

*Серия: Экологическая безопасность России и проблемы уничтожения
химического оружия*

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА РИСКА ХИМИЧЕСКИХ АВАРИЙ

Под редакцией
В. М. КОЛОДКИНА

Ижевск
2001

ББК 20.1в641
УДК 502.55:519.711.3

Авторы выражают благодарность рецензентам книги коллективам
ГУП ГосНИИОХТ (г. Москва) и кафедры вычислительной математики
Удмуртского Государственного Университета (г. Ижевск) за ценные замечания.

Авторский коллектив:

В. М. Колодкин — главы 1, 2, 3, 6, 7; А. В. Мурин — главы 2, 3, 4, 5, 6, 7;
А. К. Петров — разделы 3.4 и 5.3.3; В. Г. Горский — раздел 4.2.

Количественная оценка риска химических аварий /Колодкин В. М., Мурин А. В.,
Петров А. К., Горский В. Г. /Под ред. Колодкина В. М. – Ижевск: Издательский
дом «Удмуртский университет», 2001 – 228 с. ISBN 5-7029-0260-2

В работе рассматриваются вопросы построения количественных оценок последствий теоретически
возможных химических аварий на потенциально опасных техногенных объектах. В основе прогноза
оценок лежат теория аварийного риска, физико-математические модели и результаты математического
моделирования процессов освобождения и распространения опасных субстанций в окружающей среде.
Вычислительный процесс построен с использованием современных компьютерных технологий и
параллельных вычислений. Расчеты доведены до численных оценок.

Предложенные методы прогнозирования проиллюстрированы на конкретных примерах. В качестве
потенциально опасных объектов рассматриваются объекты по хранению и утилизации боевых отравляющих
веществ, комплекс по утилизации зарядов ракетных двигателей твердого топлива.

Книга предназначена для научных работников, специалистов в области промышленной безопасности,
преподавателей вузов. Будет полезна студентам старших курсов и аспирантам, специализирующимся
в области экологической безопасности.

© Институт исследования природных и техногенных катастроф,
Удмуртский Государственный Университет, 2001
© Издательский дом «Удмуртский университет», 2001

Предисловие

Предлагаемая вниманию читателя книга продолжает серию работ [1, 2], объединенных общим названием «Экологическая безопасность России и проблемы уничтожения химического оружия».

Проблемы обеспечения экологической безопасности значимы для всех индустриально развитых регионов России. Особую значимость они представляют для Удмуртской Республики, где расположены два крупнейших арсенала химического оружия, где предполагается строительство завода по утилизации боевых отравляющих веществ, где планируется размещение объектов по утилизации ракетной техники. На примере этих объектов авторы исследуют теоретически возможные аварии и демонстрируют методологию оценки уровня потенциальной опасности, порождаемой объектом.

В основе книги лежат результаты работ по прогнозированию уровня потенциальной аварийной опасности, выполненные в Институте исследования природных и техногенных катастроф Удмуртского Государственного Университета в период с 1994 года по 2001 год. Эти работы проводились при финансовой поддержке российских и международных организаций. В частности, при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, при финансовой и организационной поддержке Международной организации «Зеленый Крест». Предоставленная международными организациями финансовая поддержка позволила привлечь к работе ведущих специалистов по оценке аварийной опасности из России, стран Западной Европы и США. Авторы считают своим долгом поблагодарить всех за участие в совместной работе.

Значимую помощь в работе над рукописью оказали рецензенты — сотрудники ГУП ГосНИИОХТ. Ценные замечания были сделаны д. т. н. Романовым В. И., д. т. н. Швецово-Шиловской Т. Н., к. т. н. Глухан Е. Н. и др., которые были ознакомлены с первой версией рукописи. Большую техническую помощь при подготовке рукописи к печати оказала Королева Д. Н. Всем им авторы приносят свою глубокую благодарность.

Введение

Аварии и катастрофы последних десятилетий — крушения поездов, падения самолетов, пожары и взрывы — закономерно приводят к выводу: двигаясь по пути технического прогресса человек подвергает себя все большему риску. Только в нашей стране за последние 30 лет от них пострадало более 10 млн. человек, из них погибло более 600 тыс. человек [3]. Благодаря совершенствованию искусственной среды обитания (техносферы), медицины средняя продолжительность жизни человека в Европе значительно увеличилась: если в бронзовом веке она составляла 30 лет, в XIX веке возросла до 35-40 лет, то в конце XX века достигла 75 лет. Созданная для защиты человека от внешних воздействий, в наше время техносфера сама становится источником опасности: растет мощность промышленных установок, усложняются технологии, возрастает влияние предприятий друг на друга, работа оборудования все больше зависит от правильности действий персонала, управляющего им. Риск и масштаб аварий значительно возрос. Необходимы меры по защите человека, по защите окружающей природной среды от опасностей, порождаемых техносферой, — техногенных аварий и катастроф.

Эти меры значимы на всем жизненном цикле техногенного объекта, но особенно — на стадии его проектирования. Ибо именно на этом этапе можно добиться значительного повышения безопасности объекта без существенного увеличения его стоимости.

Обычно уровень опасности от техногенного объекта, функционирующего в штатном, предусмотренном проектом режиме, несравненно ниже уровня опасности, который представляет объект в условиях аварийной ситуации. Соответственно, и оценки аварийного риска обычно имеют большие значения, чем оценки риска от того же объекта, функционирующего в штатном режиме. Различие оценок обычно бывает настолько большим, что именно оценки аварийного риска принимаются за меру уровня опасности, порождаемой техногенным объектом.

До недавнего времени при проектировании техногенных объектов исходили из принципа «абсолютной безопасности»: стремились сделать абсолютно надежную технику и провозглашали промышленные объекты абсолютно безопасными. А если авария все-таки случалась, оказывались неготовыми к ней. В наше время подход к оценке возможности аварий существенно изменился.

Если проанализировать разные аварии, можно выделить ряд общих причин: ошибки в проектах, неправильные решения о месте постройки объектов и режимах их эксплуатации, недооценка подготовки персонала, халатность и беспечность. Но анализ случившихся аварий не решает всех проблем. Необходимо не только

находить «слабые звенья» в технологических цепочках, но и предсказывать, как будут развиваться события, вызванные аварией, указывать, как добиться уменьшения их последствий. На смену технике безопасности — своду правил работы с техникой — должна прийти теория безопасности, или теория риска. Имея дело со сложными системами, теория риска не стремится проконтролировать все возможные аварии, поскольку рассмотреть все варианты не возможно, но стремится предотвратить события, приводящие к тяжелым авариям. Если техника безопасности ставит своей целью не допустить никаких аварий, что отвечает концепции «абсолютной безопасности» техногенного объекта, то теория риска исходит из того, что ничто нельзя сделать абсолютно надежным. Необходимо знать вероятность аварии, прогноз ущерба от аварии. И если эти величины малы (мала величина аварийного риска), логично заявлять, что техногенный объект безопасен.

В разных задачах под риском понимаются то вероятность аварии, то масштаб возможного ущерба от нее, либо вообще комбинацию этих двух величин. Различаются и методы определения риска. Условно можно выделить:

- статистический: опирается на статистическую обработку данных об авариях;
- модельный: строятся модели воздействия вредных факторов на человека и окружающую среду, которые могут описывать как последствия обычной работы предприятия, так и ущерб от аварий на нем;
- экспертный: вероятности аварий, связи между ними и последствия определяются не вычислениями, а опросом опытных экспертов;
- социологический: уровень опасности определяется по результатам социологических опросов больших групп людей.

Обычно в практике научного прогнозирования под риском понимается величина, в которую входят и вероятности аварий, и ущербы от этих аварий. При определении риска используются одновременно несколько методов.

Концепция «приемлемого уровня риска» (концепция «предельного уровня риска») утверждает, что «право на существование» имеют техногенные объекты, для которых величина риска не превышает некоторого предельного значения. Отсюда следует общий подход к оценке уровня опасности, порождаемой объектом. Этот подход включает прогнозирование вероятностей и ущербов от аварий, расчет оценок риска и сопоставление с некоторыми критическими значениями. Подход, основанный на концепции «приемлемого уровня риска», первоначально разрабатывался применительно к объектам атомной энергетики [4]. Первое систематическое исследование по оценкам риска было организовано Комиссией по атомной энергии США и завершилось в 1977 году выпуском отчета «Анализ безопасности реактора», в котором проф. Н. Расмуссен и руководимая им группа исследователей с многомиллионным бюджетом предложила методологию и представила результаты прогнозирования оценок риска объектов атомной энергетики. Очень быстро исследования «по Расмуссену» стали стандартной процедурой, проводимой на всем жизненном цикле техногенного объекта, начиная с этапа проектирования до конца существования. И на всем жизненном цикле техногенного объекта контролю подлежат оценки риска.

К настоящему времени концепция предельного уровня риска во многих странах Западной Европы и в США получила не только общественное признание, но и законодательное оформление. Решение о том, какой уровень риска считать приемлемым, носит политический характер и во многом определяется экономическими возможностями страны.

В Западных странах рассматриваются как приемлемые значения индивидуального риска в интервале 10^{-8} до 10^{-4} в год [5]. Индивидуальный риск выше 10^{-4} в год повсеместно признается неприемлемым. Большинство западных авторов останавливаются на величине критического уровня риска 10^{-6} в год [5, 6]. При этом руководствуются величиной фоновых рисков¹ — 10^{-3} по данным статистики [7]. Т. к. общий риск является суммой фоновых и аварийного индивидуального рисков, последний предлагается принять равным $1/1000$ от фоновых, или 10^{-6} , тогда им можно будет пренебречь при сложении.

Необходимо отметить, что общепризнанных критических значений индивидуального риска для тех или иных производственных объектов нет. Выбор конкретного значения в рекомендуемом разными учеными интервале — от 10^{-8} до $5 \cdot 10^{-5}$ [5, 7, 8] — зависит от особенностей производственного объекта, уровня аварийности, уровня экономического развития.

В Голландии правительство законодательно установило величину максимально приемлемого уровня индивидуального риска — 10^{-6} в год [9]. Т. е. вероятность гибели человека в течение года не должна превышать одного шанса из миллиона. Индивидуальный риск 10^{-8} в год считается пренебрежимо малым.

Средний уровень индивидуального риска для населения России на два порядка превышает допустимый уровень, принятый в развитых странах мира [3]. Реальный путь его снижения — анализ и управление риском чрезвычайных ситуаций. Анализ риска предполагает процедуру нахождения величины риска от данного промышленного объекта, сравнение ее с критическим значением и, в случае превышения, переход к разработке мероприятий по снижению уровня риска. Этот подход становится основой противодействия авариям и катастрофам в России: постановлением Правительства Российской Федерации от 29 сентября 1999 года утверждена программа «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2005 года». Программа предполагает обобщение и развитие теоретических и практических основ анализа и управления комплексным риском от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Предлагаемая читателю книга — маленький шаг на большом пути обеспечения безопасности жизнедеятельности человека и защиты окружающей природной среды. Хотя исследования и ограничены прогнозом уровня опасности, связанной с химическими авариями на выделенных авторами техногенных объектах, приемы и методы прогнозирования, представленные в книге, применимы к оценке последствий любых аварий и катастроф природного и техногенного характера, применимы при управлении величиной аварийного риска.

¹Фоновым риском называют относительное число смертельных случаев в год от неестественных причин (автомобильные катастрофы, удар молнии, электротравма и т. п.)

Часть 1

Теория аварийного риска

Оценки риска как характеристики уровня опасности

1.1. Опасность, порождаемая техногенным объектом

Понятие «опасность, порождаемая объектом», имеет несколько аспектов. Первый аспект связан с количественной характеристикой уровня опасности. Бесспорно, что всякий промышленно значимый объект представляет определенную опасность для жизнедеятельности человека, для окружающей природной среды. Вопрос заключается в том, насколько велика опасность, связанная с объектом. С точки зрения уровня порождаемой опасности промышленные объекты отличаются друг от друга количественными показателями. Если количественные показатели уровня опасности не достигают критических значений, то уровень опасности считается приемлемым.

Таким образом, обсуждая уровень опасности, порождаемый объектом, в первую очередь необходимо определить характеристики, которыми можно численно описать этот уровень. Причем эти характеристики должны быть применимы к различным объектам. Во-вторых, необходимо принять критерии безопасности: указать численные значения этих характеристик, при которых объекты считаются безопасными для жизнедеятельности человека, для окружающей природной среды.

Общепринятыми характеристиками уровня опасности в мире являются оценки риска. Они позволяют провести количественный анализ уровня опасности относительно конкретных реципиентов риска [2]. Анализ оценок риска позволяет дифференцировать техногенные объекты по угрозе, которую они представляют для человека и для окружающей природной среды, и даёт возможность провести дифференциацию территорий по уровню потенциальной опасности. В терминах оценок риска выражаются критерии безопасности.

Второй аспект понятия «опасность, порождаемая объектом» связан с восприятием опасности реципиентом риска. Человек как реципиент риска воспринимает уровень опасности, «навязанный» ему обстоятельствами, иначе, чем уровень опасности, принимаемый им добровольно. Так, человек согласен мириться с высоким уровнем опасности, связанным, например, с поездкой в автомобиле по оживленной магистрали, но не согласен мириться со значительно меньшим уровнем опасности, связанным с близлежащим промышленным объектом. Далее, можно ожидать, что рабочие и служащие, работающие на промышленном объекте и получающие зарплату, будут согласны мириться с его достаточно высокой степенью опасности в отличие от населения, проживающего в районе этого промышленного объекта. Следовательно, полагаться на оценки, основанные на восприятии опасности тем или иным человеком нельзя. Но необходимо учитывать, что уровень опасности от

промышленного объекта всегда будет восприниматься населением «острее», чем уровень опасности, добровольно принимаемый человеком (даже, если первый менее значителен).

В данной работе мы ограничимся рассмотрением только первого аспекта понятия «опасность, порождаемая объектом».

Разнообразию проявления опасности соответствует разнообразие оценок риска, что нашло отражение в классификации оценок. В зависимости от режима функционирования исследуемого промышленного объекта выделяют оценки риска, связанные со штатным режимом функционирования объекта, и оценки риска, характеризующие последствия аварии на объекте. Последние называются оценками аварийного риска. Эти два вида риска иногда называют реальным и потенциальным риском соответственно.

Выделение оценок аварийного риска в отдельную категорию, в общем случае, носит условный характер и отражает количественную сторону. Обычно уровень аварийной опасности существенно выше уровня опасности от объекта, функционирующего в штатном режиме, когда ожидаемые воздействия на состояние здоровья человека, на состояние окружающей природной среды незначительны. В этой связи, оценки аварийного риска, как правило, характеризуют верхнюю границу уровня опасности, порождаемой промышленным объектом.

Оценки риска могут быть классифицированы по признаку: кто или что воспринимает опасность, то есть является реципиентом риска. Так можно выделить оценки риска относительно состояния здоровья человека, оценки риска относительно состояния окружающей природной среды. В частности, для объектов с наличием боевых отравляющих веществ, где источником потенциальной опасности, в первую очередь, являются высокотоксичные для живых организмов вещества, в качестве реципиента риска обычно выступает человек.

И, наконец, последний из основных признаков, по которым классифицируются оценки риска — мера ущерба. Если речь идет о последствиях аварии относительно человека, то мера ущерба — это единица измерения последствий относительно состояния здоровья человека.

В каких случаях возникает необходимость в анализе уровня аварийной опасности, в управлении уровнем опасности? Можно выделить следующие основные области приложения теории аварийного риска:

- поддержка принятия решений по выбору принципиальных схем и основных технологических приемов на техногенном объекте, обеспечивающих приемлемый уровень безопасности жизнедеятельности человека и безопасности окружающей природной среды;
- поддержка принятия решений по размещению техногенных объектов;
- разработка планов обеспечения безопасности жизнедеятельности человека и защиты окружающей природной среды в случае возникновения чрезвычайных ситуаций, обусловленных антропогенными катастрофами.

1.2. Модель прогноза аварийного риска

Количественной характеристикой риска является функция от частоты аварий и ожидаемого ущерба [10]. Обычно аварийный риск исчисляется в единицах ущерба, отнесенных ко времени. Определяющее соотношение для прогнозирования оценок аварийного риска может быть представлено в виде:

$$\begin{bmatrix} \text{Оценка} \\ \text{аварийного} \\ \text{риска} \end{bmatrix} = \sum_z \begin{bmatrix} \text{Частота } z\text{-го} \\ \text{аварийного} \\ \text{процесса} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \text{Ущерб (потери)} \\ \text{при } z\text{-ом} \\ \text{аварийном} \\ \text{процессе} \end{bmatrix} \quad (1.2.1)$$

Суммирование в (1.2.1) производится по всей совокупности аварийных процессов, которые могут иметь место на объекте.

Из приведенного соотношения следует, что прогноз уровня аварийной опасности связан с частотным анализом возможных аварийных процессов и с прогнозом ущерба при аварии [2, 11–13].

Точечный источник опасности. Введем обозначения: P_z — прогнозируемая частота z -ого аварийного процесса, U_k^z — прогнозируемый ущерб от аварии. В принятых обозначениях выражение для оценки аварийного риска R , характеризующего уровень опасности в некоторой точке (r, φ) , может быть представлено в виде:

$$R(r, \varphi) = \sum_z P_z \cdot W^z(r, \varphi), \quad (1.2.2)$$

где оценка условного аварийного риска $W^z(r, \varphi)$, связанная с z -ой аварией, определяется как

$$W^z(r, \varphi) = \sum_k v_k \cdot U_k^z(r, \varphi). \quad (1.2.3)$$

Введена полярная система координат (r, φ) с началом в точке источника опасности.

Оценка условного аварийного риска характеризует прогнозируемые последствия конкретной аварии. Для многих аварийных сценариев и объектов, в частности для объектов с наличием высокотоксичных веществ, где главным поражающим воздействием является токсическое воздействие, прогнозируемые последствия аварии и, соответственно, величина ущерба U_k^z зависят от климатических условий (температуры воздуха, скорости ветра, направления ветра и т. д.). Поэтому в выражение для оценки условного аварийного риска входит частота (вероятность) проявления k -го набора климатических характеристик окружающей среды — v_k .

Оценка условного аварийного риска W^z является характеристикой уровня опасности, порождаемой техногенным объектом, при условии, что аварийная ситуация развивалась по определенному сценарию. В зависимости от вида аварийного воздействия и способа его передачи строятся конкретные выражения для оценок условного аварийного риска.

Конкретизируем вид аварийного воздействия и элемент абиотической среды, через которую воздействие передается человеку. В частном случае токсического воздействия на человека через атмосферный воздух при реализации конкретного

сценария аварийной ситуации, выражение (1.2.3) имеет вид [14] —

$$W^z(r, \varphi) = \int_0^{2\pi} d\alpha \cdot \int_0^{u_{max}} du \cdot \int_{T_{min}}^{T_{max}} \mu(\alpha) \cdot \lambda(u) \times \\ \times \sum_i p(u \in \delta u | d_i) \cdot \chi(T) \cdot U(r, \varphi, d_i, \alpha, u, T) dT, \quad (1.2.4)$$

где $\mu(\alpha)$ — плотность распределения вероятностей направлений ветра, определяемых величиной значения угла α , $\lambda(u)$ — плотность распределения вероятностей значений скорости ветра u , $p(u \in \delta u | d_i)$ — вероятность того, что при скорости ветра $u \in \delta u$ состояние устойчивости атмосферы относится к классу устойчивости d_i , $\chi(T)$ — плотность распределения вероятностей значений температуры атмосферного воздуха, $U(r, \varphi, d_i, \alpha, u, T)$ — функция, характеризующая ущерб при реализации конкретного аварийного сценария.

Функция ущерба $U(r, \varphi, d_i, \alpha, u, T)$ выражает частоту поражения реципиента риска в точке (r, φ) при конкретных значениях климатических характеристик. Оценка условного риска характеризует последствия конкретной аварии и, как следует из выражения (1.2.4), не может превышать по величине единицы.

