов: некоторые из них не могут не быть *полуэмпирическими*. Вот почему так широко ниже будут использоваться методы прогноза техногенного ущерба, основанные на различных функциях, параметры которых правомерно использовать лишь для конкретного: а) поражающего фактора; б) подвергнутого его воздействию ресурса; в) только для определенной степени возможного при этом ущерба. Примечательно, что все это относится не только к процессу разрушительного воздействия энергии и вредного вещества.

Аналогичная картина наблюдается и при попытках дать точный прогноз характера физико-химического превращения некоторых аварийно-опасных химических веществ, например: их не контролируемой трансформации в виде практически мгновенной детонации, довольно быстро протекающей дефлаграции или сравнительно медленного испарения, что исключительно важно для оценки возможного ущерба для различных ресурсов. Ведь каждый из этих сценариев характеризуется своим набором первичных поражающих факторов и разнообразием сопутствующих им вторичных эффектов.

Особенно показателен в этом отношении уже упомянутый выше взрыв типа *BLEVE*, обычно вызываемый разрушением емкости с криогенным

ракетным горючим (типа жидкий водород) либо со сжиженным углеводородным газом. Резкое отличие в термодинамических параметрах такого топлива и атмосферного воздуха всегда приводит к практически мгновенному испарению соответствующей парогазовой смеси. А вот дальнейшая судьба образовавшегося при этом облака уже не столь очевидна: а) либо оно постепенно рассеется, не причинив вреда; б) либо взорвется или вспыхнет с образованием огненного шара под воздействием внешнего огня.

Естественно, что и этот процесс не может быть заблаговременно описан в виде математических соотношений, пригодных для всех ситуаций и полученных на основе лишь теоретических представлений. Это означает, что и в данном случае не обойтись без полуэмпирических формул и статистических соотношений, выведенных для конкретных случаев интенсивного энерговыделения либо для наиболее характерных их типов. Подобные совокупности типовых аварийных ситуаций обычно принято называть сценариями, а в качестве соответствующего основания использовать какие-либо сходные признаки.

Следовательно, невозможность создания довольно общих и универсальных моделей проявилась в еще одной особенности рассматриваемого здесь аналитического аппарата – широком применении *метода сценариев*. Именно так и сделано в настоящее время в официальных методиках [19, 20] предназначенных для прогноза ущерба от опасных химических веществ и взрывного выделения энергии топливовоздушных смесей. О том, как выглядит предписанная этим документом классификация, можно судить по приведенным выше материалам (см. табл. 8.3 и 8.4), а вот как использовать на практике конкретные классы и соответствующие им формулы, будет проиллюстрировано в следующем параграфе.

Потребность в разбиении рассматриваемого здесь процесса на ряд сценариев предопределена также и структурой формул (8.24) и (8.25), предложенных выше для априорной оценки величины социально-экономического ущерба от техногенных выбросов. Так как общая процедура выявления конкретных сценариев с помощью моделей типа дерево событий уже рассмотрена ранее, то основное предназначение излагаемых ниже моделей и методов *как раз* и будет связано с прогнозом тех сценарных параметров, которые входят в каждую из этих расчетных формул. Основное внимание при этом уделено априорной оценке вероятностных и геометрических параметров зоны поражения.

Для оценки вероятности Q_{kq} причинения различным ресурсам ущерба конкретной степени тяжести здесь будут использованы упомянутые в предыдущей главе пробит- и эрфик-функции, а их аргументами станут токсические или энергетические дозы вредного воздействия на конкретные объекты. Применение же для прогноза этой вероятности подобных функций и количественных критериев, опубликованных лишь в самое последнее время, а также дефицит информации о параметрах типа «пороговая доза» следует считать еще одной *особенностью* моделирования и системного анализа рассматриваемой здесь стадии процесса причинения техногенного

ущерба.

Что касается входящей в формулу (8.25) площади P_{kq} зон вероятного поражения, то для априорной оценки ее размеров потребуется еще более обширная информация. К ней следует отнести данные не только о параметрах всех четырех этапов анализируемого здесь процесса причинения техногенного ущерба, но также и о степени защищенности конкретных ресурсов по отношению к воздействующим на них факторам, и о смягчении их вредного эффекта за счет профилактических и аварийно-спасательных мероприятий. Именно вся совокупность прогнозируемых сведений, потребуется в последующем для априорной количественной оценки техногенного ущерба.

Наконец, говоря об имеющихся в формулах (8.24) и (8.25) площадях P_{kd} зоны достоверного поражения и размерах среднего ущерба Y_{kc} и Y_{lh} отметим возможность и их определения с помощью только что перечисленных параметров. Сделать это будет несколько легче, поскольку в данном случае предполагается, что не включенные в эти расчетные соотношения вероятности Q_{kd} и Q_{lh} и равны там единице. Поэтому, имея пороговые значения поглощенных энерго- и токсодоз и сопоставляя их со значениями, найденными по приводимым ниже аналитическим или графическим зависимостям, нетрудно определить и размеры этой площади, и величину среднего ущерба оказавшихся на ней ресурсов.

В заключение приведем некоторые пороговые значения параметров техногенного воздействия на людей и материальные ценности, с помощью которых можно спрогнозировать характер, вероятность Q_{kq} и размеры P_{kq} ожидаемого ущерба конкретным объектам, оказавшимся под их воздействием. Сделаем это последовательно, вначале на примере термического, а затем и барического вредных факторов, способных причинять ущерб различной степени тяжести не защищенным от них людям и строительным сооружениям.

Учитывая наличие богатого статистического материала по тепловому воздействию на человека, к настоящему времени удалось получить достаточно достоверные прогнозы относительно характера его вредного проявления. В частности, установлено, что он зависит главным образом от размеров пораженной площади кожного покрова и возраста людей: здоровые взрослые люди и подростки обычно выживают, если ожоги 2-й и 3-й степени не превышают 20 % поверхности тела. А вот их спасение становится уже проблематичным после поражения половины кожного покрова, даже в случае оказания своевременной и интенсивной медицинской помощи.

Более детальные сведения о вероятности Q_{kq} летального исхода среднестатистического человека для различных периодов его жизни и от термического поражения его кожного покрова приведены в табл. 10.1.

Анализ приведенных там данных свидетельствует о довольно большом разбросе вероятности летального исхода в тех случаях, когда площадь термического поражения занимает примерно половину кожного покрова человека, а также о росте значений этой вероятности по мере увеличения

возраста человека.

Вторая иллюстрация посвящена прогнозу вероятных последствий фугасного воздействия избыточного давления как на людей, так и на здания, в которых они могли находиться в момент подхода воздушной ударной волны взрыва. Эмпирические данные о статистических вероятностях причинения им ущерба различной тяжести, степенях повреждения зданий и величине материального ущерба им, ожидаемых для четырех диапазонов такого давления, приведены в табл. 10.2.

Таким образом, можно согласиться, что накопленные к настоящему времени данные позволяют оценить характер вероятного

Таблица 10.1

Вероятность смерти людей различного возраста от ожогов кожного покрова

Относительная площадь поражения кожного покрова, %	Возраст человека, лет						
	5—9	15—19	25—29	35—39	45—49	55—59	65—69
Более 93	1	1	1	1	1	1	1
83—87	0,9	0,9	0,9	1	1	1	1
73—77	0,7	0,8	0,8	0,9	1	1	1
63—67	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1
53—57	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1
43—47	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1
33—37	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8
23—27	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,6
13—17	0	0	0	0	0,1	0,1	0,3
3—7	0	0	0	0	0	0	0,1

причинения ущерба различным ресурсам от наиболее часто встречающихся поражающих факторов. Имея же значения соответствующих параметров вредного воздействия, нетрудно найти и входящие в правую часть формулы (8.25) площади S_{kd} , а зная среднюю плотность F_k и стоимость S_k единицы оказавшегося в ней ресурса, - спрогнозировать размеры соответствующего техногенного ущерба. А вот ситуация с априорной оценкой параметров вероятного ущерба Q_{kq} и Π_{kq} обстоит сложнее, что и будет предметом следующего параграфа.