Если учесть, что обычно $R(r, \varphi) \leq 1$, то оценке локального аварийного риска (то есть риска, отнесенного к некоторой точке) можно придать ясный смысл. Оценка локального аварийного риска отвечает прогнозируемой доле пораженных реципиентов риска в точке (r, φ) за определенный временной интервал. В качестве временного интервала обычно выбирается один год. При этом все частоты, входящие в оценку, также должны относиться к одному году.

Предполагается, что реципиент риска находится в выделенной точке 24 часа в сутки в течение всего временного интервала (в течение года) без средств защиты. То есть оценка локального риска — характеристика точки местности в отношении уровня опасности, связанной с техногенным объектом.

Отметим, что ограничение $R(r, \varphi) \leq 1$ не следует из математического выражения для оценки аварийного риска, хотя ограничение обычно выполняется. Если из расчетов следует, что $R(r, \varphi) > 1$, и расчеты выполняются относительно летального поражения, то исходя из смысла, заложенного в составляющие оценки, следует положить, что $R(r, \varphi) = 1$. Данное положение соответствует образному утверждению, что нельзя умереть дважды. Действительно, если для реципиента риска реакция на аварийное воздействие уже выразилась в летальном исходе, то продолжение воздействия не может привести для него к каким-либо последствиям.

Поле оценок локального аварийного риска, связанного с техногенным объектом, может быть представлено на карте местности [12, 15] в виде изолиний, отвечающих различным уровням равного риска R^* .

Области выделяются условием $R(r, \varphi) > R^*$. Если вводится в рассмотрение несколько уровней риска, то обеспечивается дифференциация прогнозируемой области поражения по уровню потенциальной опасности. На рис. 1.1 области выделены изолиниями R^* . Характеристики области (площадь, линейные размеры) определяются в соответствии с картой района размещения объекта.

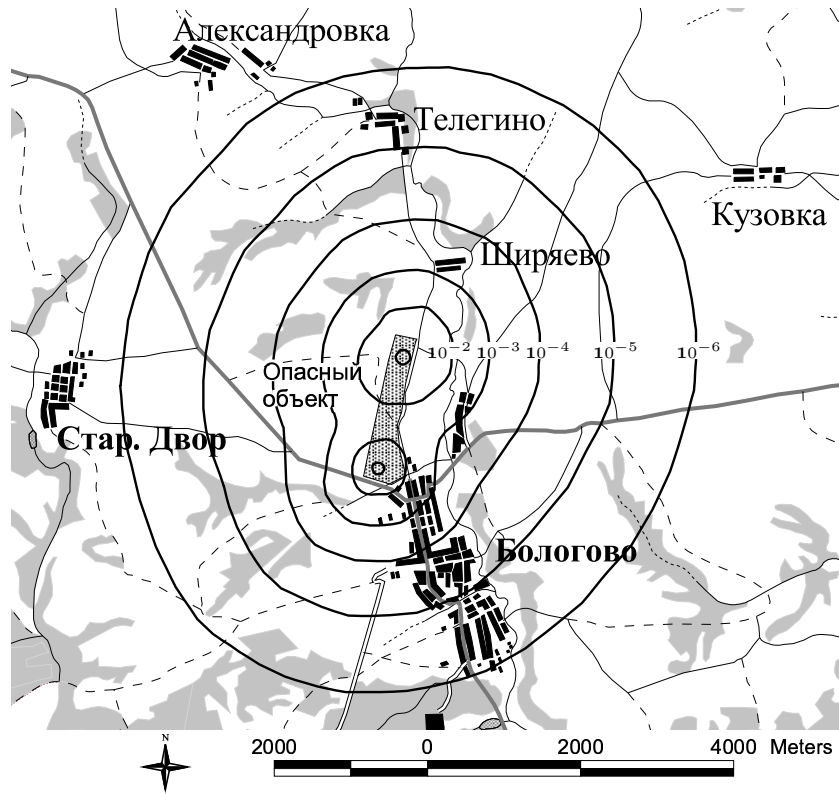


Рис. 1.1. Представление локального риска на карте местности

Линейный размер области характеризуется эффективным радиусом $R^{\text{эф}}$:

$$R^{\text{эф}} = \sqrt{S/\pi}, \quad (1.2.5)$$

где S — площадь зоны.

Оценка условного аварийного группового риска в точке $(r, \varphi) \in \Omega$

$$W_g^z(r, \varphi) = \psi(r, \varphi) \cdot W^z(r, \varphi), \quad (1.2.6)$$

где $\psi(r, \varphi)$ — плотность распределения реципиентов риска в зоне поражения Ω , $(r, \varphi) \in \Omega$.

Плотность распределения реципиентов риска по зоне Ω отвечает условию нормировки

$$M = \int_{\Omega} \psi(r, \varphi) d\Omega. \quad (1.2.7)$$

В этом выражении M — общая численность реципиентов риска в области Ω . Оценка группового (популяционного) риска характеризует уровень потенциальной опасности с учетом количества реципиентов риска, отнесенных к точке. По смыслу

оценка соответствует количеству пораженных реципиентов риска в результате z -ой аварии в точке (r, φ) за временной интервал один год.

Уровень аварийной опасности, связанный с конкретной аварией и отнесенный к некоторой территории, характеризуется интегральной оценкой условного аварийного риска $W_L^z(\Omega)$ и интегральной оценкой условного аварийного группового риска $W_G^z(\Omega)$:

$$W_L^z(\Omega) = \int_{\Omega} W^z(r, \varphi) d\Omega, \quad (1.2.8)$$

$$W_G^z(\Omega) = \int_{\Omega} W_g^z(r, \varphi) d\Omega. \quad (1.2.9)$$

В частном случае область интегрирования $(r, \varphi) \in \Omega$ может включать всю область поражения.

Интегральная оценка условного аварийного риска $W_L^z(\Omega)$ характеризует прогнозируемые последствия конкретной аварии на территории Ω . Ее значение не зависит от распределения реципиентов риска по области поражения Ω , а определяется имманентными характеристиками объекта и аварии. Интегральная оценка условного аварийного риска $W_L^z(\Omega)$ может трактоваться как площадь зоны «достоверного» поражения реципиента риска, то есть зоны, где вероятность поражения реципиента риска близка к единице.

Интегральная оценка условного аварийного группового риска соответствует прогнозируемому числу пораженных реципиентов риска при конкретной аварии на территории Ω , выделенной по определенному признаку. Например, интегральной оценкой условного аварийного группового риска можно характеризовать уровень потенциальной опасности от конкретной аварии в пределах населенного пункта. Эту величину можно интерпретировать как прогнозируемое число жертв в пределах выделенной территории Ω при конкретной аварии на объекте. Причем число жертв усредняется по временному интервалу.

При анализе уровня потенциальной опасности возможно использование нормированных значений оценок риска. В частности, для интегральных оценок условного аварийного риска (1.2.8) и (1.2.9) нормированные оценки:

$$\langle W_L^z \rangle = \frac{1}{\Omega} \cdot \int_{\Omega} W^z(r, \varphi) d\Omega, \quad (1.2.10)$$

$$\langle W_G^z \rangle = \frac{1}{M(\Omega)} \cdot \int_{\Omega} W_g^z(r, \varphi) d\Omega, \quad (1.2.11)$$

где

$$M(\Omega) = \int_{\Omega} \psi(r, \varphi) d\Omega \quad (1.2.12)$$

— количество реципиентов риска в области Ω .

Соотношение (1.2.10) определяет долю территории Ω «достоверного» поражения реципиентов риска. Нормированное значение интегральной оценки условного аварийного группового риска $\langle W_G^z \rangle$ определяет долю реципиентов риска, пораженных в пределах территориального образования Ω .

В соответствии с соотношением (1.2.2), оценка локального аварийного группового риска

$$R_g(r, \varphi) = \sum_z P_z \cdot W_g^z(r, \varphi). \quad (1.2.13)$$

Интегральная оценка аварийного риска

$$R_L = \sum_z P_z \cdot W_L^z. \quad (1.2.14)$$

Интегральная оценка аварийного группового риска

$$R_G = \sum_z P_z \cdot W_G^z. \quad (1.2.15)$$

Важной характеристикой уровня опасности, порождаемой объектом относительно человека, является максимальное количество летальных исходов. Характеристика может относиться к определенной аварии N_{let}^z и, в целом, к объекту N_{let} :

$$N_{\text{let}}^z = \max_{i, \alpha, u, T} \int_{\Omega} \psi(r, \varphi) \cdot U(r, \varphi, d_i, \alpha, u, T) d\Omega, \quad (1.2.16)$$

$$N_{\text{let}} = \max_z N_{\text{let}}^z. \quad (1.2.17)$$

В выражении (1.2.16): $\psi(r, \varphi)$ — плотность распределения людей по области Ω . Функция ущерба при химических авариях $U(r, \varphi, d_i, \alpha, u, T)$ обычно зависит от значений климатических параметров.

Климатические параметры отвечают максимальному поражающему эффекту. В частности, если под областью Ω понимается территория населенного пункта, то направление вектора скорости ветра соответствует направлению от объекта к населенному пункту. Остальные климатические параметры находятся из условия максимального поражающего эффекта (максимального числа пораженных реципиентов риска) в области Ω .

Последствия аварийных воздействий на реципиентов риска в пределах определенной территории могут быть описаны функциональной зависимостью прогнозируемой частоты от величины потерь при аварии. Дискретный аналог этой зависимости, известный под названием «F-N»-кривой (Frequency - Number), широко используется при анализе. F-N-кривая представляет собой график зависимости накопленной (кумулятивной) частоты от последствий аварий, выражаемых обычно в виде числа летальных исходов (рис. 1.2).

Если реципиент риска находится в зоне влияния нескольких источников опасности (техногенных объектов), разнесенных на плоскости, то оценки риска для него учитывают вклад каждого источника (объекта):

$$R(r, \varphi) = \sum_{p=1}^N \cdot \sum_{z_p} P_{z_p} \cdot W^{z_p}(r, \varphi), \quad (1.2.18)$$

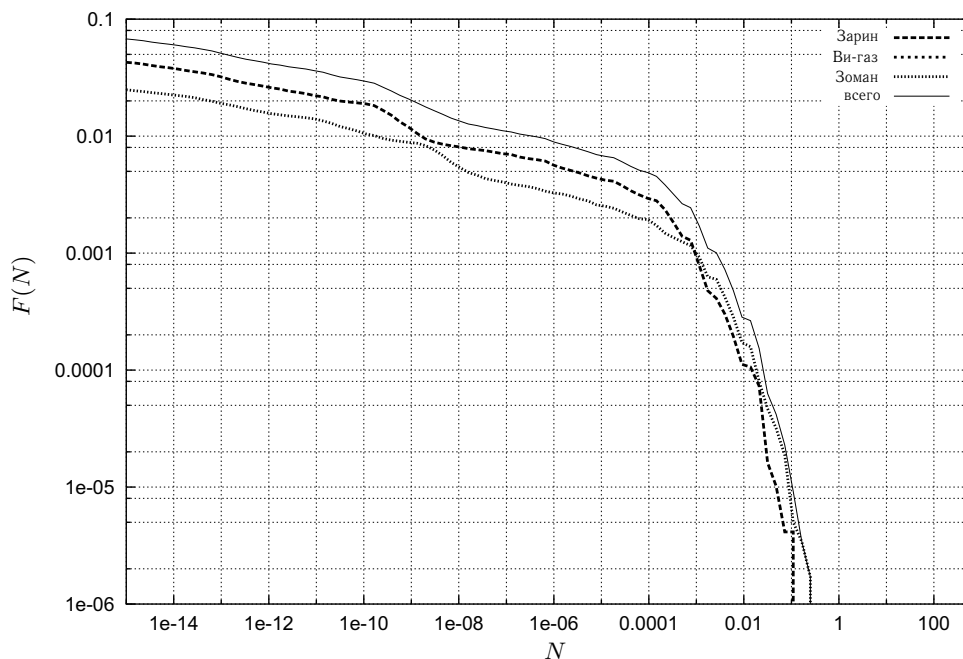


Рис. 1.2. Пример F-N-кривой для аварии с проливом боевых отравляющих веществ

где оценка условного аварийного риска $W^{z_p}(r, \varphi)$, характеризующая последствия z_p -ой аварии на p -ом объекте, учитывает расположение p -ого источника относительно реципиента риска. В частном случае токсического воздействия для оценки $W^{z_p}(r, \varphi)$ по аналогии с выражением (1.2.4) имеем:

$$W^{z_p}(r, \varphi) = \int_0^{2\pi} d\alpha \cdot \int_0^{u_{\max}} du \cdot \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \mu(\alpha) \cdot \lambda(u) \times \\ \times \sum_i p(u \in \delta u | d_i) \cdot \chi(T) \cdot U(r, \varphi, r_p, \varphi_p, d_i, \alpha, u, T) dT. \quad (1.2.19)$$

Расположение p -ого источника опасности характеризуется пространственными координатами (r_p, φ_p) . Предполагается, что климатические характеристики для всех источников совпадают.

Пространственный источник опасности. Обобщая выражения (1.2.2) и (1.2.18) для случая источника опасности, распределенного в пространстве, имеем:

$$R(r, \varphi) = \sum_z P_z \int_{\omega} \mu_z(\xi) \cdot W^z(r, \varphi, \xi) d\xi, \quad (1.2.20)$$

где ξ — положение источника, $\mu_z(\xi)$ — плотность распределения вероятности проявления z -ого аварийного сценария в области ω , отвечающая условию нормировки

$$\int_{\omega} \mu_z(\xi) d\xi = 1. \quad (1.2.21)$$

В частном случае, выражение (1.2.20) характеризует последствия аварий на площадных и линейных источниках опасности. Одним из примеров пространственного источника могут служить дороги, по которым транспортируются опасные вещества.

В заключение отметим, что представленные оценки риска характеризуют верхнюю границу уровня опасности, в том смысле, что они построены в предположении отсутствия каких-либо действий, направленных на ослабление последствий аварий.

Временной интервал прогнозирования последствий химических аварий в рамках данной работы ограничен временным интервалом токсического воздействия на потенциальных реципиентов риска. В частности, если при химической аварии организуется эвакуация населения, то прогноз последствий аварий ограничен временным интервалом с момента аварии до момента эвакуации.

1.3. Характеристики ущерба при аварии

Количественная оценка уровня опасности представляется относительно конкретного реципиента риска и относительно конкретной меры ущерба. В качестве реципиента риска выступают представители животного мира или биотическая среда в целом. В определенных случаях в качестве реципиента риска выступают элементы абиотической среды. При прогнозе последствий антропогенных катастроф в качестве реципиента риска обычно выступает или человек вообще, или группы людей, выделенные по тем или иным признакам. Если в качестве реципиента риска выступает человек, то ущерб характеризует реакцию человека на внешнее воздействие. В дальнейшем изложении ограничимся анализом ущерба относительно человека.

Мера ущерба отражает изменение состояния здоровья человека в результате аварийного воздействия. Выбор меры ущерба, определяемый в первую очередь требованиями, предъявляемыми к прогнозированию, зависит от типа воздействия (токсическое, тепловое, механическое и т. д.) на реципиента риска при аварии или катастрофе. В качестве меры ущерба может быть принят, например, определенный уровень поражения глаз, уровень заболеваемости раком легких, уровень потери трудоспособности среди выделенных групп населения и т. д. Часто в качестве меры ущерба выбирается летальный исход. Мы не рассматриваем этическую сторону выбора меры ущерба. В практике прогнозирования выбор меры ущерба ограничен имеющимся статистическим материалом по связи между уровнем воздействия и реакцией реципиента риска на воздействие.

В данном разделе работы, не претендующем на полноту освещения материала, приводятся некоторые характеристики ущерба, которые используются при прогнозировании последствий химических аварий.

*Токсическое воздействие*¹. Экспериментально установлено, что зависимость между дозой вещества, полученной организмом, и реакцией организма («эффектом») выражается S-образной кривой [16].

Обычно S-образная зависимость трансформируется в линейную. При этом вероятность наступления «эффекта» определяется пробит-функцией, имеющей вид:

$$Pr(D) = a_1 + a_2 \ln D, \quad (1.3.1)$$

где Pr — вероятностная единица (пробит), a_1, a_2 — эмпирические коэффициенты, зависящие от вида воздействия и свойств вещества.

Для нахождения вероятности «эффекта» можно воспользоваться стандартными пробит-таблицами [16] или уравнением

$$U(D) = \Phi(Pr - 5), \quad (1.3.2)$$

где D — эффективная доза, воздействующая на организм, $\Phi(z)$ — нормальная функция распределения:

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du = \frac{1 + erf(z/\sqrt{2})}{2}. \quad (1.3.3)$$

В случае ингаляционного воздействия при постоянной концентрации токсичного вещества $D = c^n \cdot t_0$, где t_0 — время экспозиции (мин), c — концентрация, которая обычно выражается либо в мг/м³, либо в единицах ppm.

Соотношение между концентрациями в газовой фазе, выраженных в мг/м³ и в единицах ppm, определяется формулами [17]:

$$c_{ppm} = \frac{c_{mg}}{\alpha}, \quad \alpha = \frac{\mu \cdot p}{62,36 \cdot T}, \quad (1.3.4)$$

где c_{ppm} — концентрация вещества, выраженная в единицах ppm, c_{mg} — концентрация вещества, выраженная в мг/м³, μ — молекулярный вес, p — атмосферное давление в мм рт. ст, T — температура в К.

В табл. 1.1 представлены значения коэффициентов пробит-функции (1.3.1) и коэффициент α для некоторых веществ (реципиент риска — человек, «эффект» — летальный исход). Использовано обозначение $[c]$ для размерности концентрации вещества в пробит-уравнении.

В работе [22] для нахождения вероятности поражения человека предлагается использовать следующее уравнение:

$$U(D) = \frac{1}{2} \left(1 + erf \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2}} \cdot \ln \frac{D}{LC_{\tau 50}} \right) \right), \quad (1.3.5)$$

где $U(D)$ — вероятность поражения человека от полученной токсической дозы, σ — дисперсия закона токсичности (значения σ для некоторых веществ представлены в табл. 1.2).

¹В написании параграфа принимала участие Пустошинцева И. Ю.

Таблица 1.1. Коэффициенты пробит-функций [18–20] и коэффициент преобразования размерности концентрации α [21] для некоторых веществ.

Вещество	[с]	a_1	a_2	n	α
Окись углерода	ppm	-37,98	3,7	1	1,15
Хлор	ppm	-8,29	0,92	2	2,90
Хлористый водород	ppm	-16,85	2	1	1,49
Цианистый водород	ppm	-29,42	3,008	1,43	1,10
Фосген	ppm	-19,27	3,9	1	4,05
Люизит	мг/м ³	-3,29	1	1,25	—
Ви-газ	мг/м ³	-4,163	3,168	1	—
Зарин	мг/м ³	-6,850	3,168	1	—

Величина токсической дозы D отвечает интегралу

$$D(x, y, z) = \int_0^{t_0} c^n(x, y, z, t) dt, \quad (1.3.6)$$

где t_0 — время экспозиции. Отметим, что в некоторых случаях делается различие между токсической дозой (выражение (1.3.6) при $n = 1$) и токсической нагрузкой (выражение (1.3.6) при $n \neq 1$).

В работе [12] для нахождения вероятности поражения человека $U(D)$ использовано следующее соотношение:

$$U(D) = 1/[1 + (LC_{\tau 50}/D)^\beta], \quad (1.3.7)$$

где $\beta = 1,677/\ln S$, S — функция токсичности, $\ln S = \sigma$, $D = c^n \cdot t_0$. Для фосфорорганических отравляющих веществ показатель степени n принимался равным 1. Функция токсичности S характеризует устойчивость организма к токсическому воздействию и определяется выражением [16]

$$S = 0,5(LD_{84}/LD_{50} + LD_{50}/LD_{16}), \quad (1.3.8)$$

Таблица 1.2. Характеристики токсических свойств некоторых химически опасных веществ [22–26].

Вещество	PC _{τ50} , мг·мин/м ³	LC _{τ50} , мг·мин/м ³	σ	ПДК, мг/м ³
Окись углерода	$1,0 \cdot 10^4$	$3,8 \cdot 10^4$	0,08	20
Хлор	$0,6 \cdot 10^3$	$6,0 \cdot 10^3$	0,27	1
Хлористый водород	$2,0 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^4$	0,08	5
Цианистый водород	$2,0 \cdot 10^2$	$6,0 \cdot 10^3$	0,08	0,1
Фосген	$5,5 \cdot 10^2$	$3,2 \cdot 10^3$	0,08	0,4
Люизит	$0,3 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^3$	—	$2 \cdot 10^{-4}$
Ви-газ	0,1	10	0,336	$5 \cdot 10^{-6}$
Зарин	2,5	75	0,336	$2 \cdot 10^{-5}$

Таблица 1.3. Значения функции ущерба при токсическом воздействии паров зарина.

Доза, мг·мин/м ³	Рассчитанные значения функции ущерба		
	Формула (1.3.7)	Формула (1.3.5)	Формула (1.3.2)
25	0,004	0,001	0,000
50	0,116	0,114	0,099
75	0,500	0,500	0,500
100	0,808	0,804	0,819
125	0,928	0,935	0,947

где LD_{84} , LD_{16} — средние дозы, вызывающие летальный эффект у 84% и 16% испытуемых в группе соответственно. Для фосфорорганических отравляющих веществ значения функции S лежат в пределах от 1,1 до 4,4.

Для примера, в табл. 1.3 представлены рассчитанные значения функции ущерба при токсическом воздействии паров зарина, отвечающие трем различным методам определения. Как следует из данных таблицы, различия в численных значениях функции ущерба для выбранного вещества находятся в пределах погрешности расчетов.

Термическое воздействие. Величина ущерба при термическом воздействии дается выражениями [18, 19]

$$U(I, t) = \Phi(Pr), \quad Pr = -14,9 + 2,56 \cdot \ln(I^{4/3} t \cdot 10^{-4}), \quad (1.3.9)$$

где I характеризует действующий на человека тепловой поток (Дж/м²с), t — длительность воздействия (с).

Барическое воздействие взрыва. Модель ущерба при взрыве $U(\Delta p) = \Phi(Pr)$, отвечающая вероятности поражения человека (летальный исход) при воздействии избыточного давления на фронте ударной волны Δp , выражается через пробит-функции [18, 19]:

$$Pr = -77,1 + 6,91 \ln \Delta p \quad (1.3.10)$$

или

$$Pr = -2,44 \cdot \ln(7380/\Delta p + 1,9 \cdot 10^9/(I \cdot \Delta p)), \quad (1.3.11)$$

где Δp — избыточное давление (Па), I — импульс (Н/м²с).

1.4. Прогнозирование частотных характеристик аварийных процессов

Прогнозирование частотных характеристик аварийных процессов — важный этап анализа аварийного риска. Методические аспекты и общее описание этого этапа широко представлено в литературе [4, 10]. Поэтому в данном разделе² этот этап будет освещен весьма схематично: лишь в той мере, в какой необходимо для целей данной работы.

²В написании раздела принимала участие Чиркова Л.С.

Согласно соотношению для оценки аварийного риска (1.2.1), одним из факторов, определяющим уровень аварийной опасности от техногенного объекта, является частота возникновения на объекте аварийной ситуации P_z , влекущей за собой определенный ущерб. Прогнозируемое значение частоты P_z определяется:

- частотой (вероятностью) события, инициирующего аварийный процесс;
- частотой (вероятностью) развития аварийного процесса по определенному сценарию, зависящему от имманентных свойств объекта;
- частотой (вероятностью) того, что внешние по отношению к объекту условия (например, характеристики погодных условий) во временном интервале, отвечающем аварийному процессу, будут характеризоваться определенным набором численных характеристик.

В общем случае, все указанные частоты (вероятности) прогнозируются независимо. При оценке частот (вероятностей) случайных процессов и событий могут быть использованы различные подходы. Например, оценки по ретроспективным данным, оценки с помощью марковских моделей, оценки с помощью деревьев отказов и деревьев событий и т. д.

Дерева событий, отвечающие аварийному сценарию, обычно строятся в три этапа. На первом этапе составляется список инициирующих аварийю событий. Для построения списка используется документация по конструкции объекта, по технологии производства и т. д. На втором этапе выявляются аварийные события, которые могут нанести существенный ущерб. На третьем этапе устанавливаются связи между инициирующими событиями и аварийными событиями, приводящими к ущербу. Листьями дерева обычно являются инициирующие события, а корнем — аварийное событие. Каждое событие, отраженное в дереве событий, может включать события более низкого уровня. Например, если в качестве события рассматривается отказ оборудования, то в качестве событий более низкого уровня выступают события отказа элементов оборудования. Отметим, что при прогнозировании последствий аварий невозможно охватить все последовательности, которые теоретически могут привести к ущербу. В этой связи важен предварительный анализ, который позволяет выделить те последовательности событий, которые вносят значимый вклад в последствия аварий.

Все события, входящие в дерево событий, характеризуются определенными вероятностями. Если известны вероятности всех событий, входящих в дерево, то переход к вероятности аварийного сценария осуществляется по правилам расчета вероятности сложного события. Таким образом, дерево событий с соответствующими вероятностями описывает наиболее значимые аварийные сценарии с учетом особенностей технологии, оборудования, конструкции объекта.

Наиболее ответственной задачей частотного анализа является определение вероятностей событий, входящих в дерево событий. Для этой цели обычно используются соответствующие статистические данные и эмпирические функции распределений, построенные по статистическим данным.

В случае, если статистической информации для оценки вероятностей недостаточно, используются экспертные оценки. Иногда использование экспертных оценок — единственная возможность оценки частот и, соответственно, вероятностей.

Особенно это относится к случаям, когда прогнозируются последствия аварий и катастроф на уникальных объектах, где используются нестандартные технологии, высокотоксичные и взрывчатые вещества, на объектах, относительно которых отсутствует статистическая информация об авариях. Недостаток статистической информации заменяется знаниями и интуицией эксперта. Интуицией, основанной на знаниях о физических и химических процессах, протекающих при возникновении предпосылок и развитии аварийных ситуаций на объекте.

Вероятности событий, рассчитанные на основе информации, накопленной за определенный интервал времени в прошлом, могут быть экстраполированы на будущее с использованием закона распределения во времени случайных величин. Вид закона распределения определяется многими факторами. Действительно, события, входящие в аварийный сценарий, могут иметь различную природу: события, связанные с работой технических устройств, события, связанные с природными катаклизмами, события, связанные с «человеческим фактором». Событиям различной природы будут отвечать различные законы распределения частот. Соответственно и распределения вероятностей событий будут описываться различными функциями распределений.

Случайная величина ξ_i , функция распределения которой отвечает вероятности появления z -го аварийного сценария, имеет составное распределение:

$$\xi_i = \zeta_i + \gamma_i + \eta_i, \quad (1.4.1)$$

где ζ_i — случайная величина, распределенная по показательному закону и отвечающая за вероятность аварии вследствие технических неполадок, γ_i — случайная величина, отвечающая за аварию вследствие природных катаклизмов, η_i — случайная величина, отвечающая за аварию, связанную с «человеческим фактором». Распределения двух последних случайных величин устанавливаются эмпирическим путем.

Если F — частота появления некоторого события в течение года, связанного с авариями вследствие технических неполадок, то для вероятности события ζ_i используется формула:

$$P_a(t) = 1 - e^{-F \cdot t}. \quad (1.4.2)$$

Здесь $P_a(t)$ — вероятность того, что за время t событие a произойдет хотя бы один раз. Обычно под F понимается частота отказов, которая совпадает с условной интенсивностью отказов для случая постоянной частоты.

В качестве первого приближения, распределения для случайных величин γ_i , η_i аппроксимируются равномерным распределением. Тогда соответствующие вероятности

$$P_a(t) = F \cdot t. \quad (1.4.3)$$

Отметим, что распределения случайных величин ζ_i , γ_i , η_i , в общем случае, так же имеют составной характер. Если известны распределения случайных величин, входящих в величины ζ_i , γ_i , η_i , то возможен более детальный анализ аварийных сценариев. При этом возможно выделение последствий аварий, связанных с конкретными причинами технического характера, с конкретными природными явлениями, с причинами, относящимися к «человеческому фактору».

Полученные в результате частотного анализа значения частот в дальнейшем используются для прогнозирования оценок аварийного риска.

1.5. Информационная поддержка прогнозирования

В процессе прогнозирования требуется разнообразная информация относительно источников опасности, относительно сред, передающих опасность, относительно реципиентов риска. Эта информация составляет информационную поддержку прогнозирования. Можно выделить три раздела информационной поддержки, которые обычно присутствуют при прогнозировании последствий антропогенных аварий и катастроф:

- геоинформационная система района размещения объекта;
- индивидуальные свойства опасных веществ;
- климатические характеристики.

Качественные и количественные требования к информационной поддержке определяются многими факторами. Но главный фактор — точность (достоверность) прогнозирования: чем выше точность, тем более высокие требования предъявляются к информационной поддержке.

Прогноз последствий антропогенных аварий и катастроф строится с учетом множества факторов, связанных с районом, где расположен объект. К этим факторам относятся, например, рельеф местности, уровень залегания грунтовых вод, состав почв, плотность населения, дифференцированная по возрастному, половому составу, склонность населения, проживающего в районе, к определенным видам заболеваний и т. д. Для хранения, организации доступа и представления разнообразной информации, имеющей «территориальную привязку», служит геоинформационная система (ГИС) [27, 28] района расположения объекта.

Часть информации геоинформационной системы используется при решении задач прогнозирования. В зависимости от вида прогноза, например, информация о рельефе местности в районе аварии может быть востребована для расчета распространения примеси в атмосфере, для прогнозирования зон затопления (в случае аварии на плотине водохранилища). Другая часть информации ГИС (например, расположение населенных пунктов относительно изучаемого объекта) используется на стадии анализа уровня опасности: величина ущерба при аварии зависит от взаимного расположения реципиентов риска и места аварии.

При детальном анализе учитывается, что восприятие аварийного воздействия реципиентом риска зависит от имманентных свойств самого реципиента риска. Например, вероятность летального исхода для человека при токсическом воздействии зависит от состояния здоровья человека. То есть при детальном анализе требуется уточнение исходной информации.

Результаты прогнозирования удобно представлять на цифровой карте района размещения объекта.

Пространственный масштаб задач прогнозирования предопределяет территориальный охват ГИС. В общем случае, территориальный охват ГИС при оценке последствий аварий должен определяться максимальным из пространственных

масштабов задач прогнозирования. Центр области должен отвечать расположению объекта, относительно которого выполняется прогноз последствий аварий.

Детальность представления информации в ГИС — определенный компромисс между желаемым и возможным. По крайней мере, детальность должна соответствовать требуемой точности решения задач прогнозирования и, соответственно, требуемой достоверности прогноза последствий аварий. Можно отметить, что в большинстве случаев наибольшую ошибку в прогнозирование вносят допущения, используемые в физико-математических моделях возникновения и распространения аварийных воздействий. Следовательно, выбор базового масштаба при создании тематических слоев должен быть согласован со степенью соответствия математических моделей реальным физическим процессам (степенью адекватности моделей). Кроме того, должны быть приняты во внимание и сроки выполнения работ.

Важный раздел информационной поддержки составляют индивидуальные свойства опасных веществ. Эти свойства используются при построении моделей возникновения и распространения аварийных воздействий. Численные значения, характеризующие свойства опасных веществ, используются при прогнозировании величин аварийных воздействий и при прогнозировании эффективности аварийных воздействий. Например, характеристики токсических свойств веществ используются в моделях поражения реципиентов риска при токсическом воздействии.

Роль климатических характеристик в информационной поддержке прогнозирования определяется соотношением (1.2.3). Действительно, для некоторых видов аварий величина аварийного воздействия, уровень поражения реципиентов риска зависят от климатических характеристик. Например, последствия химических аварий, при попадании токсичных веществ в атмосферу, обычно зависят от значений климатических параметров. При прогнозировании оценок риска используются средние частоты проявления климатических характеристик. Частоты усредняются на временных интервалах порядка нескольких десятков лет.

В общем случае, информационная поддержка прогнозирования не ограничивается тремя указанными разделами. Каждый прогноз имеет свои особенности, которые отражаются в информационной поддержке.

1.6. Прогнозирование уровня аварийной опасности

Что лежит в основе прогнозирования уровня аварийной опасности? Как и всякий прогноз, он может быть построен с использованием различных подходов. Например, по результатам обработки статистического материала по последствиям аварий и катастроф на промышленных объектах, на основе экспертных оценок и т. д. Однако, указанные подходы применимы, в основном, для прогнозирования последствий типовых аварийных ситуаций на типовых промышленных объектах.

Если же вопрос стоит о прогнозировании последствий антропогенных катастроф на объектах, которые не имеют аналогов, по которым отсутствует достоверная статистическая информация, то, возможно, единственным подходом к прогнозированию последствий является подход, основанный на результатах компьютерного

прогнозирования [13, 29]. Действительно, процесс возникновения и развития источника опасности при антропогенной аварии, процесс передачи аварийного воздействия реципиенту риска может быть описан в рамках той или иной физико-математической модели. Реакция реципиента риска на аварийное воздействие также может быть описана соответствующей математической моделью. Компьютерный эксперимент, построенный на основе моделей, позволяет прогнозировать характеристики источника опасности, динамику распространения аварийных воздействий, уровень воздействий на реципиентов риска и последствия воздействий для реципиентов риска.

Эффективность компьютерного прогнозирования наиболее значима при исследовании сложных, многофакторных задач, к которым относятся задачи прогноза последствий техногенных катастроф. Более того, учитывая, что в некоторых случаях (например, для объектов с наличием боевых отравляющих веществ) проведение крупномасштабных экспериментальных работ по определению последствий аварий затруднено, методы, основанные на компьютерном моделировании, являются определяющими при прогнозе последствий аварий [30].

Следует отметить, что существует несколько подходов к решению задач прогнозирования в рамках компьютерного моделирования. В данной работе прогноз строится, в основном, на основе численного анализа физико-математических моделей. Кроме того, при математическом описании процессов используются различные регрессионные модели, оценки. Точность (достоверность) прогноза определяется, в первую очередь, точностью физико-математического описания моделируемого процесса (адекватностью модели), а также точностью задания параметров физико-химических свойств веществ, участвующих в процессах. Однако, процесс возникновения и распространения аварийных воздействий в окружающей природной среде настолько сложен и многогранен, а глубина понимания физических, химических и, тем более, биологических аспектов этой проблемы так недостаточна, что построить точные модели и, соответственно, выполнить точный прогноз последствий аварий не представляется возможным. Впрочем, здесь необходимо отметить, что точный прогноз принципиально не может быть выполнен. Прогноз строится на основе тех или иных модельных представлений, а всякая модель — лишь определенное приближение к действительности. Речь может идти исключительно о прогнозе с определенной степенью достоверности. Конечно, по мере изучения процессов возникновения и распространения аварийного воздействия, по мере уточнения свойств взаимодействующих веществ, достоверность (точность) прогноза будет повышаться.

Прогноз последствий аварий строится относительно конкретного объекта. При этом обычно рассматриваются наиболее значимые по последствиям аварийные сценарии. Последствия конкретной аварии характеризуются условными (относительно конкретного аварийного сценария) оценками риска. Так, на рис. 1.3 представлена схема прогнозирования последствий аварий на объекте с токсичными веществами. Обычно аварии, связанные с освобождением токсичных веществ, называют химическими авариями. Согласно схеме, расчету предшествует предварительный анализ, в рамках которого выделяются наиболее значимые сценарии. В данном случае



Рис. 1.3. Схема прогнозирования последствий химических аварий

предполагается, что наиболее существенные аварии связаны с попаданием токсичных веществ в природные среды. По соответствующим сценарию моделям рассчитываются характеристики источников опасности — массы токсичных веществ, попадающих в природные среды. Далее моделируются процессы распространения веществ в природных средах, которые, в общем случае, зависят от климатических факторов. По динамике распространения токсичных веществ в природных средах определяется поле эффективных доз веществ, воздействующих на реципиентов риска. При этом каждая точка расчетного пространства характеризуется своим значением эффективной дозы. Впоследствии по полю значений эффективных доз веществ, используя модели «доза-эффект», определяются полевые значения величин ущерба относительно конкретных реципиентов риска. По результатам прогноза ущерба, отвечающего аварии, и результатам частотного анализа рассчитываются условные оценки риска (1.2.3). Переход к оценкам риска, характеризующим уровень опасности от объекта, осуществляется с учетом интенсивностей возникновения аварийных ситуаций.

Прогноз уровня аварийной опасности в пределах некоторой территории осуществляется с учетом всех значимых, с точки зрения последствий аварий, техногенных объектов, размещенных на территории. В данном случае под техногенным объектом может пониматься отдельная установка, производственное помещение, участок железнодорожной линии и т. д.

Представленный алгоритм прогнозирования уровня опасности реализуется в виде программного комплекса, работа которого поддерживается программной средой, базами данных свойств веществ, базами данных ГИС и т. д.

Модели источников химической аварийной опасности

В общем случае, катастрофа (авария) определяется как несанкционированное освобождение массы или энергии, которое причиняет или способно причинить ущерб реципиенту(-ам) риска. При этом масса или энергия выступает в качестве источника аварийной опасности. В некоторых случаях определение характеристик источника опасности возможно исключительно методами математического моделирования, на основе соответствующих математических моделей. Математическая модель должна адекватно описывать возникновение и развитие источника опасности. Исследование модели позволяет определить условия, при которых эмиссия опасной субстанции возможна, и рассчитать параметры процесса эмиссии.

Очевидно, что невозможно для общего случая построить физико-математическую модель, описывающую процесс эмиссии опасной субстанции. Возможность эмиссии и процесс эмиссии в каждом конкретном случае имеют свои особенности, которые определяют последствия катастрофы (аварии). В практике прогнозирования на основе типовых техногенных объектов и типовых аварийных ситуаций строятся некоторые обобщенные математические модели источников опасности. Если же техногенный объект и потенциальные аварийные сценарии не «укладываются» в типовые схемы, если прогнозируются характеристики «нетипового» источника опасности, то математическая модель должна учитывать особенности конкретного техногенного объекта и конкретного аварийного сценария.

В данном разделе работы представлены примеры построения моделей, которые были использованы авторами, главным образом, при прогнозировании последствий аварий на объектах хранения и утилизации фосфорорганических боевых отравляющих веществ. В качестве реципиента риска рассматривается население, проживающее в районе размещения объектов. То, что реципиенты риска находятся на расстоянии нескольких километров от техногенных объектов, ограничивает круг рассматриваемых моделей источников опасности. В этом случае наиболее существенную опасность представляет попадание токсичных веществ в воздушную среду населенных пунктов. Поэтому в настоящей главе кратко рассматриваются модели, описывающие возникновение и развитие источников химической опасности при некоторых теоретически возможных авариях на объектах с фосфорорганическими отравляющими веществами.