Таблица 10.2

Последствия разрушительного воздействия воздушной ударной волны

Избыточное давление, кПа	Характер разрушений здания	Доля людей, получивших травмы, %			Ущерб зданию, % от общей стоимости
		крайне тяжелые	тяжелые	средней тяжести	
1—3	Слабые	—	0,1—0,3	3—7	5—10
3—6	Средние	0,1—0,3	0,5—1,5	5—15	10—20
6—9	Сильные	0,5—1,5	3—7	15—25	40—60
30—60	Полное	5—10	15—20	40—60	100—150*

Однако, до того как перейти к изложению подходящей для этого процедуры, приведем еще некоторые *статистические* данные [29, 53], характеризующие достаточно устойчиво проявляющиеся соотношения между различными способами высвобождения энергии пролитых углеводородных топлив. В 35 % случаев это обычно завершается взрывом образовавшегося облака; в 35 % воспламенением с образованием огненного шара и в 10 % - его постепенным выгоранием. В оставшихся же 20 % случаев имеет место медленное испарение пролива без воспламенения образовавшейся при этом топливовоздушной смеси.

Приведенная выше эмпирическая информация может оказаться пригодной для проверки достоверности результатов моделирования и априорной количественной оценки тех параметров исследуемой здесь стадии процесса причинения техногенного ущерба, которые касаются способов возможного физико-химического преобразования аварийно-опасного вещества в атмосфере.

10.2. Моделирование и системный анализ процесса разрушительного воздействия аварийно-опасных веществ

Как было отмечено выше (см. разд. 8.2 и разд. 10.1), одним из наиболее современных способов оценки последствий разрушительного воздействия на людские, материальные и природные ресурсы является использование так называемых пробит и эрфик-функций. Их достоинство состоит в возможности одновременного прогноза не только тяжести причиняемого определенным объектам техногенного ущерба Y_{kc} и Y_{ht} , но и вероятностей Q_{kc} , Q_{ht} и Q_{kq} его причинения потоками конкретного вида энергии или вредного вещества. Аргументами же этих функций служат те значения поглощенных доз, которые принадлежат диапазону $[D_{p1} - D_{p3}]$ кривых типа «доза-эффект» или, что одно и то же, - зоне вероятного поражения (см. рис. 8.3, а и 8.3, б соответственно).

В наиболее общем случае при оценке вероятности радиоактивного или токсического поражения человека и других биоособей под поглощенной ими ингаляционной токсической дозой либо экспозиционной дозой радиационного облучения следует понимать величину $DP(\underline{r})$, рассчитываемую по следующей универсальной формуле:

$$DP(\underline{r}) = \int_{t_H}^{t_K} c(\underline{r}, t) dt = c(\underline{r}, t), \quad (10.3)$$

где c , \bar{c} – реальная и средняя (на интервале времени t) концентрация вредного вещества; $t = t_K - t_H$ – время между концом и началом его ингаляционного воздействия.

Зная же величину этой дозы, можно определить уже долю пострадавших биообъектов либо вероятность P_{ob}^* поражения любого из них с определенной степенью тяжести, используя так называемый пробит:

$$\text{Prob} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\text{Pr}(DP)} e^{-\frac{\lambda^2}{2}} d\lambda; \text{ Prob} = 0,5 \left[1 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{\text{Pr}(DP)-5}{\sqrt{\pi}}} e^{-x^2} dx \right], \quad (10.4)$$

где $\text{Pr}(DP)$ - функция, используемая в качестве верхнего предела интегрирования и определяемая (в общем случае) по такой универсальной зависимости [13]:

$$\text{Pr}(DP) = \alpha + \beta \ln D(\bar{r}) + \gamma \ln \tau = \alpha + \beta \ln D[c(r) \tau^{k+1}], \quad (10.5)$$

где α , β , γ и $k = \gamma/\beta$ - коэффициенты, определяемые на основе статистической обработки опытных данных и характеризующие степень уязвимости конкретного объекта от конкретного вредного вещества или другого поражающего фактора.

Обратим внимание на еще два достоинства только что рассмотренного способа. Первое из них касается функции (10.4), которая не содержит эмпирических коэффициентов. Следовательно, связь между Prob и $\text{Pr}(DP)$ может быть заблаговременно представлена графически или таблично. В табл. 10.3 приведено данное соотношение, показывающее, например, что величине $\text{Pr} = 2,67$ и $8,09$ соответствуют $\text{Prob} = 1$ и 99% .

Второе достоинство относится к выражению (10.5), поскольку оно не только удобно для практического использования, но и имеет достаточно четкое обоснование. В первом случае имеется в виду следующее: рассматриваемая зависимость может быть выражена как линейно по отношению к своим параметрам, так и с помощью степенного сомножителя, что облегчает их статистическое оценивание либо интерполяцию; во втором – то, что она включает все существенные для радио- и токсикологии факторы (полученную дозу и период экспозиции), а правая часть этого выражения совершенно адекватна средней.

Таблица 10.3

Значения эрфик-функции Prob(Pr)

%	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	3,86	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

Однако при оценке вероятностей Q_{kc} , Q_{zh} и Q_{kq} с помощью рассматриваемого здесь метода следует иметь в виду и такие его особенности:

1) в разных литературных источниках в формуле (10.4) в качестве верхнего предела интегрирования берется либо $\text{Pr}(DP)$, либо $[\text{Pr}(DP) - 5]/2$;

2) аналогично обходятся в настоящее время и с выражением (10.4), которое в подавляющем числе случаев заменяется следующим упрощенным двучленом:

$$Pr(DP) = \alpha + \beta \ln[DP(r, \tau)]; \quad (10.6)$$

3) входящая в эту формулу токсонагрузка рассчитывается по (10.3), но величина $c(r, t)$ имеет уже степень « n », которая, принимая отличные от единицы значения, как бы учитывает специфику вредного вещества-токсиканта;

4) несмотря на совпадение модели (10.5) при $y = 1$ с моделью (10.6) при $n = 1$, невозможно найти оценки параметров одной из них, если известны другие;

5) наконец, в работах отечественных авторов концентрация вредного вещества $c(r, t)$ обычно выражается в мг/м³, тогда как в зарубежных - еще и в *ppt* (одна миллионная часть).

Данные особенности могут приводить к ошибкам прогноза по причине несоответствия коэффициентов, приведенных для четырех последних формул в различной литературе*. Вот почему для избежания недоразумений при прогнозе исхода поражения любого объекта с помощью пробит-функций необходимо вначале проверить достоверность соответствующих коэффициентов, а затем убедиться в их пригодности к конкретной зависимости. Сделать последнее можно, подставляя параметры a и b (а иногда и n) в выбранное для $DP(r)$ выражение и вычисляя его значение. В одном случае левая часть этих формул должна принять нулевое значение, а в другом - оказаться равной 5.

В тех случаях, когда размерности концентрации вредного вещества не совпадают, устранение этого несоответствия следует осуществлять с помощью такого соотношения:

$$c(ppt) == 0,08205cT/(P\mu), \quad (10.7)$$

где c - концентрация, мг/м³; T - абсолютная температура, К; P - давление (атмосфер) соответствующей газовой смеси; μ - молекулярная масса вредного вещества [г/(г' моль)].