Отметим, что в настоящее время самопроизвольное возникновение источника токсической опасности на объекте хранения или объекте утилизации боевых

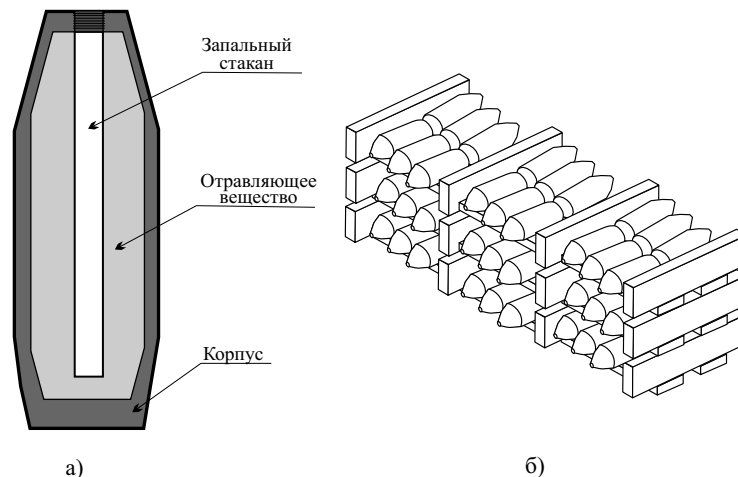


Рис. 2.1. Схема химического боеприпаса (а) и пример размещения боеприпасов при их хранении на стеллаже (б)

отравляющих веществ — событие весьма маловероятное. Это обусловлено особенностями хранения боевых отравляющих веществ. На рис. 2.1 представлена схема химического боеприпаса и пример размещения боеприпасов на стеллаже при их хранении. Боевые отравляющие вещества находятся в герметичных полостях химических боеприпасов. За десятилетия, в течение которых миллионы единиц химических боеприпасов хранились на объектах хранения, были отмечены лишь единичные случаи, когда отравляющие вещества просачивались на поверхность химического боеприпаса. В этой связи можно полагать, что в настоящее время химическая опасность, связанная с объектами хранения и утилизации боевых отравляющих веществ, может возникнуть только при внешнем воздействии на химические боеприпасы. Герметичность внутренних полостей химических боеприпасов может быть нарушена, например, при пожаре или при взрыве.

Для прогнозирования характеристик источников токсической опасности должны быть построены соответствующие математические модели. Исследование этих моделей позволит выявить условия попадания токсичных химических веществ в окружающую природную среду и объемы этих веществ.

2.1. Модель источника опасности при проливе

Пролив токсичной жидкости может привести к возникновению источника токсической опасности. Механизмы возникновения источника могут быть различны и, как правило, зависят от инициирующих событий, приводящих к аварии, связанной с проливом. Такими инициирующими событиями могут быть, например, механические повреждения химических боеприпасов при операциях погрузки-разгрузки, повреждения боеприпасов при расснаряжении, повреждения химических боеприпасов при взрыве и т. д.

В рассматриваемом случае опасность будет обусловлена, главным образом, парами токсичной жидкости, испаряющейся с зеркала пролива, а основной характеристикой источника опасности будет скорость поступления паров токсичной жидкости в окружающее пространство. В свою очередь, интенсивность испарения, зависящая от параметров среды и физического состояния пролитого вещества, может быть определена методами математического моделирования путем решения модельного уравнения тепломассопереноса с соответствующими краевыми условиями. Именно краевые условия, характеризующие источник опасности при проливе, являются предметом рассмотрения настоящего раздела.

Особенностью фосфорорганических боевых отравляющих веществ является относительно низкая летучесть их паров при нормальных условиях, а следовательно, и низкие скорости испарения. В этом случае процесс испарения быстро становится изотермическим. Соответственно, испарение можно описать исключительно при помощи массообмена, не рассматривая сопряженную задачу теплообмена. Математическая модель должна учитывать два основных фактора: во-первых, конкуренцию процессов парообразования и конденсации на границе раздела фаз; во-вторых — кинетику распространения паров токсичной жидкости в газовой фазе.

Первый фактор обусловлен процессами, происходящими на молекулярном уровне на масштабах порядка длины свободного пробега молекул в газовой фазе, и зависит от индивидуальных физических свойств жидкости, концентрации паров в газовой фазе вблизи молекулярной границы раздела фаз и температуры. При условии достаточно быстрого отвода паров от поверхности (например, при испарении в вакуум) конденсация отсутствует. В этом случае наблюдается максимально возможная интенсивность испарения. В реальных условиях процессу испарения сопутствует процесс конденсации, что приводит к существенному снижению результирующей интенсивности испарения, по сравнению с максимально возможной.

Интенсивность процесса конденсации зависит от концентрации пара вблизи межфазной поверхности. Величина концентрации, в свою очередь, определяется механизмом, посредством которого в конкретной ситуации происходит отвод паров из зоны парообразования. В случае испарения с поверхности, образовавшейся в результате пролива жидкости внутри помещения, таким механизмом является массоперенос вентиляционными потоками. При испарении в атмосферу — массоперенос в приземном слое атмосферы за счет атмосферной турбулентности и адвективного переноса.

Таким образом, процесс перехода вещества из жидкости в газовую фазу и перенос вещества в газовой фазе — связанные процессы, влияющие друг на друга. Концентрация примеси в газовой фазе вблизи поверхности разлива определяется более медленным процессом. Если лимитирующим звеном является процесс на межфазной границе, то этот процесс и будет определять давление пара (концентрацию) в газовой фазе. Если лимитирующим процессом является процесс диффузионного отвода, то давление паров в газовой фазе можно считать равным давлению насыщенного пара.

Следуя работам [2, 31], рассмотрим случай, когда лимитирующим звеном является процесс на межфазной границе (см. рис. 2.2), т. е. скорость эмиссии молекул

из жидкости в газовую фазу значительно меньше, чем возможности массообмена в газовой среде.

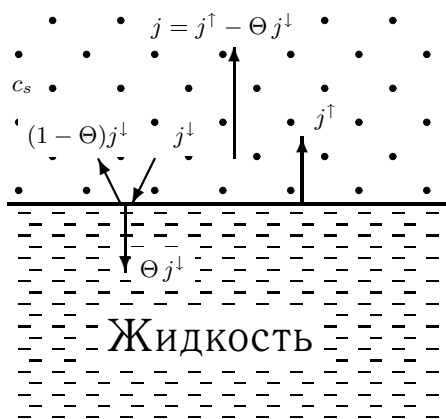


Рис. 2.2. Межфазная граница

энтальпия испарения, T — абсолютная температура, R — универсальная газовая постоянная. Выражение (2.1.1) описывает процесс испарения вещества в вакуум.

При испарении в газовую фазу необходимо учитывать также и процесс конденсации. Поверхностная плотность потока молекул, падающих со стороны газовой фазы на поверхность жидкости, определяется долей молекул, движущихся к межфазной границе и равна [33]

$$j^{\downarrow} = N_v \sqrt{\frac{RT}{2\pi\mu}}, \quad (2.1.2)$$

где N_v — число молекул в единице объема газовой фазы.

Молекула, падающая на межфазную границу, может быть отражена или поглощена жидкостью. Если коэффициент адаптации (т. е. вероятность для падающей молекулы поглотиться конденсированной фазой) равен Θ , то в состоянии динамического равновесия между жидкостью и ее паром справедливо равенство

$$j^{\uparrow} = \Theta \cdot j^{\downarrow}. \quad (2.1.3)$$

В условиях равновесия число молекул в единице объема газовой фазы N_v связано с парциальным давлением насыщенного пара p_v соотношением $p_v = N_v k T$. Коэффициент адаптации при этом определяется из условия динамического равновесия (2.1.3)

$$\Theta = \frac{N_l}{N_v} \exp\left(-\frac{L}{RT}\right) = \frac{\rho_l}{\mu} \frac{RT}{p_v} \exp\left(-\frac{L}{RT}\right). \quad (2.1.4)$$

При отсутствии динамического равновесия ($N_v = p/kT$, $p \neq p_v$), интенсивность результирующего молекулярного потока (число молекул в единицу времени)

В соответствии с молекулярно-кинетической теорией испарения (см., например, [32]), поверхностная плотность потока молекул, вылетающих из жидкой фазы в газовую через поверхность раздела (т. е. число молекул, вылетающих с единицы площади в единицу времени), определяется долей молекул с достаточной кинетической энергией для преодоления потенциального барьера и равна

$$j^{\uparrow} = N_l \sqrt{\frac{RT}{2\pi\mu}} \exp\left(-\frac{L}{RT}\right), \quad (2.1.1)$$

где $N_l = N_A \rho_l / \mu$ — число молекул в единице объема жидкой фазы, μ — молекулярный вес, N_A — число Авогадро, ρ_l — плотность жидкой фазы, L — молярная

определяется следующим выражением:

$$j = j^\uparrow - \Theta j^\downarrow = N_A \frac{\rho_l}{\mu} \sqrt{\frac{RT}{2\pi\mu}} \exp\left(-\frac{L}{RT}\right) \left[1 - \frac{p}{p_v}\right], \quad (2.1.5)$$

где p — парциальное давление пара над поверхностью жидкости.

Случай $j > 0$ соответствует преобладанию испарения над конденсацией, случай $j = 0$ — динамическому равновесию между жидкостью и ее паром, случай $j < 0$ — преобладанию конденсации. Из выражения (2.1.5) непосредственно следует, что необходимым условием макроскопического испарения (наличия положительного молекулярного потока j) является условие $p < p_v$.

Отсюда получим интенсивность потока массы вещества с единицы площади поверхности пролива:

$$J = \frac{\mu}{N_A} j = \rho_l \sqrt{\frac{RT}{2\pi\mu}} \exp\left(-\frac{L}{RT}\right) \left[1 - \frac{p}{p_v}\right]. \quad (2.1.6)$$

Если ввести массовую концентрацию примеси в газовой фазе около поверхности раздела фаз $c_s = m/V$, то из предположения, что пары жидкости подчиняются уравнению состояния идеального газа, следует:

$$\begin{aligned} p &= (RT/\mu) c_s, \\ p_v &= (RT/\mu) c_v, \end{aligned}$$

где c_v — концентрация насыщенного пара.

Отсюда, поток массы вещества в единицу времени с единицы площади поверхности равен

$$J = J_{max} \left[1 - \frac{c_s}{c_v}\right], \quad (2.1.7)$$

где J_{max} — скорость испарения в вакуум, определяемая следующим соотношением:

$$J_{max} = \rho_l \sqrt{\frac{RT}{2\pi\mu}} \exp\left(-\frac{L}{RT}\right). \quad (2.1.8)$$

Формула (2.1.8) отвечает предположению, что молекулы, вылетающие из жидкой фазы, имеют равновесное распределение по скоростям. Учет того обстоятельства, что вылетающие молекулы уносят с собой запас потенциальной энергии (равной скрытой теплоте испарения), приводит, например, к следующему выражению [34]:

$$J_{max} = \rho_l \sqrt{\frac{3RT}{2\pi\mu (1 + 2L/RT)}} \exp\left(-\frac{L}{RT}\right). \quad (2.1.9)$$

В табл. 2.1 приведены характеристики некоторых фосфорорганических отравляющих веществ и оценки скорости испарения в вакуум при температуре 20°C . Из таблицы следует, что кинетика молекулярных процессов на межфазной границе будет существенна для Ви-газа и менее важна для зарина.

Отметим, что представленная модель учитывает только основные закономерности процесса испарения с поверхности. Моделирование методом Монте-Карло

Таблица 2.1. Параметры некоторых веществ при температуре 20°C.

агент	μ , г/моль	ρ_l , г/см ³	L , Дж/моль	c_v , г/м ³	J_{max} , г/с·м ²	J_{kn} , г/с·м ²
вода	18	1,000	44999	17,3	$3,92 \cdot 10^{-1}$	$2,53 \cdot 10^3$
зарин	140	1,088	46849	11,3	$1,19 \cdot 10^{-1}$	$5,94 \cdot 10^2$
зоман	182	1,013	55134	3,1	$2,99 \cdot 10^{-3}$	$1,43 \cdot 10^2$
Ви-газ	267	1,024	87397	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$3,56 \cdot 10^{-9}$	$5,70 \cdot 10^{-2}$

процесса испарения в вакуум [35] показало, что вероятность вылета атомов из конденсированной фазы в слой Кнудсена несколько отличается от формулы (2.1.1), полученной Френкелем [32] и лежащей в основе представленной модели. Тем не менее, представленная модель используется для определения граничных условий III рода в уравнении массопереноса.

Если лимитирующим звеном в процессе испарения жидкости является отвод паров, то вблизи межфазной границы всегда сохраняется парциальное давление (концентрация) насыщенного пара. В этом случае, приходим к верхней оценке скорости испарения: интенсивность испарения определяется только кинетикой отвода паров жидкости от поверхности разлива. Эта гипотеза широко применяется в различных полумпирических моделях испарения жидкости. При использовании математических моделей массопереноса, описываемых дифференциальными уравнениями, на основе этой гипотезы формулируются граничные условия I рода.

Так, известная формула Кнудсена [33]

$$J_{kn} = \sqrt{\frac{RT}{2\pi\mu}} c_v \quad (2.1.10)$$

основана именно на этом предположении. Скорость испарения в вакуум, определяемую по модели Кнудсена, называют максимальной теоретической скоростью испарения. Модель Кнудсена можно расширить путем введения поправок на конденсацию

$$J_{kn} = \sqrt{\frac{RT}{2\pi\mu}} (c_v - c_s). \quad (2.1.11)$$

Более детальное исследование процессов, протекающих в слое Кнудсена, на основе молекулярно-кинетической теории газов приводит к набору алгебраических уравнений, связывающих скорость испарения, температуру жидкости и пара, парциальное давление насыщенного пара у межфазной границы и вдали от нее [36].

Оценки максимальной скорости испарения по Кнудсену для ряда фосфорорганических веществ приведены в табл. 2.1. Из таблицы видно, что нижняя оценка по (2.1.9) и верхняя оценка по формуле Кнудсена (2.1.10) различаются на несколько порядков. По всей видимости, реальная скорость испарения в вакуум будет между нижней и верхней оценками.

Возникает естественный вопрос о применимости различных модельных представлений для расчета процесса испарения. Дискуссия, посвященная этому вопросу, продолжается до сих пор. Известно [37], что для большинства веществ

Таблица 2.2. Зависимость минимальной толщины пленки жидкости h_m от типа поверхности.

Тип поверхности	вещество	h_m , см	источник
бетон	жидкий метан, азот	0,3	[19]
бетон	зарин, Ви-газ	0,1	[20]
твердая, не впитывающая поверхность	любое	5,0	[38]
вода	жидкий метан, азот	1,0	[19]
сухая песчаная почва	жидкий метан, азот	20,0	[19]
влажная песчаная почва	жидкий метан, азот	15,0	[19]
гравий	жидкий метан, азот	5,0	[19]
гравий	зарин, Ви-газ	0,6	[20]

справедливо уравнение Кнудсена, т. е. в непосредственной близости от межфазной границы пары испаряющейся жидкости насыщены. Однако для воды, давление насыщенного пара которой при комнатной температуре довольно велико, коэффициент испарения, определяемый как

$$\text{«коэффициент испарения»} = \frac{J_{\text{эксперимент}}}{J_{\text{кн}}},$$

варьируется от 0.01 до 1 [37]. Последнее обстоятельство связано со значительными трудностями при проведении эксперимента и с погрешностями измерений [37]. Заметим, что анализ таблицы 2.1 показывает, что испарение воды будет в большой степени лимитироваться кинетикой массопереноса паров из зоны парообразования.

Учитывая вышеуказанные обстоятельства, хорошим приближением для прогноза наихудших последствий будет гипотеза о насыщенности паров вблизи межфазной границы. Однако результаты такого прогноза могут быть существенно завышены, поскольку не учитывают кинетику образования пара.

Чтобы граничные условия для уравнения массопереноса были полными, необходимо задать размеры зеркала пролива. Обычно площадь пролива принимается равной площади обваловки. При отсутствии обваловки или незначительной массе выброса площадь будет определяться процессами растекания и просачивания жидкости. В литературе можно встретить различные эмпирические зависимости площади разлива в зависимости от характеристик выброса и свойств подложки. Наиболее часто используют зависимость в следующем виде [38]:

$$S = \frac{m_0}{h_m \cdot \rho_l}, \quad (2.1.12)$$

где m_0 — масса пролива, S — площадь пролива, а параметр h_m представляет собой минимальную толщину пленки жидкости с учетом растекания и просачивания. В табл. 2.2 приведены значения h_m для некоторых подложек.

Из таблицы следует, что среди данных из различных литературных источников наилучшее согласие имеет место для бетонной поверхности. Для гравийной поверхности различия более существенны. Отметим, что указанное в методике «Токсис» [38] значение толщины пленки для «твердой, не впитывающей поверхности» (по всей видимости — бетона) больше соответствует гравийной или песчаной поверхности.

Наконец, решение уравнений модели массопереноса с граничными условиями, определяемыми моделью межфазной границы, позволяет выполнить численную оценку интенсивности испарения, а также определить концентрационное поле токсичных веществ в окружающем пространстве. Соответствующие оценки, полученные с привлечением представленных выше модельных представлений о процессах, протекающих на межфазной границе жидкость-пар, представлены в следующей главе.

2.2. Модель возникновения источника опасности при взрыве

Взрыв — кратковременный процесс быстрого превращения вещества в результате химической реакции с выделением большого количества энергии. При взрыве в атмосфере возникает воздушная ударная волна, распространяющаяся с большой скоростью, в виде области сжатия — разрежения со скачком давления, температуры, плотности и скорости частиц среды [39].

В результате воздействия воздушной ударной волны на химические боеприпасы возможно их разрушение и попадание высокотоксичных веществ в окружающее пространство. Действительно, за время хранения боеприпасов, начиненных фосфорорганическими отравляющими веществами, регистрировались случаи просачивания отравляющих веществ в полость запального стакана. Это свидетельствует о существовании внутренних дефектов и микротрещин в материале стакана. Под воздействием ударной волны возможен рост микротрещин и развитие дефектов, что может привести к надлому запального стакана и к нарушению герметичности внутренней полости. Поэтому, хотя непосредственного разрушения корпуса боеприпаса не происходит, возможно просачивание отравляющих веществ в окружающее пространство.

Качественная оценка внутренних напряжений в материале запального стакана при воздействии ударной волны на химический боеприпас приводит к выражению [2]

$$\sigma_0 = \frac{(2d\rho - \rho_l r) l^2 S \Delta p}{2drM}, \quad (2.2.1)$$

где σ_0 — внутреннее напряжение, Δp — избыточное давление на фронте ударной волны, S — площадь сечения снаряда, M — полная масса снаряда, ρ — плотность материала стакана, ρ_l — плотность жидкости, d — толщина стенок внутреннего стакана, l , r — длина и радиус выступающей части стакана соответственно.

Данная оценка действительна для среднего значения напряжений, возникающих в материале стакана. Такое рассмотрение имеет смысл, так как за время обтекания боеприпаса ударной волной упругая волна успевает совершить большое количество колебаний (время, за которое ударная волна проходит снаряд, $\sim 10^{-4}$ с, период собственных колебаний стенки стакана снаряда $\sim 10^{-6}$ с).

В качестве критерия возникновения трещины в материале стакана при взрыве принято условие превышения внутреннего напряжения в материале запального стакана σ_0 предела текучести σ_t , то есть $\sigma_0 \geq \sigma_t$ [2].

В табл. 2.3 представлены оценки минимальных величин критического давления, отвечающих критерию разгерметизации химических боеприпасов при взрыве.

Под минимальным критическим давлением понимается минимальный перепад давления на фронте ударной волны, при котором возможно разрушение материала запального стакана химического боеприпаса. Очевидно, что минимальная величина критического давления достигается, когда градиент давления на фронте ударной волны перпендикулярен оси химического боеприпаса. Изменение величины угла между вектором градиента давления на фронте ударной волны и осью снаряда приводит к возрастанию величины перепада давления, при котором возможно нарушение герметичности. В предельном случае, когда вектор градиента давления на фронте ударной волны коллинеален оси химического боеприпаса, перепад давления на фронте ударной волны, отвечающий условию разгерметизации, равен бесконечности, то есть разрушение снаряда не происходит.

Калибр боеприпаса	Избыточное давление ΔP , атм
122	38
130	54
152	55
540	82
880	113

Таблица 2.3. Избыточное давление, отвечающее разгерметизации химических боеприпасов.