Рассмотрим возможность построения *изолиний*, характеризующих заранее установленную (критическую) вероятность ингаляционного поражения заданной степени тяжести, в предположении об известности параметров α , β и k универсальной зависимости (10.5) или a , b и n - ее упрощенного варианта (10.6). Сделать это можно, приравняв их правую часть, например, значению $Pr_{кр}(DP) = 5$, взятому из табл. 10.3 для $Prob[Pr(DP)] = 50\%$. Это приводит к таким двум уравнениям: $DP_{кр}(r) = \exp[(5 - \alpha)/\beta]$ или $DP_{кр}(r) = \exp[(5 - a)/b]$, а если учесть формулу (10.3), то к следующему аналитическому выражению изолинии 50 %-го поражения:

$$DP_{IKP} = \left[\int_{t_0^*(r)}^{t_k^*(r)} c(x_p, y_p, 1, 5; t) dt \right] [\Delta t^*(r_p)]^k$$

$$DP_{2KP} = \int_{t_H^*(r)}^{t_K^*(r)} c(x_p, y_p, 1,5; t) dt \quad (10.8)$$

Для того чтобы отказаться от численного решения этих двух уравнений и получить аналитическое выражение для искомой здесь изолинии $DP_{кр}(r)$, необходимо ввести в базовую модель (9.20), (9.21) ряд упрощающих допущений:

а) принять $f_p(t) = f_{oc}(t) = 1$, т.е. временно игнорировать снижение концентрации вредного вещества за счет его разбавления атмосферой и оседания на землю;

б) изолинию строить лишь для пятна загрязнения, т. е. на плоскости с координатами $r(x_p, y_p, 1,5)$, а в качестве исходного уравнения принять формулу (10.3);

в) учитывая малое изменение скорости u_x за время, τ^* между началом t_H^* и концом t_K^* ингаляции, приравнять $\sigma_i^2(u_x \tau^*)$ к $\sigma_i^2(x_p)$, (где $x_K = u_x \tau^*$, а $\tau^* = t_K - t_H$) и обозначать в последующем эту дисперсию через Δ_i^2 .

С учетом только что принятых (не очень грубых) допущений имеем следующее уравнение изолинии, эквивалентное системе (10.8) [13]:

$$DP_{KP} = \frac{M}{4\pi\Delta_y\Delta_z u_x} \left[\Phi\left(\frac{x_p}{\sqrt{2}\Delta_x}\right) + 1 \right] \exp\left(-\frac{y_p^2}{2\Delta_y^2}\right) \times \\ \times \left\{ \exp\left[-\frac{(1,5-z_0)^2}{2\Delta_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(1,5+z_0)^2}{2\Delta_z^2}\right] \right\} \quad (10.9)$$

откуда после разрешения относительно y_p с учетом зависимости Δ_z^2 от x_p может быть получена формула, позволяющая строить искомые здесь изолинии:

$$y_p = \pm \sqrt{2}\Delta_y(x_p) \times \left(\ln \frac{M \left\{ \Phi\left[\frac{x_p}{\sqrt{2}\Delta_x(x_p)}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(1,5-z_0)^2}{2\Delta_z^2(x_p)}\right] + \exp\left[-\frac{(1,5+z_0)^2}{2\Delta_z^2(x_p)}\right] \right\} \right)^{\frac{1}{2}}}{N_{кр} 4\pi\Delta_y(x_p)\Delta_z(x_p)u_x} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10.10)$$

Найденное геометрическое место точек в пределах зоны опасного заражения радиоактивным или токсическим веществом как раз и соответствует тому положению людей, не имеющих средств защиты дыхания, при котором с заданной вероятностью обеспечивается получение ими дозы критического воздействия $DP_{кр}(r)$.

В завершение изложения общей процедуры прогноза вероятности причинения ущерба укажем особенности выбора интервала времени $\tau = t_K - t_H$ учитывая его значимость для нестационарного поля концентрации. В данном случае в интеграле (10.3) целесообразно назначать $t_H = t_1^*$, а $t_K = t_2^*$, поскольку значения времени подхода и ухода пятна загрязнения зависят от $r(x, y, z)$. Если же речь идет о построении изолиний, то при выборе начала и конца времени экспозиции в последнем уравнении разумно исходить из наиболее опасного условия: $t_H = t_{max} - \tau$, и $t_K = t_{max} + \tau$, где t_{max} - момент времени наступления максимальной концентрации в данной конкретной точке, правомерность появления которого обсуждалась выше (см. разд. 9.2).

Что касается реальных значений коэффициентов, входящих в ныне используемое выражение (10.6) для аргумента пробит-функции, то найти их можно пока лишь в иностранной литературе. Кроме того, значительная часть данной информации [13, 19, 29], относящаяся к рассматриваемым здесь поражающим факторам и повреждаемым ими ресурсам, систематизирована в табл. 10.4.

Конкретные рекомендации и примеры, иллюстрирующие не только возможность определения тех параметров табл. 10.4, которые влияют на разрушительный эффект указанных в ней поражающих факторов, но и на работоспособность всех рассмотренных здесь и выше моделей процесса причинения ущерба, будут представлены ниже, после ознакомления с еще одним подходом к прогнозу вероятности Qkq . Однако при изложении данного подхода ограничимся всего лишь одним, фугасным фактором, хотя его поражающее действие оценим для различных объектов из состава людских и материальных ресурсов.

Если прогнозировать вероятные последствия разрушительного воздействия воздушной ударной волны, то для уточненной оценки размеров соответствующего ущерба должны учитываться и барическое давление на ее фронте, и параметры стойкости конкретных объектов. Так, для зданий и сооружений могут использоваться: а) два коэффициента, указывающих на стойкость по отношению к ударной волне: K_{Bj} - его высоты (B_j , м) и $K_{\Phi j}$ - доли фронтального остекления (Φ); б) два давления: базовое ΔP_{jcp} и среднее арифметическое от давлений, приводящих к повреждениям определенной тяжести ΔP_{OjCP} [22].

Эти два коэффициента рассчитываются по следующим эмпирическим формулам:

$$\begin{aligned} K_{Bj} &= 1 + (3,40/B_j); \\ K_{\Phi j} &= [(1,36 + \Phi_j)^2 + \Phi_j(1 - \Phi)]^{1/2} - 0,36, \end{aligned} \quad (10.11)$$

а уточненные давления ΔP_{ij} , приводящие к разрушениям каждой из принятых ныне в строительной отрасли четырех степеней тяжести, таким образом:

$$\Delta P_{ij} = \Delta P_{jcp} (0,07 + 0,37i); \Delta P_{jcp} = K_{Bj} K_{\Phi j} \Delta P_{Ojcp} \quad (10.12)$$

Входящий во вторую формулу параметр ΔP_{Ojcp} определяется в настоящее время экспериментально, и ряд его значений приведен в табл. 10.5.

При известных значениях давлений ΔP_{jcp} , ΔP_{Ojcp} и ΔP_{ij} для прогноза последствий воздействия такой воздушной ударной волны можно руководствоваться детерминистскими либо вероятностными критериями оценки тяжести ожидаемого ущерба.

В первом случае, например, такими: а) если барическое давление ΔP_{Φ} превышает ΔP_{j4} , то, в данной точке зоны поражения будут невозстановливаемые повреждения зданий и транспортных средств, массовая гибель людей; б) при давлениях на фронте волны $\Delta P_{j3} < \Delta P_{\Phi} \leq \Delta P_{j4}$ возможны

реставрация неподвижных и подвижных сооружений, выживание людей; в) при $\Delta P_{j2} < \Delta P_{\phi} \leq \Delta P_{j3}$ - полное разрушение остекления зданий и увечья людей; г) при $\Delta P_{j1} < \Delta P_{\phi} \leq \Delta P_{j2}$ - незначительные повреждения остекления и мелкие ушибы людей.

Таблица 10.5

Значения базовых давлений для зданий и сооружений

Наименование (тип) здания или сооружения	ΔP_{0cp} , кПа
Ансейсмическое, повышенной прочности	80
с тяжелым каркасом и крановым оборудованием	30
то же самое, но без кранового оборудования	25
Бетонное каркасное	27
с легким металлическим каркасом и без него	20
Кирпичное бескаркасное	13
с металлическим каркасом и под волнистой сталью	10
Бревенчатое	7

Во *втором* случае - при вероятностной оценке исхода фугасного воздействия на здания и сооружения, уже учитывающей Реально наблюдаемый разброс прочностных свойств даже однотипных объектов, - следует руководствоваться зависимостью между вероятностями Q_i конкретных степеней повреждения и математическим ожиданием i_{cp} этой случайной величины для объектов конкретного (см. табл. 10.5) типа. Например, зданиями *j-го* типа *i-х* фугасных разрушений одной из четырех степеней тяжести: 1 легкая (10% - ное повреждение *стекол*), 2 - средняя (полное разрушение остекления), 3 - реставрируемые тяжелые повреждения и 4 - невозстанавливаемые разрушения.

Графическое представление соответствующей функции $Q_i(i_{cp})$ дано на рис. 10.2, а значение входящего в нее параметра *i*, характеризующего ожидаемую степень ущерба, может быть рассчитано по следующим формулам:

$$i_{cp} = 5[1 - \exp(-f_i)]; f_i = 0,7[\Delta P_{\phi}/\Delta P_{jcp} - 0,3]. \quad (10.13)$$

При Исползовании последнего уравнения следует руководствоваться такими значениями ΔP_{jcp} : $\Delta P_{1cp} = 0,01$, $\Delta P_{2cp} = 0,03$, $\Delta P_{3cp} = 0,1$ и $\Delta P_{4cp} = 0,3$ бар.

Что касается экономической оценки непосредственного ущерба поврежденным зданиям и сооружениям, то при ее проведении следует пользоваться рекомендациями ЦНИИ ОМТП РФ.

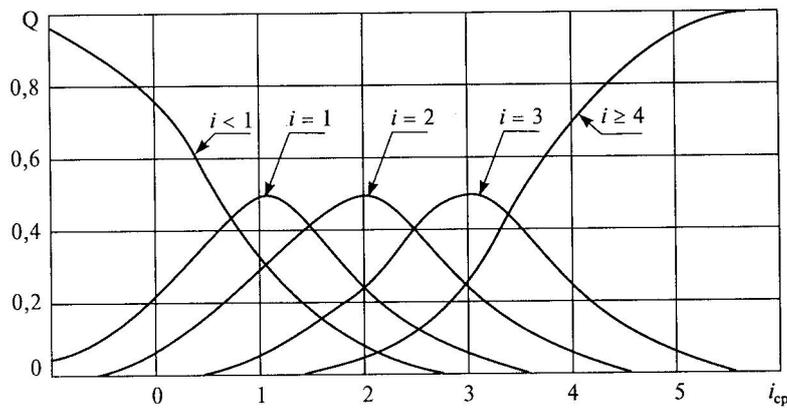


Рис. 10.2. Графики кривых $Q(i_{ср})$

Следуя им, средняя относительная стоимость ремонтно-восстановительных работ, определяемая как процентная доля начальной цены рассматриваемых объектов, может быть аппроксимирована такими полуэмпирическими формулами [22]:

$$S_{i_{ср}} = 1 - \exp(-f_2); f_2 = 0,05i_{ср}^{2,4}. \quad (10.14)$$

В случае отсутствия данных о начальной цене поврежденных зданий величина причиненного ущерба должна рассчитываться путем оценки стоимости социального времени, необходимого для реставрационных работ: через известную в строительстве цену одного человеко-дня и их количество, определяемое перемножением среднего числа строителей $\bar{Ч}_{i_{ср}}$ (человек) на продолжительность ремонта $T_{i_{ср}}$ (дней). Значения последних двух параметров можно прогнозировать с помощью следующих формул:

$$\bar{Ч}_{i_{ср}} = 2(9 + 0,015S_{i_{ср}}\Pi_i); T_{i_{ср}} = (7,2S_{i_{ср}}\Pi_j)/\bar{Ч}_{i_{ср}}, \quad (10.15)$$

где Π_j - общая площадь восстанавливаемого здания, m^2 .

На этом и ограничимся в прогнозе ущерба от фугасного воздействия взрывного высвобождения энергии без учета способности ударной волны отбрасывать людей и другие, не прикрепленные к земле объекты, а также поражать их летящими фрагментами зданий, транспортных средств и оборудования. В отдельных случаях по этой причине возможен разброс массивных предметов на удалении до 1 км. Поскольку предусмотреть подобный аэродинамический эффект практически невозможно, то обычно ограничиваются учетом лишь небольших осколков режущего и ударного воздействия.

Для иллюстрации работоспособности большинства из рассмотренных выше процедур моделирования и системного анализа процесса причинения техногенного ущерба обратимся к рис. 5.7 из предыдущей части учебного пособия. Это необходимо сделать для пояснения того, как были получены параметры, представленные там справа, в виде цифр, находящихся после прописных русских букв, - в скобках, после точки с запятой.

Напомним, что на изображенном в этой части рисунка дереве событий

показаны возможные исходы аварийного истечения и неконтролируемой трансформации ракетного топлива (взрыв, пожар и испарение). Имеющиеся же в некоторых узлах данной модели цифры указывают следующее: первые - вероятности Q_i , вторые - K_j количество пролитого горючего или размеры площади P_k зон разрушительного воздействия образовавшихся при этом поражающих факторов взрыва и пожара.

В частности, верхняя ветвь дерева событий рис. 5.7 характеризует Последствия большого (Б) пролива жидкого водорода из топливного отсека ракеты по причине его переполнения. Данная группа сценариев учитывает возможность потери устойчивости такой тонкостенной конструкции, что чревато ее разрушением и проливом всего криогенного содержимого. Столь же вероятна и последующая трансформация образовавшейся при этом топливовоздушной смеси в форме мгновенного взрыва (В), интенсивного пожара (П) и одного лишь испарения (И). Продемонстрируем правдоподобность и/или порядок определения некоторых параметров верхнего ответвления модели.

Как видно из самой верхней (ДЛЯ дерева) подгруппы сценариев, результатом взрывоподобной трансформации 375 т жидководородного топлива стало причинение ущерба тем ресурсам, которые оказались в окружении стартового комплекса: а) для взрыва топливовоздушной смеси - трем видам (1- 3), на площади около 6 га; б) для ее возгорания с образованием огненного шара двум видам (4 и 5), на площади .1,2 га. Первая из приведенных здесь цифр не рассчитывалась по формулам (9.1) и (9.2), поскольку в соответствии с рекомендациями [19] могла быть принята равной весу заправки горючим ракеты-носителя.