Результаты, представленные в табл. 2.3, отвечают условиям нарушения герметичности внутренних полостей химических боеприпасов ствольной артиллерии калибров 122 мм, 130 мм, 152 мм и боевых частей химических ракет калибров 540 мм и 880 мм. Из данных таблицы следует, что критерий разгерметизации для химических боеприпасов при взрыве выполняется, если перепад давления на фронте ударной волны не менее 38 атм. С увеличением калибра боеприпаса величина минимального перепада давления на фронте ударной волны, при которой возможна разгерметизация, также увеличивается.

В верхней части табл. 2.4 представлены значения максимальных расстояний от центра взрыва, в пределах которых происходит разгерметизация химических боеприпасов.

Таблица 2.4. Расстояние, в пределах которого происходит разгерметизация химических боеприпасов.

Калибр боеприпаса, мм	Тропиловый эквивалент, кг						
	0,5	1,0	5,0	10	20	50	100
122	0,61	0,77	1,32	1,67	2,10	2,85	3,59
130	0,54	0,68	1,17	1,47	1,85	2,52	3,17
152	0,54	0,68	1,16	1,46	1,84	2,50	3,14
540	—	—	1,04	1,27	1,59	2,16	2,73
880	—	—	—	1,13	1,42	1,93	2,43
К-р 122	—	—	—	1,05	1,32	1,80	2,26
К-р 130	—	—	—	—	1,20	1,60	2,05
К-р 152	—	—	—	—	1,23	1,67	2,10
К-р 540	—	—	0,94	1,18	1,49	2,03	2,55
К-р 880	—	—	—	—	1,34	1,83	2,30

При прогнозировании последствий воздействия ударной волны на химические боеприпасы необходимо учитывать, что на некоторых участках технологической линии химические боеприпасы находятся в специальных контейнерах. В этом случае при взрыве ударная волна будет воздействовать на контейнер. Условия разгерметизации химических боеприпасов, находящихся в контейнере, будут отличаться от условий разгерметизации боеприпасов вне контейнера.

Результаты расчетов расстояний, в пределах которых происходит разгерметизация химических боеприпасов, размещенных в контейнерах, представлены в нижней части табл. 2.4. Отметим, что при проведении расчетов использовалась та же модель разгерметизации, что и при моделировании разгерметизации химических боеприпасов. Но учитывалось, что химические боеприпасы калибров 122 мм и 130 мм хранятся по 20 боеприпасов в контейнере; 152 мм — по 15 боеприпасов; боевые части химических ракет хранятся в индивидуальных контейнерах.

Значения максимальных расстояний зависят от энергии, которая выделяется при взрыве. Энергия характеризуется тротиловым эквивалентом взрывчатого вещества. Предполагается, что эпицентр взрыва находится на поверхности абсолютно твердого тела. Расстояние R равно радиусу полусферы с центром в точке взрыва, в пределах которой выполняется условие разгерметизации для химических боеприпасов указанного калибра. Расположение химических боеприпасов и контейнеров относительно фронта ударной волны отвечает наиболее неблагоприятному случаю (ось боеприпаса или контейнера с боеприпасами перпендикулярна вектору градиента давления на фронте ударной волны). При расчетах использовались данные [40] по зависимости избыточного давления на фронте ударной волны от расстояния до центра взрыва.

Как следует из данных, представленных в табл. 2.4, условие разгерметизации для каждого вида химических боеприпасов выполняется при определенной минимальной энергии. Так, при взрыве мощностью до 1 кг тринитротолуола (тротила) контейнер защищает химические боеприпасы от разрушения (не выполняется условие разгерметизации внутренней полости).

Данные табл. 2.4 позволяют определить количество боеприпасов, которое может быть разрушено в результате взрыва, и оценить количество отравляющего вещества, которое может попасть в атмосферу. Но при этом необходимо учесть распределение химических боеприпасов по расстоянию от эпицентра взрыва и распределение боеприпасов в зависимости от ориентации относительно фронта ударной волны. Эти распределения определяются условиями на конкретных объектах. Так же условиями конкретного объекта определяется, какая часть общей массы отравляющих веществ в разрушенных в результате взрыва химических боеприпасов попадает в атмосферу при взрыве. Учет указанных распределений позволяет прогнозировать характеристики источников токсической опасности при взрывах на объектах с химическими боеприпасами.

2.3. Возникновение источника опасности при пожаре

Возникновение источника химической опасности при пожаре обусловлено возможностью разгерметизации внутренней полости боеприпаса при нагревании и выбросом отравляющих веществ в окружающее пространство [2]. Возможность

разгерметизации подтверждается данными наблюдений [41], согласно которым в условиях пожара химические боеприпасы калибров 122 и 152 мм сохраняют герметичность 17,5 и 24 мин, соответственно.

Причина разгерметизации связана с увеличением давления во внутренней полости боеприпаса вследствие реакции термической деструкции отравляющего вещества. Реакция начинает протекать при повышении температуры отравляющего вещества до 100 °С, а при температуре более 200 °С время полураспада составляет секунды. Газообразные продукты реакции разложения фосфорорганических отравляющих веществ, накапливаясь в герметичной внутренней полости химического боеприпаса, приводят к повышению давления. Поскольку скорость деструкции отравляющего вещества слабо зависит от давления, то с ростом температуры давление будет повышаться и может достигнуть величины, при которой произойдет пластическая деформация в материале запального стакана химического боеприпаса, что может привести к разрушению материала стакана с последующим нарушением герметичности внутренней полости [2].

В качестве критерия разгерметизации химического боеприпаса принималось условие достижения величиной напряжений в материале запального стакана предела текучести стали (предел текучести $\sigma_0 \sim 2 \cdot 10^8$ Н/м² при 300 К).

Предварительные оценки, выполненные в предположении полного разложения отравляющего вещества в химическом боеприпасе, показали, что условие разгерметизации для боеприпасов, начиненных Ви-газом, достигается при температуре 350 К, для боеприпасов, начиненных зоманом, — 750 К, а для боеприпасов, начиненных заринном, — 1500 К. Из оценок следует, что при пожаре наиболее вероятным источником химической опасности могут быть боеприпасы, начиненные Ви-газом. Наименьшая вероятность вскрытия относится к боеприпасам, начиненным заринном. Боеприпасы, начиненные зоманом, с точки зрения вероятности возникновения источника химической опасности, занимают промежуточное положение.

Полное напряжение, возникающее в материале запального стакана, оценивалось как след тензора напряжений в цилиндре [42]:

$$\sigma_r = Tr(\sigma_{ik}) = 2 \cdot \frac{p_1 \cdot r_1^2 - p_2 \cdot r_2^2}{r_1^2 - r_2^2}, \quad (2.3.1)$$

где r_1 , r_2 — внутренний и внешний радиусы запального стакана, p_1 , p_2 — внутреннее и внешнее давление, действующее на запальный стакан. Наружное давление для запального стакана — это давление, возникающее в полости химического боеприпаса, а внутреннее давление принималось равным атмосферному.

Давление во внутренней полости химического боеприпаса при нагревании зависит от количества отравляющего вещества, которое будет подвергнуто разложению в результате реакции деструкции. Оценка количества отравляющего вещества, подвергшегося деструкции, основана на результатах моделирования температурного поля в боеприпасе при нагревании. Динамика температурного поля описывается уравнением

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(a(\vec{r})) \cdot \nabla(T), \quad (2.3.2)$$

с граничными условиями

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_G = \alpha (T_0 - T|_G) + q_\gamma, \quad (2.3.3)$$

где $a(\vec{r})$ — коэффициент температуропроводности, λ — коэффициент теплопроводности, α — коэффициент теплопередачи между стенкой боеприпаса и окружающей средой, q_γ — радиационный тепловой поток от пламени. Оценка коэффициента теплопередачи отвечает методике, предложенной в [43], которая учитывает зависимость коэффициента от скорости воздушного потока в пограничном слое. Тепловой поток от пламени принимался равным тепловому потоку от вертикальной стенки, имеющей температуру пламени и излучающей по закону Стефана-Больцмана

$$\rho_\gamma = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_p^4, \quad (2.3.4)$$

где ρ_γ — плотность потока излучения, ϵ — степень черноты тела, σ — коэффициент Стефана-Больцмана, T_p — температура пламени. Для радиационного потока, направленного от излучающей поверхности к элементу поверхности химического боеприпаса, имеем выражение

$$q_\gamma = \phi_{k-f} \cdot \rho_\gamma, \quad (2.3.5)$$

где ϕ_{f-k} — угловой коэффициент для излучающей поверхности пламени и принимающей поверхности боеприпаса, определенный для элементарных геометрических схем в [44].

Количество прореагировавшего вещества определяется исходя из известной динамики температурного поля в химическом боеприпаса и кинетики реакции разложения отравляющего вещества в полости боеприпаса:

$$Q_s = \int_0^t \int_V \omega(T) dV dt, \quad (2.3.6)$$

где $\omega(T)$ — скорость реакции деструкции. Выражение для $\omega(T)$ может быть записано на основе закона Аррениуса [45] в виде:

$$\omega(T) = k_0 \cdot c \cdot \exp(-E_a/RT), \quad (2.3.7)$$

где c — концентрация отравляющего вещества, T — температура, R — универсальная газовая постоянная, k_0, E_a — параметры, зависящие от вещества.

Давление в полости боеприпаса оценивалось на основе уравнения Ван-дер-Ваальса реального газа

$$\left(\pi + \frac{3}{v^2} \right) (3 \cdot v - 1) = 8 \cdot \tau. \quad (2.3.8)$$

Уравнение (2.3.2), представленное в цилиндрической системе координат (r, φ) с граничными условиями (2.3.3), решалось численно¹ с использованием разностной схемы Дугласа [46]. При аппроксимации граничных условий разностными соотношениями второго порядка точности схема Дугласа обеспечивает второй порядок

¹Программы для компьютерного моделирования процесса нагрева и разгерметизации химических боеприпасов составлены и тестированы А. В. Аксаковым. Им же были проведены компьютерные эксперименты с целью прогнозирования последствий нагрева химических боеприпасов.

Таблица 2.5. Параметры процесса разгерметизации химических боеприпасов при пожаре: временной интервал сохранения герметичности — τ (с), масса отравляющего вещества в боеприпасе на момент разгерметизации — m (кг).

Тип боеприпаса	$T_p = 1500 \text{ K}$				$T_p = 1800 \text{ K}$			
	В пламени		От стенки		В пламени		От стенки	
	τ	m	τ	m	τ	m	τ	m
122 мм, зоман	—	—	688	0,33	247	0,09	370	0,44
122 мм, ви-газ	178	1,82	349	2,02	100	1,98	184	2,12
130 мм, ви-газ	187	0,89	384	0,98	105	0,97	201	1,03
152 мм, зоман	—	—	987	0,65	350	0,33	542	0,90
220 мм, зоман	1045	0,85	1794	5,07	537	5,24	993	6,78
540 мм, ви-газ	1571	114	5779	101	692	143	2222	134
880 мм, ви-газ	2365	339	13686	274	1016	405	4341	373

точности по координатам и времени. Схема абсолютно устойчива. При решении разностных уравнений использовался алгоритм прогонки [47]: левая прогонка при решении уравнений по координатному направлению r ; циклическая прогонка — по координатному направлению φ .

Температурная зависимость предела текучести аппроксимировалась полиномом.

Результаты численного исследования процесса разгерметизации внутренних полостей при нагреве химических боеприпасов в условиях пожара представлены в табл. 2.5. Информация отвечает различным химическим боеприпасам, идентифицированным калибром и видом отравляющего вещества в боеприпасе (зоман, Ви-газ). В таблице представлены временные интервалы сохранения герметичности τ (с) и массы фосфорорганических отравляющих веществ m (кг), содержащихся в химических боеприпасах в момент разгерметизации. Масса отравляющего вещества в момент разгерметизации m равна разности между исходной массой отравляющего вещества в полости боеприпаса и массой разложившегося вещества. Условия нагрева боеприпаса характеризуются температурой пламени T_p и расположением боеприпаса относительно очага горения. В таблице представлены результаты, отвечающие случаю нагрева боеприпаса в пламени (всесторонний нагрев) и случаю нагрева химического боеприпаса стеной огня.

Отметим, что непосредственное сопоставление временных интервалов сохранения герметичности внутренних полостей боеприпасов, отвечающих расчетным и экспериментальным данным, затруднительно. Это связано с недостаточной информацией в [41] по условиям нагрева и типам отравляющих веществ в боеприпасах, получивших повреждения при пожаре. Устойчивость химических боеприпасов к нагреву в значительной степени определяется условиями нагрева. Вместе с тем сопоставимые результаты по экспериментальным и расчетным значениям времени сохранения герметичности показывает, что прогнозируемый механизм разрушения химических боеприпасов в условиях пожара имеет место.

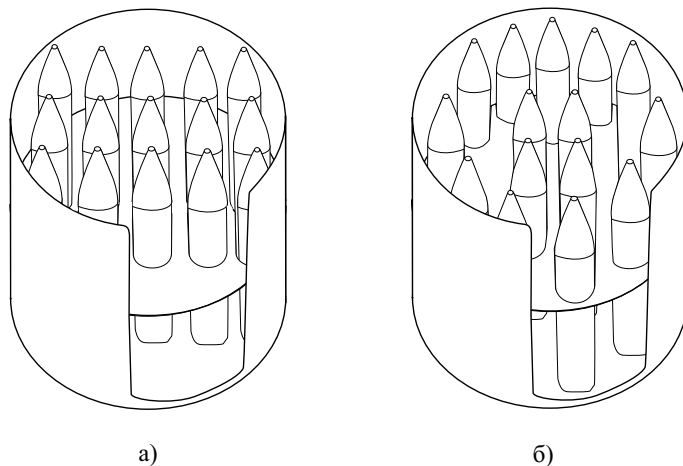


Рис. 2.3. Схемы расположения снарядов в контейнерах: а) прямоугольный шаблон (схема А); б) концентрический шаблон (схема Б)

Данные табл. 2.5 иллюстрируют принципиальную возможность разгерметизации внутренних полостей химических боеприпасов в случае пожара. Расчеты проводились с учетом следующих предположений: газовая фаза первоначально заполняет пять процентов объема полости; химические боеприпасы расположены так, что их оси параллельны плоскости пламени. Из результатов компьютерного моделирования следует, что химические боеприпасы, начиненные заринном, устойчивы к тепловому воздействию при пожаре. В этой связи они не представлены в табл. 2.5. Наименее устойчивыми оказываются боеприпасы, начиненные Ви-газом. Значительную опасность представляет нагрев химических боеприпасов с большими массами Ви-газа. Действительно, масса Ви-газа, оставшаяся после реакции деструкции в разрушенной боевой части ракеты, может достигать ста и более килограмм.

Рассмотрим случай, когда химические боеприпасы размещены в защитных контейнерах. В этом случае между боеприпасами и источником тепла находится металлический экран и воздушный зазор, которые существенно уменьшают возможность возникновения источника токсической опасности при пожаре.

Два варианта размещения боеприпасов в контейнере представлены на рис. 2.3: в узлах прямоугольного шаблона (схема А); в узлах концентрического шаблона (схема Б). С точки зрения плотности упаковки химических боеприпасов в контейнере предпочтительным является использование концентрического шаблона, с точки зрения выполнения защитных функций контейнера в условиях пожара предпочтительным является использование прямоугольного шаблона.

Некоторые оценки, характеризующие источник токсической опасности при нагреве химических боеприпасов в защитных контейнерах, представлены в табл. 2.6. Моделировались условия, в которых находятся химические боеприпасы при размещении в контейнере по схеме экономичной упаковки (схема Б). Боеприпасы

Таблица 2.6. Временной интервал сохранения герметичности, масса отравляющего вещества, попадающая в окружающую среду при нагреве боеприпасов в контейнерах.

Боеприпасы	122 мм, Ви-газ	130 мм, Ви-газ	884 мм, Ви-газ
масса, кг	12,0	5,6	59,6
время, ч	5,0	5,2	10,5

в контейнере находятся в различных тепловых условиях. По результатам моделирования выполнены оценки массы отравляющего вещества, которое не успело разложиться за время нагрева.

Как следует из представленных данных, контейнер достаточно эффективно защищает химические боеприпасы от теплового воздействия. Еще более эффективную защиту химических боеприпасов от теплового воздействия при пожаре оказывает контейнер, с расположением боеприпасов в узлах прямоугольного шаблона (схема А).

Необходимо подчеркнуть, что в случае пожара использование контейнера с расположением боеприпасов по схеме А с шириной воздушного зазора более 100 мм позволяет не рассматривать снаряды, утратившие герметичность, как источник токсической опасности. Расчеты показывают, что при данном пространственном расположении выделившиеся токсичные вещества сгорают. Так же можно полагать, что в условиях пожара индивидуальные контейнеры обеспечивают достаточную защиту боевых частей химических ракет.

2.4. Возникновение источника опасности при тушении пожара

Один из возможных механизмов возникновения токсической опасности при тушении пожара связан с быстрым охлаждением предварительно нагретого химического боеприпаса². Действительно, в условиях пожара возможен нагрев отравляющих веществ, находящихся в герметичных полостях химических боеприпасов. При этом, как показано в разделе 2.3, во внутренней полости химического боеприпаса происходит реакция деструкции фосфорорганического отравляющего вещества. В газообразных продуктах реакции деструкции под воздействием тепловых потоков, характерных для условий пожара, возникает высокое давление. Давление во внутренней полости вносит свой вклад в величину полных напряжений, возникающих в материале оболочки химического боеприпаса. Свой вклад в напряженное состояние материала оболочки в условиях неравномерного нагрева или охлаждения вносят и температурные напряжения. При быстром охлаждении предварительно нагретого химического боеприпаса величина напряжений, возникающих в материале оболочки, может привести к разрушению оболочки.

²В работе над разделом принимал участие А. В. Аксаков.

Величину полных напряжений, как и ранее, будем характеризовать следом тензора напряжений. Полное напряжение, возникающее в материале оболочки химического боеприпаса, — след тензора напряжений в цилиндре [42]. Компоненты тензора включают составляющую, обусловленную внутренним давлением (2.3.1), и составляющую термоупругих напряжений, обусловленную неравномерным температурным полем в оболочке. За критерий разрушения внешней оболочки химического боеприпаса принимается условие достижения величиной полных напряжений предела прочности материала. В математической модели зависимость предела прочности материала оболочки боеприпаса от температуры аппроксимировалась полиномом.

Величина температурных напряжений в материале оболочки химического боеприпаса может быть представлена в виде [48]:

$$\sigma_z = \frac{2a_T E}{1-\nu} \left[\frac{2}{1-\rho_1^2} \int_{\rho_1}^1 (T - T_0) \rho d\rho - (T - T_0) \right], \quad (2.4.1)$$

где ρ_1 — отношение внутреннего радиуса цилиндрической оболочки боеприпаса к внешнему, a_T и E — соответственно, коэффициент линейного расширения и модуль упругости, а T_0 — начальное распределение температуры по радиусу оболочки боеприпаса. Принята цилиндрическая система координат (r, φ, z) : координатная ось z расположена вдоль оси боеприпаса.

Предполагается, что напряженное состояние оболочки химического боеприпаса отвечает плоскому деформированному состоянию толстостенного полого цилиндра [49]. Условия нагрева и охлаждения химического боеприпаса таковы, что температурное поле может быть описано приближением плоского осесимметричного случая — $T(r)$.

Численные оценки величины полных напряжений при нагреве химических боеприпасов в условиях пожара показывают, что значения полных напряжений не достигают величины, отвечающей разрушению материала оболочки: вклад температурных напряжений в величину полных напряжений не существен. Кроме того, при нагреве возникают напряжения и в материале запального стакана (в первую очередь, за счет давления в газовой фазе). Эти напряжения, как показано в разделе 2.3, приводят к разгерметизации внутренней полости.

Ситуация изменяется, если поверхность предварительно прогретого боеприпаса подвергается быстрому охлаждению. Неравномерность температурного поля по радиусу боеприпаса приводит к возникновению температурных напряжений. Величина полных напряжений может превысить предел прочности материала оболочки и, как следствие, может произойти разрыв сплошности с последующей разгерметизацией внутренней полости. Неразложившиеся токсичные вещества при этом имеют возможность проникнуть в окружающее пространство.

Вероятность разрушения оболочки химического боеприпаса может быть связана с площадью сечения, где величина полных напряжений превышает предел прочности материала оболочки. Можно предполагать, что при быстром охлаждении при прочих равных условиях увеличение времени предварительного нагрева

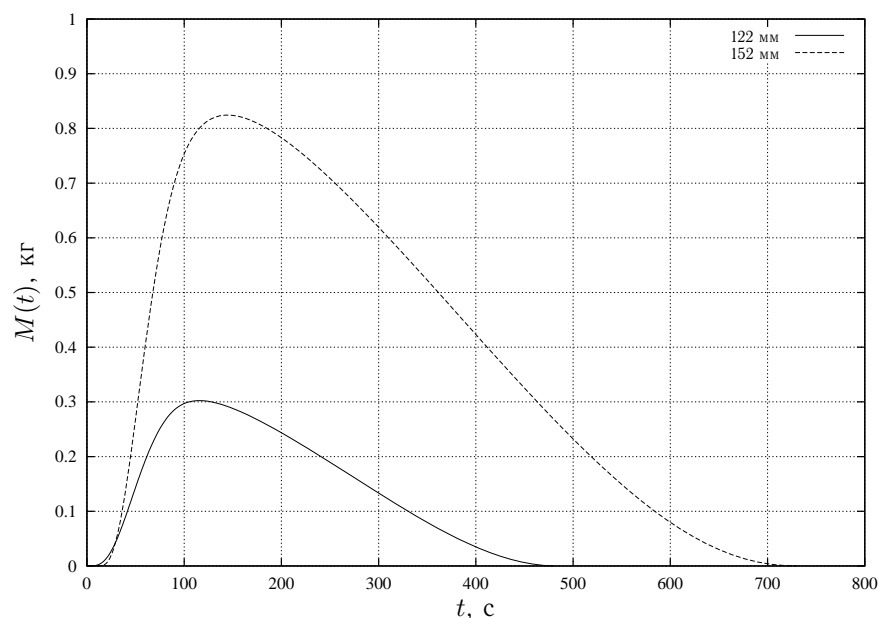


Рис. 2.4. Математическое ожидание массы отравляющего вещества, оставшегося в химических боеприпасах калибра 152 мм и 122 мм на момент разгерметизации

химического боеприпаса приведет к увеличению вероятности разрушения оболочки: с увеличением времени нагрева увеличивается давление в газообразных продуктах реакции деструкции во внутренней полости боеприпаса.

Изменение величины полных напряжений во времени, момент нарушения герметичности, а следовательно, масса вещества, оставшаяся в химическом боеприпасе на момент разгерметизации, зависят от характеристик боеприпаса, от динамики изменения температурного поля в боеприпасе. При прочих равных условиях масса отравляющих веществ, находящихся в химическом боеприпасе на момент разгерметизации, будет уменьшаться при увеличении времени предварительного нагрева боеприпаса.

Возможность возникновения источника токсической опасности при тушении пожара особенно значима для химических боеприпасов, начиненных заринном. Предварительный нагрев боеприпасов, начиненных заринном, не приводит к возникновению источника токсической опасности, в отличие от боеприпасов, начиненных зоманом и Ви-газом. Однако при быстром охлаждении оболочки химического боеприпаса с заринном возможно разрушение оболочки.

Например, на рис. 2.4 представлена зависимость математического ожидания массы отравляющего вещества, оставшегося в боеприпасе на момент нарушения герметичности, от времени предварительного нагрева. При моделировании условий нагрева боеприпаса в пламени предполагалось, что после предварительного нагрева температура поверхности оболочки мгновенно достигает величины 100°C .

Функция математического ожидания массы отравляющего вещества имеет максимальное значение для каждого типа боеприпасов. Прогноз функции математического ожидания позволяет определять условия безопасного тушения пожара на объектах с наличием боевых отравляющих веществ.

2.5. Заключительные замечания

В данной части работы представлены модели возникновения источников химической опасности при авариях на объектах с наличием боевых отравляющих веществ. Рассматриваются сценарии теоретически возможных аварий, представляющих опасность для населения близлежащих населенных пунктов. Причем анализируются механизмы возникновения химической опасности на временах порядка часа, то есть механизмы возникновения химической опасности, значимые с точки зрения долгосрочных последствий аварий, не анализируются.

Необходимо отметить, что при изложении всех рассматриваемых здесь вопросов авторы не пытались дать исчерпывающий обзор проведенных исследований и довести модели до инженерных методик. Акцент был сделан, прежде всего, на возможность проведения реалистичной количественной оценки последствий химических аварий.

Моделирование начальной стадии распространения аварийных воздействий

Распространение субстанции (массы, энергии), освободившейся при аварии и несущей опасность для реципиента риска, то есть распространение аварийного воздействия, описывается соответствующими математическими моделями. Аварийные воздействия, как правило, передаются через абиотические среды (воздушную среду, почву, водную среду). Наиболее динамичной средой является воздушная среда. Поэтому, если временной масштаб прогнозирования ограничен временами порядка часа, то для большинства аварийных сценариев наиболее значимым процессом является передача воздействия через воздух.

В настоящей главе приведены примеры построения математических моделей, описывающих начальные стадии распространения аварийных воздействий в воздушной среде. Выделение начальной стадии распространения аварийного воздействия оправдано в случае, если процесс на разных временных интервалах описывается различными моделями. При этом результаты моделирования на начальной стадии распространения выполняют роль краевых условий для уравнений математических моделей более поздних стадий. В частности, результаты моделирования начальной стадии аварийного воздействия могут определять краевые условия для модели турбулентного рассеяния примеси в пограничном слое атмосферы, описанной в следующей главе.

3.1. Модель воздействия ударной волны взрыва

При взрыве газоздушных облаков или твердых веществ в результате протекания быстрых химических реакций за короткий промежуток времени выделяется большое количество энергии. Вследствие этого в окружающем пространстве формируется ударная волна, распространяющаяся с большой скоростью. Воздушная ударная волна характеризуется избыточным давлением $\Delta p = p - p_0$, где p — давление на фронте ударной волны, p_0 — давление перед распространяющимся фронтом. Воздействие избыточного давления на фронте ударной волны приводит к поражению людей и механическому повреждению объектов¹.

Реакция человека (реципиента риска) на воздействие ударной волны описывается функцией ущерба, которая численно равна вероятности поражения человека при воздействии на него избыточного давления. Пример определения функции ущерба U представлен в разделе 1.3 выражением (1.3.10). Согласно (1.3.10), при

¹В написании раздела принимал участие Д. А. Данилов

величине избыточного давления $\Delta p = 100$ кПа вероятность гибели человека равна $U = 1$, при $\Delta p = 70$ кПа вероятность гибели равна $U = 0,5$.

Для оценки последствий воздействия избыточного давления на фронте ударной волны на состояние техногенных объектов используется зависимость между перепадом давления на фронте волны и ожидаемой степенью разрушения. Эта зависимость является обобщением данных по анализу последствий различных аварий, сопровождавшихся взрывом.

3.1.1. Точечный взрыв. Рассмотрим модель точечного взрыва в однородной атмосфере с противодавлением [40, 51–55]. Модель может быть использована для расчета параметров ударной волны при взрыве конденсированных веществ. Данная модель предполагает, что выделение энергии при взрыве происходит за короткий промежуток времени в относительно небольшой области пространства.

Законы сохранения массы, импульса и энергии приводят к системе уравнений, описывающих движение газа при точечном взрыве:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial r} + \rho \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{2\rho u}{r} = 0, \quad (3.1.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad (3.1.2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial r} + \gamma p \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{2\gamma p u}{r} = 0. \quad (3.1.3)$$

Здесь безразмерные переменные t, r, ρ, p, u связаны с размерными переменными, обозначенными штрихом, следующими соотношениями:

$$t = \frac{t'}{t_0} \alpha_0^{1/3}, \quad r = \frac{r'}{r_0} \alpha_0^{1/3}, \quad \rho = \frac{\rho'}{\rho_1}, \quad p = \frac{p'}{p_1}, \quad u = \frac{u'}{c_1} \sqrt{\gamma}, \quad (3.1.4)$$

где t' — время, r' — пространственная (радиальная) координата, ρ' — плотность, p' — давление, u' — компонента вектора скорости в радиальном направлении, $r_0 = (E_0/p_1)^{1/3}$ — динамическая длина, $t_0 = r_0(\rho_1/p_1)^{1/2}$ — динамическое время, $\alpha_0 = 0,851$, $\gamma = 1,4$ — показатель адиабаты, E_0 — энергия, выделяющаяся при взрыве, p_1, ρ_1 и c_1 — давление, плотность и скорость звука невозмущенного газа. Граничное условие в центре ($r = 0$) имеет вид $u = 0$. Граничное условие на фронте ударной волны ($r = \varphi(t)$):

$$p = \frac{1}{4} \left[(\gamma + 1)u^2 + u \sqrt{(\gamma + 1)^2 u^2 + 16\gamma} \right], \quad (3.1.5)$$

$$\rho = \frac{(\gamma + 1)p + (\gamma - 1)}{(\gamma + 1) + (\gamma - 1)p}, \quad (3.1.6)$$

$$D = \left[\frac{(\gamma + 1)p + (\gamma - 1)}{2} \right]^{1/2}, \quad (3.1.7)$$

где D — скорость ударной волны.

Численное решение данной задачи подробно рассмотрено в работе [40]. На рис. 3.1 представлена зависимость безразмерного давления p от безразмерного расстояния r (см. уравнения (3.1.4)) на фронте ударной волны при точечном взрыве [40].

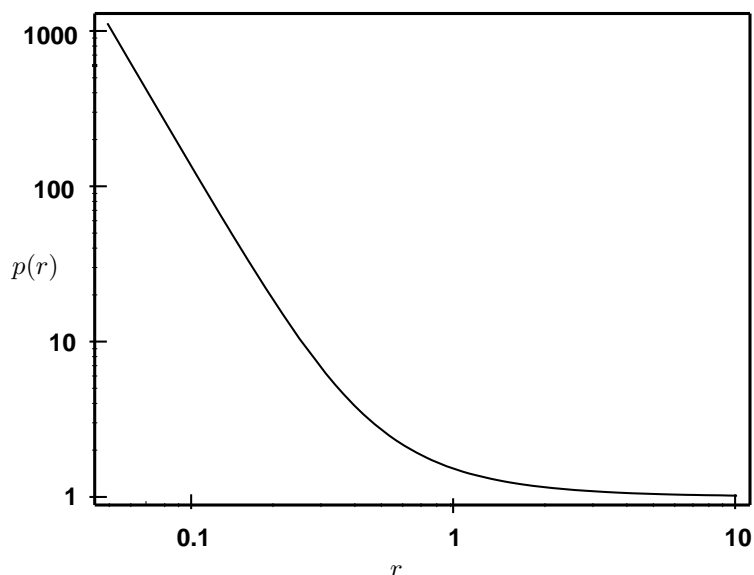


Рис. 3.1. Зависимость безразмерного давления p от безразмерного радиуса r

Зависимость давления на фронте ударной волны от расстояния до точки взрыва позволяет прогнозировать области разрушений и степень поражения людей по мере удаления от эпицентра взрыва. В табл. 3.1 приведены некоторые значения избыточного давления, отвечающие высокой, средней и низкой степени разрушения. Сведения, представленные в табл. 3.1, в основном, отвечают обработке экспериментальных данных по разрушению соответствующих объектов (фактически представлены математические ожидания перепадов давлений, соответствующие определенной степени разрушения). Информация по избыточному давлению, отвечающему разрушению объектов, дополнена экспертными оценками.

3.1.2. Взрыв газозвушной смеси. Одним из основных факторов, характеризующих горение газозвушной смеси, является давление в волне сжатия, образующейся при горении смеси. Как показывают работы по численному моделированию поля давления при горении сферического объема газовой смеси, ударная волна с амплитудой порядка 1 атм и выше начинает формироваться только при видимой скорости пламени более 250 м/с [19, 56]. Наибольшая амплитуда волны достигается при детонации смеси, когда обеспечивается максимальная скорость выделения энергии. Спрогнозировать значение скорости горения газовой смеси в каких-либо, даже предварительно заданных условиях, затруднительно.

Для большинства реальных ситуаций со сложной конфигурацией поверхности земли и застроек необходимо применение эмпирических формул [19, 56, 57]. В том случае, когда конфигурация облака газозвушной смеси заранее неизвестна, целесообразно использовать оценки максимально возможных границ опасных зон.

Таблица 3.1. Избыточное давление (кг/см²), отвечающее разрушению.

Объект	Степень разрушения		
	Высокая	Средняя	Низкая
Основные промышленные сооружения	0,40–0,50	0,30–0,40	0,20–0,30
Складские здания (кирпичная кладка)	0,30–0,40	0,20–0,30	0,10–0,20
Небольшие промышленные здания	0,40–0,60	0,20–0,40	0,10–0,20
Линии электропередач высокого напряжения	0,80–1,20	0,50–0,70	0,30–0,50
Трубопроводы, заглубленные в землю на глубину не менее 20 см	—	2,50–3,50	—
Деревянные одноэтажные здания	0,12–0,20	0,08–0,12	0,06–0,08
Одно- двухэтажные каменные здания	0,25–0,35	0,15–0,25	0,08–0,15
Отдельно стоящие деревья (средняя высота 20-24 м, диаметр 18-27 см)	—	0,10–0,15	—
Лесной массив (средний возраст деревьев 45-50 лет, средняя высота 20-24 м, диаметр 18-27 см)	—	0,05–0,10	—

Хотя такие оценки всегда дают завышенные степени опасности, тем не менее, расчет безопасных расстояний чаще всего производится на основании максимально возможных (детонационных) скоростей сгорания.

Так как в самом облаке проявляется не только механическое, но и термическое воздействие, то обычно при оценке степени возможных механических разрушений рассматривается область вне газовоздушного облака. Внутри облака ударные волны обычно достигают амплитуды нескольких атмосфер и приводят к большим разрушениям. Вне облака воздействие газового взрыва определяется скоростью выделения энергии при взрыве и абсолютной величиной энергии (энергией взрывного превращения), запасенной в смеси. В общем случае, на параметры генерируемых при детонации воздушных ударных волн влияют размеры области, занимаемой горючей смесью, ее состав и течение за фронтом детонационной волны.

Так как в большинстве реальных случаев форма образующегося при аварии газового облака неизвестна, для оценки последствий взрыва примем, что облако взрывоопасной газовой смеси сферически-симметрично и находится в свободной атмосфере. При оценке параметров взрыва полусферического облака у поверхности земли полагают, что такой взрыв аналогичен взрыву сферического облака с удвоенной энергией взрывного превращения [56].

Рассмотрим математическую модель взрыва сферического газового облака. Пусть газовая смесь заполняет сферическую область радиусом r_0 . По смеси распространяется одномерная сферическая детонационная волна. Инициирование происходит мгновенно в центре области, занимаемой горючей смесью. Эта задача описывается системой одномерных нестационарных уравнений газовой динамики

в сферических координатах в переменных Лагранжа:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -r^2 \frac{p}{M}; & \frac{\partial E}{\partial t} &= -\frac{\partial(pur^2)}{\partial M}; \\ v &= r^2 \frac{\partial r}{\partial M}; & E &= U + \frac{u^2}{2}; & u &= \frac{\partial r}{\partial t}, \end{aligned} \quad (3.1.8)$$

где t — время, M — массовая лагранжева координата, r — эйлерова координата, p , v , u — давление, удельный объем и скорость продуктов детонации, U , E — внутренняя и общая энергия продуктов детонации. Для продуктов детонации U — сумма тепловой и химической (потенциальной) энергии. Изменение внутренней энергии в зависимости от степени реагирования задается в виде

$$U = \varphi U_p + (1 - \varphi) U_a,$$

где φ — массовая доля, U_p — удельная внутренняя энергия непрореагировавшей исходной смеси, U_a — удельная внутренняя энергия продуктов детонации. Для замыкания системы (3.1.8) необходимо уравнение состояния исходной смеси, продуктов сгорания и воздуха, а также соотношение для скорости реагирования смеси в зоне реакции пересжатой детонационной волны, которые могут быть получены из термодинамического расчета [58].

Введем безразмерное расстояние $\bar{R} = R/R_0$ и безразмерное избыточное давление $\bar{p} = \Delta p/p_0$ на фронте ударной волны (R — расстояние от центра взрыва, $R_0 = (E_0/p_0)^{1/3}$, $E_0 = mQ$ — энергия взрывного превращения, Q — удельная теплота взрыва газовой смеси, m — масса газового облака, Δp — избыточное давление на фронте ударной волны, p_0 — начальное давление в атмосфере). Обобщение экспериментальных данных по взрывам газозвушных смесей и результатов численного моделирования взрывов сферических газовых облаков показывает, что для параметров воздушных ударных волн, образующихся при детонации в воздухе, существует общий закон подобия [56, 57, 59, 60]. Согласно этому закону подобия, зависимость избыточного давления от расстояния в безразмерных координатах для различных составов газовой смеси и при разной массе детонирующего газа можно описать одной зависимостью $\bar{p}(\bar{R})$ с точностью до 10–15% [59]:

$$\bar{p} = 0,285 \cdot \frac{\exp(0,52 \cdot (\ln(\bar{R}))^2)}{\bar{R}^{0,9}}. \quad (3.1.9)$$

Таким образом, основным параметром, характеризующим взрыв газового облака, является энергия взрывного превращения. Влияние различных частных факторов, таких, как несферическая форма газового облака, состав смеси, приводит к разбросу в 10–15%.

При оценке последствий взрывов газозвушных облаков при авариях на промышленных объектах состав, форму и другие характеристики газового облака можно предсказать только приближенно.

Поэтому расчет избыточного давления на фронте ударной волны целесообразно проводить в зависимости от энергии взрывного превращения E_0 , рассчитывая безразмерное избыточное давление по уравнению (3.1.9).

Зависимость $\bar{p}(\bar{R})$, отвечающая уравнению (3.1.9), представлена на рис. 3.2. Из рисунка видно, что избыточное давление на фронте ударной волны уменьшается

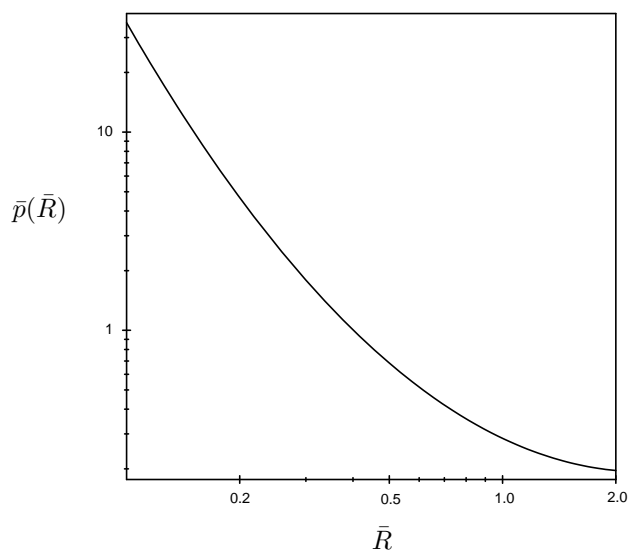


Рис. 3.2. Зависимость безразмерного избыточного давления \bar{p} от безразмерного радиуса \bar{R}

при удалении от центра взрыва. Избыточное давление на фронте ударной волны может быть связано с величиной перепада давления, отвечающего определенной степени разрушения.

3.2. Модель подъема облака нагретого газа

Рассмотрим ситуацию, при которой в атмосферу «мгновенно» поступает большой объем нагретой газовой фазы. Причем температура газовой смеси в выбросе значительно выше температуры окружающего воздуха². Указанный сценарий может реализоваться, например, при взрыве. Будем называть выброс облаком, имея в виду, что облако отличается от окружающей атмосферы составом и температурой.