А вот при оценке площадей P_{kq} и P_{kd} вероятного и достоверного поражения различных ресурсов, а также стоимости причиненного им ущерба l_{ke} руководствовались не только параметрами рассматриваемых здесь поражающих факторов и стойкостью конкретных объектов по отношению к ним, но и затратами на их восстановление. Делалось это последовательно - вначале рассчитывались соответствующие радиусы фугасного и термического поражения, а затем уже оценивался характер наиболее вероятного повреждения ресурсов воздушной ударной волной и тепловым излучением огненного шара.

При прогнозе ущерба от *фугасного* воздействия взрыва с помощью формулы (9.10) был найден тротильный эквивалент облака испарившейся смеси: $ЭТ = 0,044 \times 0,5 \times 2,73 \times 375 \times 2/4,52 = 10000$ КГ. Затем, руководствуясь выражением (9.8), рассчитывалась величина того давления на фронте воздушной ударной волны ΔP_{ϕ} , которое могло иметь место на различном удалении от центра взрыва или поверхности огненного шара. Например, для расположенного вблизи старта завода по производству жидкого водорода (удаление $X_{\phi} = 100$ м, а приведенное расстояние $x_{\phi} = 100/(10 \cdot 000)^{1/3} = 4,64$ м/кг^{1/3}) оказалось, что $\Delta P_{\phi} = \{[(1,60 + 0,91 \cdot 4,64)/4,64]^2 - 1\} 103,32 = 59,37$ кПа, что вдвое превышает базовое для этого здания давление (см. табл. 10.5, вторая строка).

Для более детальной оценки возможного при этом ущерба уточним параметры стойкости этого завода, представляющего собой трехэтажное кирпичное здание с тяжелым каркасом высотой 12 м и степенью фронтального (к старту) остекления 30 %. В соответствии с формулой (10.11) имеем: $K_B = 1 + (3,4/12) = 1,28$ и $K_\phi = [(1,36 + 0,3)^2 + 0,3(1 - 0,3)]^{0,5} - 0,36 = 1,35$. Затем, используя данные табл. 10.4 и эти коэффициенты, по формуле (10.12) оценим усредненное и пороговые давления: $\Delta P_{jcp} = 1,2 \cdot 1,35 \cdot 13 = 22,46$ $\Delta P_{j1} = 22,46(0,07 + 0,37 \cdot 1) = 9,88$, $\Delta P_{j2} = 18,19$, $\Delta P_{j3} = 26,50$ и $\Delta P_{j4} = 34,81$ кПа. Оценку ожидаемой степени повреждения завода осуществим по формуле (10.13): $f_i = 0,71((59,37/22,46) - 0,30) = 2,52$; $i_{cp} = 5(1 - e^{-2,52}) = 4,25$, а вероятности причинения ущерба конкретной степени тяжести - по графикам рис. 10.1 (при $i_{cp} = 4,25$). Оказывается, что для первой степени поражения $Q_{j1} = 0$, для второй $Q_{j2} = 0,03$, для третьей $Q_{j3} = 0,08$ и для четвертой $Q_{j4} = 0,8$.

Для вероятностной же оценки фугасного ущерба людским ресурсам, в том числе и с учетом «метательного» эффекта воздушной ударной волны, целесообразно использовать пробит-функции. Порядок их практического применения будет продемонстрирован несколько позже. Здесь же пока ограничимся замечанием о том, что расчеты по ним приводят к следующим, довольно правдоподобным результатам: давления в 0,5 - 0,8 МПа влекут безусловное смертельное поражение людей; 0,35-0,5 МПа - приводят к летальному исходу в 50 % случаев, 0,2-0,3 МПа - являются порогом смертельного поражения, а 0,13-0,2 МПа сопровождаются тяжелой степенью поражения легких человека и разрывом его барабанных перепонок в 50 % случаев.

Что касается *термического* поражения огненным шаром, то здесь рассматривалась уже вторая группа сценариев (см. события 4 и 5 в верхней правой части рис. 5.7), а при оценке возможности воспламенения паров невзорвавшегося жидкого водорода применялись изложенные выше способы прогноза полей концентрации. Сделано это *было* для момента достижения соответствующим облаком уже упомянутого завода с координатами относительно старта - ($x = 100$, $y = 20$, $z = 10$) м. Считалось также, что масса способного к воспламенению горючего $M = K = 16$ т, а метеорологические условия в момент аварии характеризовались классом вертикальной устойчивости атмосферы D и скоростью ветра в направлении оси X , равной $u_x = 3$ м/с.

Для прогноза концентрации паров водорода использовано приведенное в табл. П.5.2 общее решение модели 101301 при $\tau = 40$ с. Естественно; что при указанной выше скорости ветра с учетом его отклонения от оси X на 20 м облако достигнет завода за это время. Входящие в модель коэффициенты турбулентной диффузии определялись с помощью табл. П.4.8 - для класса D устойчивости атмосферы. Оказывается, что в этом случае (для сельской местности) $K_x = K_y = 12,1 \cdot 3 = 36,3$ и $K_z = 1,07 \cdot 3 = 3,21$ м²/с.

Подстановка исходных данных в выбранную математическую модель и последующие вычисления привели к результату: $c(r, t) = 16000 / [8(3,14 \cdot$

$$40)^{3/2}(36,3 \cdot 36,3 \cdot 3,21)^{1/2}] \exp[-(100 - 3 \cdot 40)^2 / (4 \cdot 36,3 \cdot 40) - 20^2 / (4 \cdot 36,3 \cdot 40)] [\exp[-10^2 / (4 \cdot 3,21 \cdot 40)] + \exp[-10^2 / (4 \cdot 3,21 \cdot 40)]] = 16000 / (52776 \cdot 520) \cdot 4,43 \cdot 1,65 = 0,00424 \text{ кг/м}^3.$$

Сравнение данной концентрацией с нижним и верхним концентрационными пределами распространения пламени в рассматриваемой топливовоздушной смеси (0,00412...0,072 кг/м³) подтвердило возможность воспламенения соответствующего облака при попадании в него открытого огня.

Параметры образовавшегося при этом огненного шара рассчитывались в соответствии с формулами (9.12): $D_{o,ш} = 55 \cdot 16^{1/3} = 138 \text{ м}$, $E_{o,ш} = 12,3 \cdot 16^{2/3} = 78,1 \text{ ГВт}$, $\tau_{o,ш} = \Delta t = 3,8 \cdot 16^{1/3} = 9,5 \text{ с}$. Прогноз же разрушительного эффекта теплового Импульса от этого шара был проведен на примере оценки вероятности поражения не защищенных термостойкой одеждой людей, спешно покидающих завод и уже отбежавших от него на 325 м. Для этого вначале был определен удельный тепловой импульс $q_T = 78,1 \cdot 10^9 / 4\pi(70 + 325)^2] = 39,85 \text{ кВт/м}^2$ как частное от мощности огненного шара и площади сферической поверхности с радиусом, равным расстоянию между его центром и местоположением людей.

Затем с помощью табл. 10.4 и 10.3 оценена и вероятность их гибели от поглощенной за время существования огненного шара тепловой дозы, которая оказалась равной: $Q = 0,92$ при $P_T = -36,4 + 2,561 \ln(9,5 \cdot 39,85^{4/3}) = 6,41$.

Подобным образом может быть подтверждена возможность прогноза других параметров, характеризующих остальные сценарии дерева событий, а также оценены средние значения наиболее важных из них. Так, с учетом других ответвлений дерева математическое ожидание количества пролитого Горючего: $M(K) = 0,4 \cdot 375 + 0,3 \cdot 60 + 0,3 \cdot 16 = 172,8 \text{ т}$, а ожидаемая при большом проливе средняя площадь поражения фугасными, термическими и токсичными факторами оказалась равной $M(\Pi) = 0,3 \cdot 6 + 0,1 \cdot 2 + 0,1 \cdot 1 = 2,1 \text{ га}$.

Не вызывает принципиальных трудностей и оценка ущерба, причиненного, например, заводскому зданию, который может быть рассчитан по формулам (10.14) и (10.15), с учетом того, что общая площадь заводских помещений составляет 4000 м². С помощью первой он оценивается по Относительной стоимости данного объекта $C_{icp} = 1 - \exp(-0,05 \cdot 4,252 \cdot 4) \approx 100 \%$. Во второй формуле такой ущерб уже измеряется единицами социального времени: а) числом работающих $N_{icp} = 2(9 + 0,015 \cdot 1 \cdot 4000) = 138 \text{ чел}$; б) длительностью их использования при ремонте здания $\tau_{icp} = (7,2 \cdot 1 \cdot 4000) / 62 = 21 \text{ день}$ и в) общей трудоемкостью устранения повреждений $21 \cdot 138 = 28198 \text{ чел.-дн}$. При стоимости одного человеко-дня в строительстве, примерно равной в настоящее время 200 р., величина этого ущерба может быть оценена в 563960 р.

Однако нельзя сказать, что с оценкой техногенного ущерба все так просто. Ведь здесь совсем игнорировался косвенный ущерб и пока не учитывался синергетический эффект совместного действия различных поражающих факторов. А связан он с возможностью одновременного наступления

нескольких разрушительных последствий (барического, дробящего и метательного) той же воздушной ударной волны или совместного проявления токсичных и взрывоопасных свойств отдельных химических веществ.

Учет подобного эффекта может существенно скорректировать прогнозы техногенного ущерба, хотя и требует определенной модификации только что рассмотренных методов. Однако при приближенных оценках зон трансформации и разрушительного воздействия поражающих факторов можно ограничиться либо простой суперпозицией их разрушительного эффекта, либо последовательным определением соответствующих параметров и выбором из них наиболее существенных.

В завершение же данного параграфа приведем ряд *статистических* данных, пригодных для проверки достоверности результатов моделирования и системного анализа рассмотренного здесь процесса причинения техногенного ущерба. Например, в работе [54] дана следующая средняя численность погибших в США при одной катастрофе а) на транспорте: авиационном - 78, морском - 61, железнодорожном - 30; б) в результате одного происшествия типа: взрыв - 26, пожар - 35 и землетрясение - 2500 человек.

Имеются подобные данные и о последствиях тяжелых техногенных происшествий на производстве и транспорте России. В частности, а) средняя стоимость издержек (млн долл.) от каждой крупной аварии на наших заводах ныне составляет [29]: нефтеперерабатывающий - 45, нефтехимический - 47, газоперерабатывающий - 55; б) величина среднего ущерба от одного серьезного происшествия на них равна: пожар - 36, взрыв - 33, объемный взрыв парогазового облака - 60; в) разрушительные последствия каждой разгерметизации со значительным выбросом аварийно опасного содержимого оцениваются в среднем: для магистрального трубопровода - 47, стационарного резервуара - 42, реактора химического - 68, морского судна - 35, компрессора большой мощности - 29 и нагревательного котла - 18 млн долл.

10.3. Особенности прогноза последствий вредного воздействия на людские и природные ресурсы

В заключение главы кратко остановимся на методах прогнозирования ущерба от аварийных и непрерывных вредных материальных выбросов, сопровождающихся гибелью и травмированием людей, отчуждением недр, уничтожением флоры и фауны. Для подтверждения актуальности и необходимости учета ущерба не только людям, но и природе приведем слова известного деятеля Ф. Сен Марка: «Ввести в нашу экономику понятие "ценность природы" прежде считавшуюся ничтожной, - значит революционизировать ее и вызвать столь же глубокие изменения, какие вызвало появление машин в XIX в.» [7].

Естественно, что практическая реализация данного требования

предполагает необходимость и более точной априорной оценки полученных биотой и людьми не только ингаляционной токсодозы химических веществ, но и экспозиционной мощности дозы радиоактивных. Расчет значений таких доз должен проводиться с помощью моделей поглощения, связывающих эти дозы с параметрами концентрационного поля, которые прогнозировались в разд. 10.2.

При оценке размеров зон и вероятности поражения рассматриваемых здесь ресурсов радиоактивными или сильнодействующими токсичными веществами будем руководствоваться длительностью $\tau(t_H, t_K)$ воздействия таких вредных веществ от момента времени t_H его начала до конца t_K т. е. ($\tau = t_H - t_K$), и их концентрацией в конкретной точке $\underline{r}(x, y, z)$ в данный момент времени t . В общем: случае концентрация $c(\underline{r}, t)$ будет считаться функцией двух основных параметров: а) расстояния между источником загрязнения и месторасположением поражаемых ресурсов (между точками \underline{r}' и \underline{r}), б) длительности времени с момента выброса вредного вещества $t_H = t_0$ либо с начала его ингаляции $t_H = t_I^*$.

Последнее замечание означает, что в последующем здесь будут использованы и такие обозначения: а) $\tau = t - t_0$ - для оценки текущих параметров поля концентрации; б) $\tau^* = t_2^* - t_1^*$ - при расчете либо токсонагрузок в пятне заражения вредным веществом, либо токсодоз, полученных оказавшимися там без средств защиты людей за конкретный интервал времени его ингаляции или адсорбции. Отсюда следует и справедливость, в некоторых случаях, равенства между τ и t (при условии, что $t_H = t_0 = t_I^* = 0$), поэтому смысл символов τ , t , t_H и t_K будет особо оговариваться в каждом конкретном случае.

Возможный поражающий эффект вредных веществ (например, вероятность Q_{kq} либо процент гибели людей или других биоособей) рекомендуется оценивать двумя способами, отличающимися числом учитываемых факторов, а значит, и их достоверностью. Кратко охарактеризуем каждый из них, обратив внимание на то, что оба эти способа основываются на расчете поглощенных живыми существами экспозиционных доз $DP(\underline{r}, \tau)$ и использовании рассмотренных ранее (см. разд. 8.2) зависимостей типа «доза - эффект».

Первый способ следует считать менее точным, поскольку базируется он на зависимости (10.6), предполагающей стационарность поля концентрации вредного вещества: $c(\underline{r}, t) = C = \text{const}$ и рассчитывающей мощность поглощенной токсодозы по такой упрощенной формуле: $DP = C^n \tau$. Показатель степени n и коэффициенты a и b , входящие в это выражение для P_r , совместно со смертельно опасными концентрациями ряда аварийно-опасных химических веществ – LC_{50} (ppm , τ - мин), приведены в табл. 10.6.

В отличие от первого *второй* (более точный) способ учитывает реальную нестационарность концентрационного поля в зоне рассеяния вредного вещества, в том числе и по причине естественной динамики его выброса из точки \underline{r}' . С этой целью должны использоваться две прогнозные модели: одна - для изменяющегося поля концентрации, а другая - для поглощенной

потенциальной жертвой дозы.

Что касается *концентрации* $c(\underline{r}, t)$ вредного вещества, то для прогноза ее текущего уровня с учетом, например, эпизодичности работы источника его мгновенных выбросов на некотором интервале времени $t \in (0, T)$, как и ранее, разумно использовать базовые соотношения (9.20)-(9.21). Однако при этом следует различать два периода: а) до момента $t' = t_0 = 0$, когда произошел такой выброс; б) от его начала и до конца периода m . Тогда, используя принцип суперпозиции и два соотношения между текущим моментом времени t и продолжительностью рассматриваемого периода, можно записать такие выражения:

$$\begin{aligned} c(\underline{r}, t) &= m \int_0^t G(\underline{r}, \underline{r}', t-t') dt', \quad \text{при } 0 < t < T; \\ c(\underline{r}, t) &= m \int_0^T G(\underline{r}, \underline{r}', t-t') dt', \quad \text{при } t \geq T, \end{aligned} \quad (10.16)$$

где m - интенсивность выброса вредного вещества в единицу времени, кг/с; $G(\underline{r}, \underline{r}', t-t')$ - рассмотренная выше функция (9.21), называемая «фактор метеорологического разбавления» вещества в атмосфере.