Большое количество тепла, выделяемое в атмосферу «мгновенно» в результате взрыва или поступающее в течение некоторого времени при горении, вызывает возникновение атмосферной конвекции — упорядоченного движения воздуха по вертикали. Причина этого — архимедова сила, которая действует на облако, имеющее вследствие нагрева меньшую плотность по сравнению с воздухом. Конвекция приводит к тому, что выброшенная в атмосферу невесомая примесь оказывается быстро поднятой вверх и частично «размазанной» вдоль пути движения облака. Это сказывается, очевидно, на характере последующего турбулентного рассеяния примеси.

²Раздел написан совместно с А. М. Сивковым

Высота подъема облака зависит от мощности источника тепла и состояния атмосферы. Различают два вида конвекции от локального источника тепла: струйное движение воздуха и движение изолированного, почти сферического объема — облака. Струйная конвекция характерна для мощных, длительно действующих источников. Конвекция в виде облаков, «пузырей» нагретого воздуха, соответствует кратковременным выбросам тепла в атмосферу. Следует также отметить, что аналогично тому, как струя воды при длительном движении разбивается на отдельные капли, струйная конвекция в атмосфере, начиная с некоторой высоты, переходит в другую форму. Этому способствует ветер, приводящий к наклону струи, потере ею устойчивости и дроблению на отдельные объемы — облака.

3.2.1. Модель движения облака. Будем считать, что облако — это объем воздуха сферической формы, возможно, содержащий водяной пар, взвешенные капли воды и твердые частицы. Если в облаке уже имеются капли воды, то водяной пар находится с ними в равновесии, а если жидкая вода отсутствует, то конденсация пара начинается при достижении насыщения [61].

Установлено, что в поднимающемся облаке существует внутренняя циркуляция в виде вихревого кольца [62]. Будем считать, что плотность и состав воздуха постоянны во всем объеме облака. Плотность и влажность воздуха в окружающей среде на протяжении размеров облака будем считать одинаковой. Таким образом, облако в некотором смысле рассматривается как материальная точка с переменной массой.

Изменение массы облака происходит за счет следующих процессов:

- вовлечения добавочного вещества в свое движение (прежде всего воздуха и атмосферной влаги) из окружающей среды;
- выпадения дисперсного вещества (аэрозоли и взвешенные твердые частицы) под действием силы тяжести (гравитационное оседание);
- потери небольшой части газообразного вещества за счет турбулентного обмена на границе облака.

Необходимо заметить, что последнее утверждение является весьма спорным. Поясним это обстоятельство подробнее. Общепринятым подходом к расчету динамики подъема облака является предположение о доминировании подмешивания атмосферного воздуха [63, 64]. Действительно, ниже будет показано, что этот процесс доминирует, а, следовательно, динамика подъема облака с учетом только этого обстоятельства должна воспроизводиться с удовлетворительной точностью (в пределах ошибки экспериментальных измерений). Однако для адекватной оценки последствий аварий нужна информация не только о динамике подъема, стабилизации облака (объемный источник примеси) и выпадения из него взвешенных частиц, но также и интенсивности потерь пассивной (невесомой) токсичной примеси за счет турбулентного обмена.

Качественное рассмотрение процесса подъема облака горячего газа показывает, что возможны следующие механизмы турбулентного обмена. Во-первых, доминирующую роль, по-видимому, будет играть турбулентность, генерируемая самим облаком из-за значительной его температуры и скорости подъема. Именно этот процесс отвечает за интенсивное подмешивание окружающего воздуха в облако.

Во-вторых, облако поднимается не в спокойном воздухе, а в реальной атмосфере, находящейся в турбулентном состоянии. Наконец, благодаря значительным размерам и скорости, поднимающееся облако будет являться значительным возмущением для окружающего воздуха, и, следовательно, оставляя за собой турбулизированный след. В свою очередь, на турбулентную диффузию примеси будут оказывать влияние все механизмы образования турбулентности [65]. Таким образом, качественный анализ показывает, что возможна потеря части газообразного вещества облака с образованием загрязненного примесью следа облака.

Примем, что потоки массы различных веществ в облако и из него пропорциональны общему потоку массы и относительному содержанию соответствующего вещества в облаке или в окружающей среде.

Объем жидких капель и твердых частиц в облаке будем считать пренебрежимо малыми по сравнению с объемом газа. Для связи температуры, давления и объема газа в облаке используем уравнение состояния идеального газа. Давление внутри облака будем считать в любой момент времени равным давлению в окружающей среде.

Общепринятым является предположение, что потоки массы пропорциональны площади поверхности облака и его скорости относительно окружающего воздуха [66].

Для потока массы от среды к облаку F_1 имеем уравнение

$$F_1 = k_1 \rho_a S |\vec{u} - \vec{u}_a| \quad (3.2.1)$$

и для потока массы от облака к среде F_2 — уравнение

$$F_2 = k_2 \rho S |\vec{u} - \vec{u}_a|, \quad (3.2.2)$$

где k_1, k_2 — коэффициенты пропорциональности, ρ — плотность облака, ρ_a — плотность среды, S — площадь поверхности облака, \vec{u} — скорость облака, \vec{u}_a — скорость среды.

Наблюдения и эксперименты показывают, что в целом масса облака по мере его движения возрастает [67, 68]. Скорость изменения массы M облака подчиняется уравнению

$$\frac{dM}{dt} = F_1 - F_2. \quad (3.2.3)$$

При моделировании движения облака в лабораторных условиях (опускание капли плотной жидкости в воде) [69] и наблюдениях облаков в атмосфере [62] установлено, что по мере подъема облака его радиус меняется приблизительно по линейному закону. Вид зависимости для потоков массы, принятый в модели, автоматически гарантирует эту линейность.

Количество движения (импульс) облака меняется в результате притока массы, а с нею и импульса, из окружающей среды и в результате действия на облако архимедовой силы.

Движение облака сопровождается компенсирующими течениями обратного направления в окружающей его сплошной среде, вынужденной уступать ему место. При изменении скорости движения облака изменяется и скорость компенсирующих

течений, что увеличивает эффективную инерцию облака по отношению к ускорениям, вызванным приложенными к облаку силами. Это обстоятельство принято учитывать добавлением к массе облака так называемой «присоединенной массы».

В результате уравнение баланса импульса для облака имеет вид

$$(1 + 1/\xi) \frac{d\vec{u}}{dt} = \frac{F_1}{M}(\vec{u}_a - \vec{u}) + (1 - 1/\xi)\vec{g}, \quad (3.2.4)$$

где ξ — относительная плотность облака (отношение плотности облака к плотности среды), t — время, \vec{g} — ускорение свободного падения.

Температура облака меняется со временем в результате:

- адиабатического расширения газа при изобарическом подъеме облака вверх (давление внутри облака считается в любой момент времени равным давлению в окружающей среде, а последнее с высотой уменьшается);
- притока из окружающей среды воздуха, имеющего температуру, отличную от температуры облака, и перемешивания его с исходным веществом облака.

Кроме того, если на каком-то этапе движения облака происходят фазовые превращения воды, при расчете изменения температуры необходимо учитывать теплоту фазового перехода.

С учетом этих факторов уравнение баланса тепла для облака имеет вид

$$C_p \frac{dT}{dt} = V \frac{dp_a}{dt} + c_{pa}(T_a - T)F_1 + Q_p, \quad (3.2.5)$$

где T — температура облака, C_p — теплоемкость облака при постоянном давлении, V — объем облака, p_a — давление в облаке и среде, c_{pa} — удельная теплоемкость воздуха среды при постоянном давлении, T_a — температура атмосферы, Q_p — скорость выделения теплоты фазового перехода в облаке.

Начальные условия. Для решения системы уравнений (3.2.3)—(3.2.5) и уравнения для радиус-вектора центра облака

$$\frac{d\vec{X}}{dt} = \vec{u}$$

необходимо задание метеорологических условий (изменение температуры и скорости ветра с высотой, а также изменение угла поворота ветра с высотой, которые могут быть определены по модели пограничного слоя, представленной в разделе 4.4) в окружающей среде и начальных условий: $Z = Z_0$, $\vec{u}_0 = 0$, $\xi = \xi_0$ (здесь Z_0 — положение центра облака в начальный момент).

Начальный диаметр облака после детонации взрывчатого вещества на поверхности земли можно оценить, предполагая, что продукты взрыва расширяются до выравнивания давления внутри облака с атмосферным давлением [64]:

$$D_0 = \left(\frac{6}{\pi} \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{E_0}{p_a} \right)^{1/3}, \quad (3.2.6)$$

где $\gamma = 1,4$ — показатель адиабаты воздуха.

Начальное отношение плотности вещества в облаке (стабилизированном огненным шаром) к плотности окружающего воздуха можно принять $\xi_0 = 0,126$ [64].

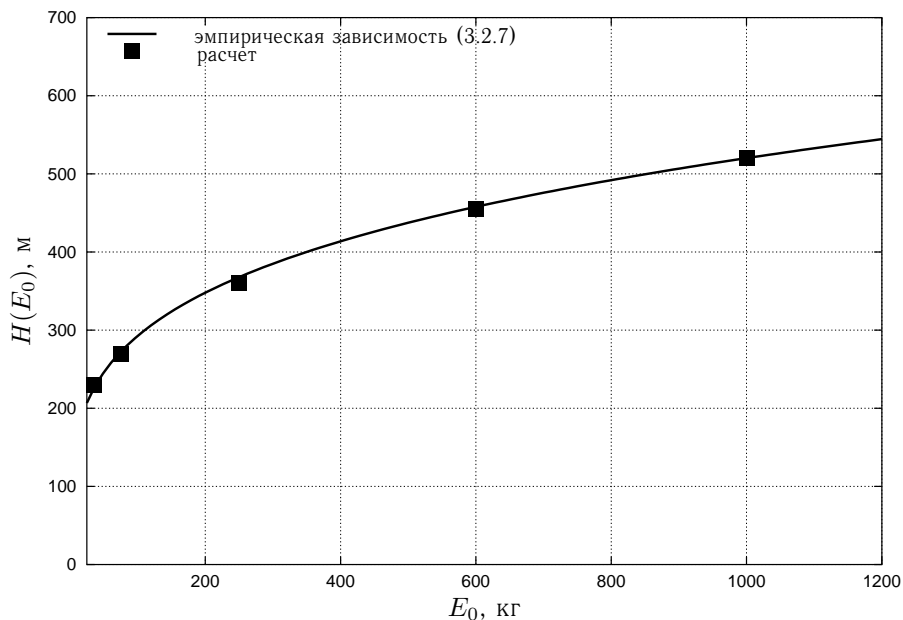


Рис. 3.3. Зависимость высоты подъема вершины облака H от массы взрывчатого вещества в тротиловом эквиваленте E_0

3.2.2. Тестирование модели. Для тестирования модели использовались описанные в [64] экспериментальные данные по динамике подъема облака нагретого газа, образовавшегося при взрыве.

В этих опытах на поверхности земли производились взрывы зарядов тринитротолуола с массой от 53,5 до 1270 кг с последующим наблюдением за подъемом образующегося облака. На основании регрессионного анализа результатов этих опытов было получено выражение для высоты вершины облака через 2 минуты после взрыва

$$H = 92,5 \cdot E_0^{1/4}, \quad (3.2.7)$$

где H — высота вершины в метрах, E_0 — масса взрывчатого вещества в тротиловом эквиваленте.

Сопоставление результатов расчетов, отвечающих эмпирическому выражению (3.2.7), с результатами, полученными при моделировании движения облака (стандартное состояние атмосферы), представлено на рис. 3.3. Наилучшее соответствие имеет место при $k_1 = 0,236$ и $k_2 = 0,036$. Сопоставление коэффициентов k_1 и k_2 показывает, что потери газообразного вещества в результате турбулентного обмена на порядок меньше, чем приток атмосферного воздуха в облако в результате подмешивания.

На рис. 3.4 приведены результаты наблюдений движения облака в атмосфере с устойчивой стратификацией (по Тернеру) при взрыве 63,5 кг тринитротолуола и результаты моделирования.

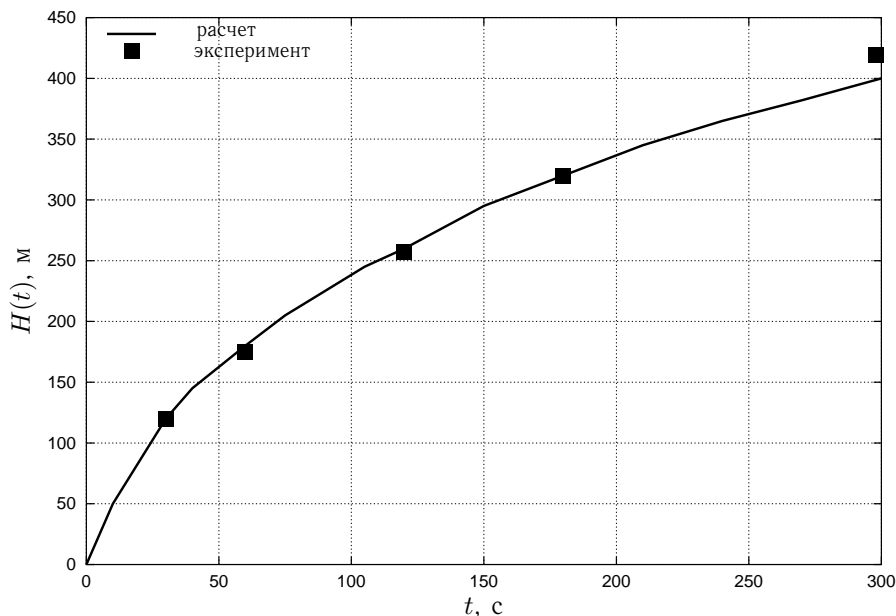


Рис. 3.4. Зависимость высоты подъема вершины облака H при взрыве от времени

Сопоставление результатов моделирования и результатов экспериментов показывает удовлетворительное согласие, следовательно, модель может быть использована для целей прогнозирования.

Результатами расчета подъема облака нагретого газа по вышеописанной модели являются:

- стабилизировавшееся на большой высоте облако, представляющее собой одномоментный объемный источник токсичной примеси;
- вертикально-неоднородный, загрязненный газообразной токсичной примесью след облака, представляющий собой нестационарный объемный источник примеси;
- вертикально-неоднородный, загрязненный оседающей дисперсной примесью след облака, представляющий собой нестационарный объемный источник примеси.

3.3. Модель пролива в технологическом помещении

Данный раздел посвящен моделированию процесса загрязнения воздушной среды при аварийном разливе токсичной жидкости. Для рассматриваемой аварийной ситуации источник опасности будет обусловлен испарением токсичной жидкости и поступлением ее паров в воздушную среду. Поражающим фактором в этом случае является токсическое воздействие, определяемое концентрацией, временем и способом воздействия (ингаляционное, контактное и т. д.). Характеристики источника опасности, следовательно, и последствия аварийного пролива жидкости

зависят от условий аварии. При прогнозировании обычно выделяют случай испарения жидкости с открытой поверхности непосредственно в атмосферу и случай испарения в замкнутом вентилируемом пространстве — технологическом помещении.

3.3.1. Модель испарения. В общем случае задача испарения жидкости в газовую среду, состоящую из ее паров и инертного газа (в данном случае воздуха), является задачей сопряженного тепло- и массопереноса. Специфика боевых отравляющих веществ такова, что их летучесть, а следовательно, и скорости испарения малы (табл. 2.1). В этом случае процесс испарения можно считать изотермическим и, соответственно, процесс испарения может быть рассмотрен в терминах массопереноса.

Для достаточно простых геометрических схем, задача испарения может решаться с использованием трехмерных уравнений движения жидкости [70]. Сложная система вентиляции и внутренняя конфигурация помещения формируют сложные и многообразные воздушные потоки, не соответствующие какой-либо стандартной схеме движения (например, схеме движения воздуха в пограничном слое или схеме течения в канале). Кроме того, в практических расчетах затруднительно учесть всю необходимую информацию о конфигурации воздушного пространства, требуемую для детального газодинамического расчета. Поэтому погрешность описания геометрической схемы задачи, погрешность аппроксимации и погрешность вычислений могут существенно обесценить результаты расчетов.

Следовательно, для относительно небольших помещений (линейный размер которых порядка нескольких десятков метров) представляется целесообразным использовать метод, связанный с рассмотрением интегрального баланса массы в помещении. В качестве модели диффузионного отвода вещества может быть использован метод равнодоступной поверхности, описывающий массообмен, характеризуемый числом Шервуда (в данном случае равно числу Нуссельта). Практическая применимость такого подхода хорошо известна [71, 72]. Кроме того, в настоящее время созданы модели, позволяющие связать число Нуссельта с параметрами вентиляционной системы.

Согласно методу равнодоступной поверхности [73], поток вещества, отводимый от поверхности молекулярной или турбулентной диффузией, может быть выражен как

$$J^d = \beta (c_s - c), \quad (3.3.1)$$

где $\beta = Nu \cdot D/d$ — коэффициент массопередачи, Nu — критерий (число) Нуссельта, D — коэффициент молекулярной диффузии примеси в воздухе, c , c_s — концентрация пара в объеме и в непосредственной близости от поверхности разлития соответственно, d — характерный размер.

В случае испарения с зеркала пролива вне помещения под c понимается концентрация на бесконечном удалении от источника. По сравнению с концентрацией вблизи зеркала пролива этой концентрацией можно пренебречь. Под характерным

размером понимается линейный размер зеркала пролива. При испарении в объеме замкнутого пространства под c понимается средняя концентрация вещества в помещении, а под характерным размером — характерный размер помещения.

С целью верификации модели рассмотрим выражение для скорости испарения с открытой поверхности. После чего модифицируем выражение применительно к условиям замкнутого пространства.

Примем, что, во-первых, жидкость находится в тепловом равновесии со своим окружением и ее температура равна температуре подложки во время испарительного эпизода. Во-вторых, пары жидкости ведут себя в среде как пассивная примесь к воздуху. Наконец, подложку можно считать поверхностью, непроницаемой для жидкости. В действительности же, практически любая поверхность имеет поры, а, следовательно, часть жидкости будет просачиваться в подложку, что необходимо учитывать при малых объемах проливов.

В стационарном или квазистационарном состоянии скорость испарения должна быть равна скорости отвода вещества от поверхности разлития: $J = J^d$. Отсюда можно получить выражение для интенсивности стационарного испарения E_s .

Интенсивность испарения на открытой местности. Интенсивность испарения будем характеризовать нижней и верхней оценкой интенсивности. Приравнявая (2.1.7) к (3.3.1) и учитывая, что $c = 0$, получим выражение для концентрации испаряющегося вещества вблизи поверхности разлития:

$$c_s = \frac{c_v J_{max}}{\beta c_v + J_{max}},$$

где c_v — концентрация насыщенного пара. Отсюда нижняя оценка интенсивности испарения

$$E_s^{min} = \frac{\beta c_v J_{max}}{\beta c_v + J_{max}}. \quad (3.3.2)$$

Для верхней оценки скорости испарения, подставляя $c_s = c_v$ и $c = 0$ в уравнение (3.3.1), получим

$$E_s^{max} = \beta c_v. \quad (3.3.3)$$

Для оценки критерия Нуссельта может быть использована, например, эмпирическая зависимость, приведенная в работе [74]:

$$Nu = 4,54 \cdot \begin{cases} 0,54\sqrt{Re}, & \text{при } Re > 200, \\ 2(1 + 0,08Re^{2/3}), & \text{при } Re \leq 200, \end{cases} \quad (3.3.4)$$

где $Re = du\rho/\mu_B$ — число Рейнольдса, u — скорость набегающего воздушного потока, ρ — плотность воздуха, μ_B — вязкость воздуха.

Заметим, что уравнение (3.3.2) дает физически верную асимптотику скорости испарения при больших числах Рейнольдса:

$$\lim_{Re \rightarrow \infty} E_s^{min} = J_{max}, \quad (3.3.5)$$

т. е. скорость испарения в вакуум, тогда как выражение (3.3.3) предсказывает бесконечное увеличение интенсивности испарения, что, естественно, физически некорректно.