Аналогично определяется и *токсодоза*, поглощенная человеком или иной биоособью. В отличие от предыдущего случая здесь следует различать уже другие две ситуации: 1) когда $t_K^* < T$, т.е. поглощение вредного вещества реципиентом заканчивается при еще работающем источнике его выброса; 2) это имеет место несколько позже: $t_K^* \geq T$. Введя подстановку $\lambda = t - t'$ и приняв $t = 0$, для каждой такой ситуации можно получить следующие уравнения [13]:

$$D_1(\underline{r}, t) = m (t_{K1} - t_H) \times \left[\int_0^{t_H} G(\underline{r}, \underline{r}', \lambda) (t_K - \lambda) d\lambda + \int_{t_H}^{t_{K1}} G(\underline{r}, \underline{r}', \lambda) (t_{K1} - \lambda) d\lambda \right]; \quad (10.17)$$

$$\begin{aligned} D_2(\underline{r}, t) &= m \\ & \int_0^{t_H} G(\underline{r}, \underline{r}', \lambda) (T - t_H + \lambda) d\lambda + mT \int_{t_H}^{t_{K2}-T} G(\underline{r}, \underline{r}', \lambda) d\lambda + m \int_{t_{K2}-T}^{t_{K2}} G(\underline{r}, \underline{r}', \lambda) (t_{K2} - \lambda) d\lambda; \end{aligned} \quad (10.18)$$

Проиллюстрируем конструктивность полученного результата на примере сравнительной оценки доз, полученных людьми от выброса в атмосферу одного и того же количества M вредных веществ за одно и то же время $\tau \in [0, t_K]$ но при разной динамике их выброса. При этом, используя формулы (10.16), рассмотрим *два* практически интересных случая: а) выброс произошел мгновенно; б) имело место непрерывное истечение таких веществ с постоянной интенсивностью $m = M/\tau$.

Оказывается, что для мгновенного выброса полученная вредная доза $D_3(\underline{r}, t)$ всегда превышает соответствующее значение от непрерывного источника - D_H на величину $\Delta D > 0$. Иначе говоря, имеют место такие зависимости:

$$D_3(\underline{r}, t) = D_H(\underline{r}, t) + \Delta D; \quad \Delta D = (M / t_K) \int_0^{t_K} G(\underline{r}, \underline{r}', \lambda) (t_K - \lambda) d\lambda. \quad (10.19)$$

Последние соотношения справедливы для любых источников вредных выбросов и функций метеорологического разбавления, в том числе для всех

моделей их распространения, которые были рассмотрены в предыдущем разделе.

Заметим, однако, что для точного прогноза разрушительного воздействия токсичных и радиоактивных веществ на живые организмы, недостаточно знания одних лишь усредненных доз D_1 , D_2 , D_3 и D_H . Дело в том, что реальная величина ингаляционной токсодозы DP_T или экспозиционной радиационной дозы DP_R зависит от объема зараженного воздуха, прошедшего через органы дыхания. Кроме того, при еще более точном прогнозе последствий подобного заражения следует учитывать не только интенсивность физической нагрузки в это время, но также возраст и состояние здоровья человека.

Заканчивая рассмотрение особенностей воздействия на людей вредных веществ, приведем *статистически* проверенные пропорции между различными исходами их массового отравления парами токсичных веществ. Установлено, что легко пострадавшие обычно составляют примерно 65 %; получившие отравления средней и тяжелой степени - около 30 %, тогда как смертельный исход наблюдается приблизительно у 5 % людей, оказавшихся под вредным воздействием. Общее же число $Ч_{\Pi}$ пострадавших удобно рассчитывать по такой приближенной эмпирической формуле:

$$Ч_{\Pi} = K_{в.в} I_c Ч, \quad (10.20)$$

где $K_{в.в}$, I_c - количество высвободившегося токсичного вещества (кг) и присвоенный ему «индекс смертности» (см. табл. 10.7) соответственно; $Ч$ - число людей в зоне воздействия паров такого вредного вещества (чел.).

Таблица 10.7

Таблица 10.7

Индексы смертности I_c некоторых вредных веществ

Вещество	Индекс	Вещество	Индекс	Вещество	Индекс
Сернистый газ	0,04	Фосген	0,5	Сероводород	0,07
Метилизоцианат	12,5	Хлор	0,18	Аммиак	0,18

В завершение параграфа остановимся на особенностях оценки ущерба *природным* ресурсам, оказавшимся в зонах потенциального поражения. Как и ранее, для этого целесообразно пользоваться выражениями (8.2) - (8.3), а в качестве параметра плотности этих ресурсов следует учитывать численности основных групп биоресурсов: а) для наземных экосистем - это позвоночные и непозвоночные, деревья и кустарники, растительность наземного яруса и почвенные беспозвоночные; б) для водных – высшие водные растения и водные позвоночные, донные беспозвоночные, зоопланктон и фитопланктон.

По мнению авторов [7], ущерб от гибели флоры и фауны оценивать по снижению энергонасыщенности соответствующих экосистем, а также изменению тех потоков энергии: входящей I и выходящей E через их трофические уровни, которые показаны на рис. 10.3. Последнюю же компоненту ущерба можно считать равной энергопродуктивности

уничтоженных биоресурсов. При этом стоимость энергии, утилизируемой ими автотрофно, должна равняться затратам на ее получение другими «экологически чистыми» способами, например 4 - 5 долл. за 1 Вт или 20 - 30 центов за 1 кВт·ч - как для современных солнечных электробатарей.

Для определения энергонасыщенности (энергоемкости) уничтоженной биоты необходимо располагать следующими исходными данными: средняя масса тела одной биоособи M_k (кг), энергетическое содержание накопленного ею вещества q_k (кДж/кг), скорость оборота или регенерации данной биомассы V_k (кг/год), энергия ее существования (интенсивность дыхания поддержания) E_k (кДж/год), трофический уровень и специализация - j , а также коэффициенты утилизации энергии на всех k трофических уровнях - I_j .

Общая стоимость C_k подвергнутых разрушительному техногенному воздействию биотических природных ресурсов k -го вида или покрытой ими единицы территории (акватории) C_t могут рассчитываться по следующим формулам [7]:

$$C_k = G_k V_k + E_k / \prod_{j=1}^k P_j; \quad C_t = \sum_{i=1}^n C_i D_i \quad (10.21)$$

где G_k - энергосодержание погибших биоособей, кДж; C_i - эквивалентная цена одной особи или единицы биомассы (кДж); D_i - плотность в зоне поражения биоты (1/га или 1/км²).



Рис. 10.3. Схема потоков энергии через экосистему

При использовании последних формул следует помнить, что входящие в них стоимости рассчитываются с учетом временного лага необходимого для полного восстановления поврежденной биоты, а P_j - безразмерная величина. Кроме этого, определяя их параметры, нужно руководствоваться следующим:

- 1) величина энергетического содержания биоособей G_k . Значение данного параметра определяется перемножением удельной теплоемкости qk их тела (кДж/кг) на его массу M_k :

$$G_k = q_k M_k \quad (10.22)$$

Данные по удельным теплоемкостям биомассы некоторых представителей флоры и фауны приведены в табл. П.6.3.

- 2) скорость естественного кругооборота или регенерации биомассы в экосистеме - V_k .

Ее величина для конкретного биологического вида считается обратно пропорциональной среднему времени генерации соответствующих особей, которое можно считать равным примерно одной трети максимальной

продолжительности их жизни - τ_k . Иначе говоря: $V_k = 3\tau_k L_k$, где τ_k измеряется секундами. В отсутствие данных по τ_k максимальная длительность жизни млекопитающих и птиц рассчитывается по следующим формулам:

$$\tau_{km} = 366 \cdot 10^6 \cdot M^{0,2}; \tau_{kn} = 894 \cdot 10^6 W^{0,19}; \quad (10.23)$$

3) энергия существования или мощность поддержания животных $E_{кжс}$ и растений $E_{кр}$. Для большинства теплокровных животных этот параметр зависит от массы и примерно вдвое превышает уровень их основного обмена в термонейтральных условиях $Y_{кжс}$. Это означает, что значения $E_{кжс}$ и $Y_{кжс}$ могут быть рассчитаны по следующим формулам:

$$E_{кжс} = 2Y_{кжс}; Y_{кжс} = cM^d, \quad (10.24)$$

где c, d - коэффициенты аллометрического уравнения (см. табл. П.6.4).

Определение же величины $E_{кр}$ для растений в общем случае проводится с учетом процессов фотосинтеза и дыхания, т. е. исходя из затрат энергии на поглощение двуокси углерода и выделение кислорода. Для лесных сообществ она может быть оценена в Предположении, что годовая продукция этих экосистем составляет 5 % от общей биомассы, которая рассредоточена так: в стволах - 40 %, в ветвях и листьях - 35 %, под землей - 25 %. В пересчете на кубометр древесины величину $E_{кр}$ следует рассчитывать по такой формуле [7]:

$$E_{кр} = 0,026688p, \quad (10.25)$$

где p - плотность условно сухой древесины, определяемая с помощью таблицы П.6.5;

4) коэффициент утилизации энергии P_j . Для большинства плото- и зерноядных животных его значение можно принимать приблизительно равным 0,8. При питании животных грубыми зелеными кормами величина $P_j = 0,6$.

В заключение укажем на еще один способ оценки ущерба родной среде непрерывными выбросами загрязняющих веществ, который связан с компенсационными *затратами* собственника соответствующих источников. В частности, для производственных и транспортных предприятия в расчетном периоде устанавливаются различные нормативы выплат за вредные выбросы в пределах установленных для них лимитов и сверх них. В случае непревышения предельно допустимых выбросов в атмосферу и водные объекты размер выплат S_1 за них определяется таким образом:

$$S_1 = \sum_{t=1}^T s_t / \sum_{t=1}^T S_{tL} \quad (10.26)$$

где t, T - номер года планового периода и его общая продолжительность; S_t S_{tL} - затраты (р.) на снижение количества 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 соответствующие издержки предприятий, S_2 (р.), рассчитываются так:

$$S_2 = S_{jt} / (dM_{jt}), \quad (10.27)$$

где S_{jt} - затраты предприятия на снижение выбросов до установленного их лимита, р./год; dM_{jt} - плановый объем вредных выбросов предприятия в текущем году.

На этом можно было бы завершить знакомство с особенностями прогноза, измерения и компенсации техногенного ущерба людским и биологическим ресурсам, так как более подробные сведения и иллюстративные примеры определения его размеров, можно обнаружить в работах [1, 3, 26, 29] и других источниках. В порядке же краткого *резюме* по материалу всей этой главы уместно заметить следующее.

Представляется очевидной как трудоемкость, так и относительно невысокая достоверность априорной количественной оценки последствий трансформации и разрушительного воздействия на различные объекты аварийно высвободившихся запасов вредного вещества и энергии. Связано это не только с теоретической неразработанностью данной проблемы, но и с исключительно большим числом влияющих на нее факторов, которые в подавляющем количестве по своей природе случайны и взаимосвязаны.

Данное утверждение полностью касается и содержания всей третьей части данного учебного издания, раскрывающей основные принципы моделирования и системного анализа процесса причинения техногенного ущерба, поскольку только что перечисленные аспекты характерны и для других этапов этого процесса. Однако обозначенные здесь и иные сложности не следует понимать как намек на бесполезность соответствующих исследований и прогнозов. Напротив, умение заблаговременно оценивать рассмотренные здесь издержки, хотя бы приближенно, является необходимым условием для успешного решения ряда практически важных задач.

Важнейшая среди этих задач, конечно же, прогноз риска причинения ущерба на всех стадиях этапов создания и эксплуатации объектов техносферы. При этом наиболее опасные из них должны подвергаться более обстоятельному исследованию, с составлением систем дифференциальных уравнений (в частных производных или обыкновенных), их интегрированию или решению методами численного моделирования. В остальных случаях могут использоваться параметрические модели, которые хорошо зарекомендовали себя для проведения экспресс-анализа, в том числе и для прогноза последствий уже возникших аварий, поскольку такой анализ возможно проводить в режиме реального времени.

Результаты подобного моделирования и системного анализа позволили бы не только грамотно обосновывать решения по альтернативным техническим проектам и выбору места их дислокации, но и более целенаправленно работать как с проживающим вблизи населением, так и с общественными движениями типа зеленые,). В конечном итоге все это способствовало бы совершенствованию управления процессом обеспечения безопасности в техносфере и снижению за счет этого техногенного ущерба людским, материальным и природным ресурсам. А вот о том, как это сделать, говорится в четвертой части.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается принципиальная трудность прогноза техногенного ущерба?
2. Какой вклад эта сложность привносит в выбор соответствующих моделей и методов?
3. Какими способами в настоящее время принято преодолевать ряд принципиальных неопределенностей, сдерживающих применение точных моделей и методов прогноза ущерба?
4. Что означает термин «пробит-функция» и где он используется?
5. На какие особенности следует обращать внимание при использовании этой функции?
6. А можно ли применять аппарат пробит- и эрфик-функций для нормирования безопасности или охраны труда?
7. Уточните область применения коэффициентов пробит-функции и каким образом они могут быть определены.
8. Известны ли вам другие способы вероятностной оценки причинения конкретного ущерба людским и материальным ресурсам?
9. Что означает измерение материального ущерба в относительной стоимости?
10. Каким образом можно перейти от денежного выражения ущерба к его измерениям категориями Социального времени?
11. Насколько оправдан существующий ныне способ аналитического выражения пробит-функции по формуле (10.6)?
12. В чем состоит основное преимущество его альтернативной модели (10.5)?
13. Если альтернативное выражение (10.5) лучше, то почему оно пока практически не применяется?
14. Почему степенное аналитическое выражение поглощенной токсодозы не гарантирует от ошибочного прогноза?
15. Нужно ли учитывать динамику выброса вредного вещества при прогнозе поглощенной токсодозы или достаточно знать лишь одну его массу?
16. Каким образом можно судить о достоверности прогноза ущерба при оценке его величины и распределения по степени тяжести?
17. В чем состоит основной вред причинения ущерба отдельным представителям и биологическим видам?
18. На чем основана идея оценки стоимости конкретных биоособей?
19. Какие основные факторы и параметры следует учитывать при прогнозе ущерба, связанного с их гибелью?
20. А каким способом сейчас оценивается ущерб, причиненный непрерывными вредными выбросами объектов техносферы?