Интенсивность испарения внутри помещений. Аналогично могут быть получены оценки интенсивности испарения в помещении:

$$E_s^{min} = \frac{\beta c_v J_{max}}{\beta c_v + J_{max}} \left(1 - \frac{c}{c_v}\right), \quad (3.3.6)$$

$$E_s^{max} = \beta c_v \left(1 - \frac{c}{c_v}\right), \quad (3.3.7)$$

где c — средняя концентрация токсичной примеси в объеме помещения.

Предполагая произвольную внутреннюю конфигурацию помещения и отсутствие выделенного направления воздушных потоков в помещении, целесообразно положить, что турбулентные пульсации распределены равномерно по всем направлениям. Для изотропной турбулентности единственной характеристикой интенсивности является параметр ϵ — средняя скорость диссипации турбулентной энергии в единице объема.

Параметр ϵ связан с оценкой интенсивности турбулентного массопереноса. Так, в работе [75] получены следующие зависимости критерия Нуссельта от ϵ :

$$Nu_1 = 0,04 (\epsilon d^4 / \nu^3)^{0,302} Pr^{1/2}, \quad (3.3.8)$$

$$Nu_2 = 0,265 (\epsilon d^4 / \nu^3)^{1/4} Pr^{1/2}, \quad (3.3.9)$$

где ν — молекулярная кинематическая вязкость воздуха, $Pr = \nu/D$ — число Прандтля.

Оценки числа Нуссельта, согласно [75], для ряда значений ϵ и фиксированных величин остальных параметров ($d = 6$ м, $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $Pr = 1$ и $T = 293$ К) представлены в табл. 3.2.

$\epsilon/\rho, \text{ м}^2/\text{с}^3$	$Re, 10^4$	Nu_1	Nu_2
10^{-5}	7,4	253	360
10^{-4}	17,4	507	640
10^{-3}	40,2	1015	1138
10^{-2}	93,0	2040	2030

Таблица 3.2. Оценки критерия Нуссельта для ряда значений параметра ϵ .

Исходя из предположения, что механическая энергия вводимой вентиляционной струи полностью переходит в энергию турбулентных пульсаций [75]:

$$\epsilon = \frac{1}{2} \rho_\infty (W/S_0)^2 / (V/W), \quad (3.3.10)$$

где ρ_∞ — плотность воздушной среды в вентиляционной системе, W — объемный расход вентиляции, S_0 — площадь входных сечений вентиляционной системы.

Все рассчитанные значения Nu довольно близки по значению. Наибольшее расхождение, не превышающее 30%, имеет место при $\epsilon/\rho = 10^{-5}$. Поэтому в тех случаях, когда структура турбулентности не подходит ни под один из хорошо изученных стандартов турбулентных движений, можно использовать любую из этих формул. Необходимая для расчетов оценка величины ϵ может быть получена, исходя из предположения, что механическая энергия вводимой вентиляционной струи полностью переходит в энергию турбулентных пульсаций [75]:

Таблица 3.3. Скорость испарения н-бутана ($\text{г}/\text{м}^2\text{с}$) при различной температуре и подвижности воздуха.

T_l , К	T_r , К	u , м/с	E_s^{exp}	E_s^{min}	ΔE , %	E_s^{max}	ΔE , %
236	287	5,5	7,2	7,974	11	8,190	14
236	282	0,5	2,0	2,413	21	2,433	22
236	289	3,9	5,5	6,781	23	6,937	26
237	283	2,0	3,7	5,026	36	5,107	38
239	275	4,0	5,6	7,542	35	7,706	38
241	291	1,6	3,9	5,504	41	5,583	43
248	291	1,4	4,6	6,932	51	7,020	53

Примечание. Введены следующие обозначения: T_l — температура жидкости, T_r — температура воздуха, u — скорость набегающего потока, ΔE — относительная погрешность.

Тестирование модели испарения. В целях аттестации моделей были проведены расчеты скорости стационарного испарения н-бутана с открытой поверхности пролива. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными. Использование н-бутана для аттестации моделей испарения обусловлено тем, что процесс испарения н-бутана хорошо изучен экспериментально. Расчеты скорости испарения по формулам (3.3.2) и (3.3.3) с учетом соотношений (3.3.4) для н-бутана приведены в табл. 3.3. Результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными в пределах относительной погрешности 11-53%.

Расхождение увеличивается по мере увеличения температуры жидкости, т. е. при приближении к точке кипения (272,5 К), когда сказываются эффекты, обусловленные стефановским потоком [73], что не учтено в рассматриваемой модели. Кроме того, при достаточно больших скоростях испарения предположение о возможности пренебречь значением концентрации примеси вдали от поверхности разлива может оказаться неверным. Различие температур жидкости и набегающего воздушного потока также может внести определенный вклад в погрешность. Однако то обстоятельство, что расчетные данные превышают экспериментальные значения, дает определенный запас надежности при практическом использовании модели. Следовательно, модель испарения может быть использована, если указанная точность модели удовлетворяет целям прогнозирования.

Отметим, что модель испарения [74], построенная на базе теплового баланса для того же экспериментального набора, дает максимальную погрешность в 28%. Кроме того, результаты модельных расчетов испарения с пористой подложки (песок и бетон) по одномерной диффузионной модели [71] согласуются с соответствующими экспериментами в пределах погрешности в 33-45%. Довольно большой разброс экспериментальных и расчетных данных обусловлен, по-видимому, эффектами, которые не учитываются одномерной моделью испарения.

Были также проведены расчеты интенсивностей испарения некоторых фосфорорганических боевых отравляющих веществ с использованием различных полумпирических моделей, применяемых в практике прогнозирования химических

Таблица 3.4. Интенсивность испарения некоторых ОБ ($\text{г}/\text{м}^2\text{с}$) при различной температуре и подвижности воздуха (давление 0,83 атм).

ОБ	Модель	$u=0,69 \text{ мм/с}$		$u=0,03 \text{ м/с}$		$u=3 \text{ м/с}$	
		$T=293 \text{ К}$	$T=298 \text{ К}$	$T=298 \text{ К}$	$T=339 \text{ К}$	$T=298 \text{ К}$	$T=339 \text{ К}$
Зарин	[20]	$1,98 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,45 \cdot 10^{-1}$	$1,95 \cdot 10^{-1}$	1,68	
	[38]	$3,23 \cdot 10^{-3}$	$0,4 \cdot 10^{-2}$	$0,69 \cdot 10^{-1}$	$0,15 \cdot 10^{-1}$	0,21	
	[76]	$0,11 \cdot 10^{-4}$	$0,1 \cdot 10^{-2}$	$0,08 \cdot 10^{-1}$	$0,67 \cdot 10^{-1}$	0,83	
	[77]	$2,62 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$5,57 \cdot 10^{-1}$	$1,25 \cdot 10^{-1}$	1,79	
	(3.3.2)	$1,58 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,60 \cdot 10^{-1}$	$0,76 \cdot 10^{-1}$	0,90	
	(3.3.3)	$1,60 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$1,75 \cdot 10^{-1}$	$1,39 \cdot 10^{-1}$	1,75	
Зоман	[20]	—	—	—	—	—	—
	[38]	$7,72 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-3}$	$6,83 \cdot 10^{-3}$	$3,13 \cdot 10^{-3}$	$2,08 \cdot 10^{-2}$	
	[76]	$2,58 \cdot 10^{-5}$	$1,44 \cdot 10^{-4}$	$8,44 \cdot 10^{-4}$	$1,44 \cdot 10^{-2}$	$8,29 \cdot 10^{-2}$	
	[77]	$6,25 \cdot 10^{-3}$	$8,34 \cdot 10^{-3}$	$5,54 \cdot 10^{-2}$	$2,68 \cdot 10^{-2}$	$1,78 \cdot 10^{-1}$	
	(3.3.2)	$3,22 \cdot 10^{-4}$	$1,72 \cdot 10^{-3}$	$1,34 \cdot 10^{-2}$	$3,84 \cdot 10^{-3}$	$5,12 \cdot 10^{-2}$	
	(3.3.3)	$3,61 \cdot 10^{-3}$	$2,81 \cdot 10^{-3}$	$1,64 \cdot 10^{-2}$	$2,81 \cdot 10^{-2}$	$1,64 \cdot 10^{-1}$	
Ви-газ	[20]	$8,75 \cdot 10^{-7}$	$7,71 \cdot 10^{-6}$	$1,50 \cdot 10^{-4}$	$9,98 \cdot 10^{-5}$	$1,72 \cdot 10^{-3}$	
	[38]	$3,11 \cdot 10^{-7}$	$6,52 \cdot 10^{-7}$	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$1,99 \cdot 10^{-6}$	$3,24 \cdot 10^{-4}$	
	[76]	$1,11 \cdot 10^{-9}$	$9,69 \cdot 10^{-8}$	$1,39 \cdot 10^{-5}$	$9,69 \cdot 10^{-6}$	$1,37 \cdot 10^{-3}$	
	[77]	$2,52 \cdot 10^{-6}$	$5,29 \cdot 10^{-6}$	$8,63 \cdot 10^{-4}$	$1,70 \cdot 10^{-5}$	$2,77 \cdot 10^{-3}$	
	(3.3.2)	$3,47 \cdot 10^{-9}$	$6,58 \cdot 10^{-9}$	$5,32 \cdot 10^{-7}$	$6,60 \cdot 10^{-9}$	$5,33 \cdot 10^{-7}$	
	(3.3.3)	$1,45 \cdot 10^{-7}$	$1,77 \cdot 10^{-6}$	$2,55 \cdot 10^{-4}$	$1,77 \cdot 10^{-5}$	$2,55 \cdot 10^{-3}$	

Примечание. При расчетах по методике [76] использовали скорость потока u вместо динамической скорости u_* , примененной в [76], что должно привести к значительной переоценке скорости испарения, т. к. $u_* < u$.

аварий. Результаты расчетов представлены в табл. 3.4. Сопоставление результатов, полученных в рамках различных полуэмпирических моделей испарения, затруднительно ввиду наличия в формулах эмпирических коэффициентов, вывод значений которых в методиках не представлен. Кроме того, нет полной уверенности в размерностях некоторых величин, входящих в полуэмпирические формулы. Особенно это относится к ведомственным методикам, таким, как [76].

В целом, можно отметить, что методика «ТОКСИ» [38] приводит к несколько заниженным значениям, а методика [76] неприменима при очень малых скоростях движения воздуха, поскольку прогнозирует отсутствие испарения, что связано с ориентацией модели на описание испарения в атмосфере. Для всех ОБ величины скоростей испарения из [20], рассчитанные по формуле (3.3.3) и методике [77], — величины одного порядка. Следует также отметить, что физико-химические свойства V_x , использованные в [20], несколько отличаются от свойств, принятых в настоящей работе для Ви-газа³.

Более детальное сопоставление различных моделей испарения приведены на рис. 3.5 и 3.6, где на оси абсцисс отложена средняя скорость потока над поверхностью испарения, а на оси ординат — эффективный коэффициент массопередачи

³Различие в свойствах обусловлено некоторыми различиями V_x и Ви-газа.

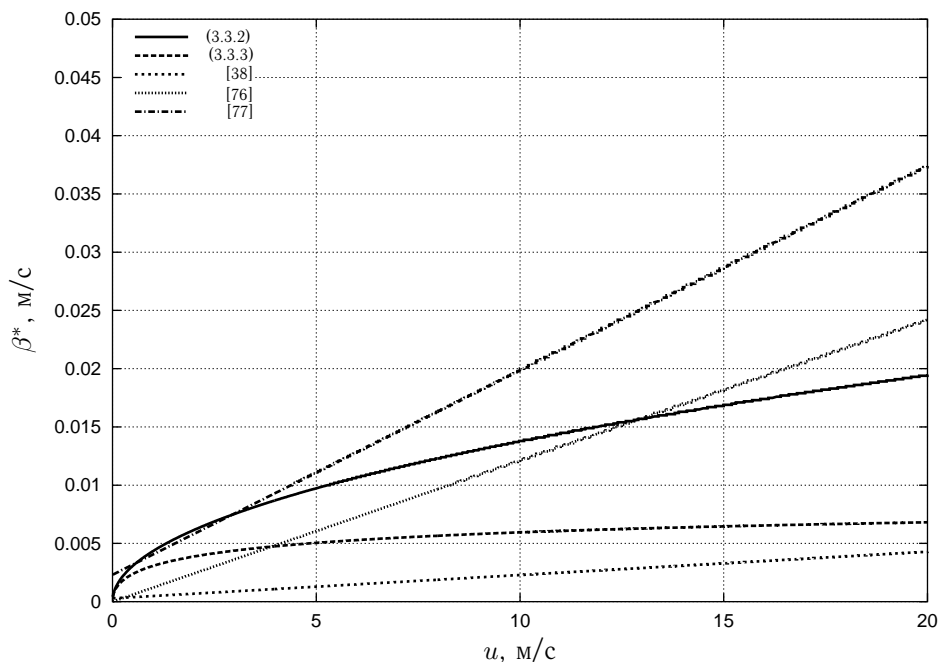


Рис. 3.5. Зависимость эффективного коэффициента массопередачи β^* от скорости потока u при испарении зарина

$\beta^* = E_s/c_s$ (при 20°C), имеющий смысл скорости отвода насыщенного пара от поверхности единичной площади.

Из рисунков видно, что прогноз скорости испарения по различным моделям имеет существенный разброс. В моделях [38, 76, 77], где скорость испарения пропорциональна скорости потока (числу Рейнольдса) в первой степени, используются существенно различные эмпирические константы. По всей видимости, это обусловлено тем, что при разработке моделей опирались на ограниченный экспериментальный набор. В диапазоне скоростей до 10 м/с расчет по выражению (3.3.3) находится между прогнозом по [76] и [77] (максимальный разброс примерно 25% для зарина и 17% для Ви-газа). Расчет скорости испарения с поверхности открытого пролива по методике «ТОКСИ» приводит к значительно меньшим оценкам, чем по (3.3.3) и [76, 77].

Отдельно следует выделить модель испарения, учитывающую кинетику молекулярных процессов у межфазной границы жидкость-пар. Анализ рисунков 3.5 и 3.6 показывает, что испарение боевых отравляющих веществ существенным образом лимитируется молекулярным процессом (см. также рассуждения на стр. 57). Наибольшее расхождение между величинами, полученными по (3.3.2) и (3.3.3), наблюдается для Ви-газа. Можно отметить, что различия в значениях возрастают по мере увеличения энтальпии испарения или увеличения взаимодействия молекул жидкости (табл. 2.1). При температурах жидкости, близких к комнатным (что

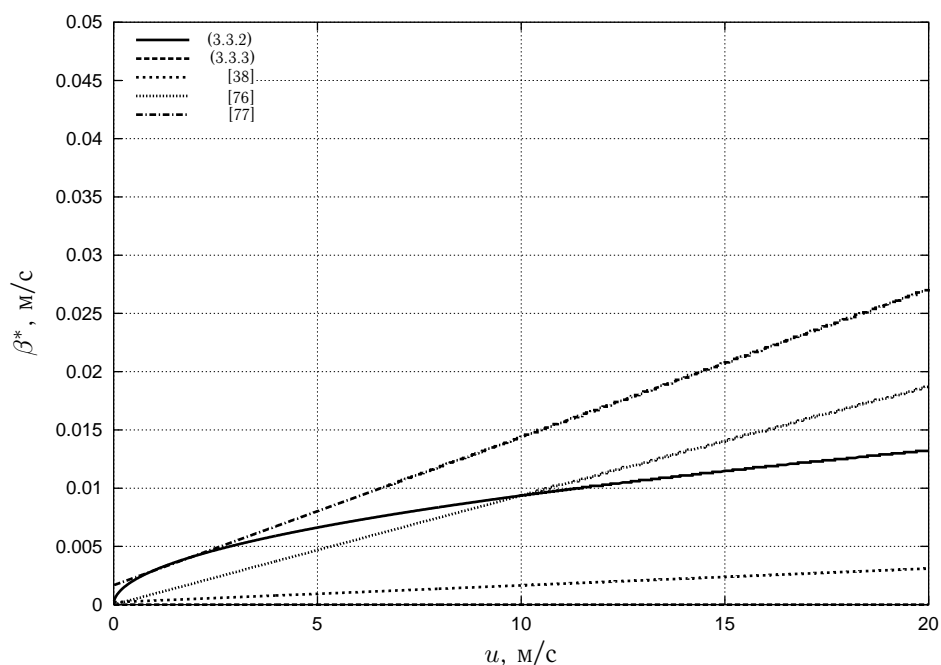


Рис. 3.6. Зависимость эффективного коэффициента массопередачи β^* от скорости потока u при испарении Ви-газа

характерно для аварий с боевыми отравляющими веществами), кинетической энергии молекул жидкости не хватает для преодоления достаточно большого потенциального барьера со стороны других молекул. Согласно молекулярно-кинетической модели (см. п. 2.1), в этом случае молекулярный поток вещества жидкость-пар достаточно мал (см. табл. 2.1). Указанное обстоятельство приводит к уменьшению скорости испарения, что нашло отражение только в молекулярно-кинетической модели. При увеличении температуры жидкости или для веществ с небольшой теплотой испарения скорость испарения в основном определяется диффузионным и конвективным (при больших температурах) отводом вещества от поверхности: различные методики расчета дают относительно близкие значения интенсивностей испарения.

Таким образом, результаты расчетов по предложенной модели испарения хорошо согласуются с экспериментальными данными. Сопоставление результатов расчета скоростей испарения, полученных по полуэмпирическим формулам для различных фосфорорганических ОВ, приводит к существенно различным значениям, особенно для веществ с относительно высокой энтальпией испарения. Исследование молекулярно-кинетической модели показывает, что пренебрежение кинетикой процессов, протекающих на межфазной границе, может приводить к значительной переоценке скорости испарения. Указанное обстоятельство требует дальнейшего изучения.

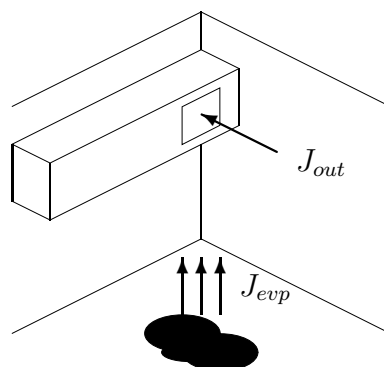


Рис. 3.7. Схема воздушных потоков в помещении

3.3.2. Модель накопления примеси в вентилируемом пространстве. Анализу подлежит случай, когда приток паров токсичного вещества в объем воздушного пространства обеспечен только процессом испарения. Сток паров обусловлен либо действием вытяжной вентиляции, либо выходом паров в окружающее пространство через «неплотности» помещения при нагнетании воздуха приточной вентиляцией. Схема потоков представлена на рис. 3.7.

Модель накопления паров токсичного вещества в помещении построена на балансе массы для всего помещения. Балансная модель широко применяется в практике расчета загрязнения воздуха в помещениях [75,78]. В частности, проводились сопоставления расчетов с измерениями для небольших помещений в присутствии химических превращений [79].

Однако необходимо подчеркнуть, что детальное моделирование процесса рассеяния примеси вблизи нескольких препятствий (технологические помещения, как правило, имеют достаточное количество таких препятствий, что создает достаточно сложную структуру турбулентности) показало, что концентрационное поле неоднородно по пространству [80]. В этой связи, результаты расчетов концентрации примеси с использованием балансной модели можно рассматривать как некоторую среднюю характеристику концентрационного поля в помещении. В то же время локальные флуктуации концентрации могут достигать значительной величины.

Уравнения баланса массы паров токсичного химического вещества и воздуха при действии приточной вентиляции имеют вид [75]

$$\begin{aligned} V \frac{dc^a}{dt} &= J_{evp} - J_{out}^a, \\ V \frac{dc^r}{dt} &= J_{in} - J_{out}^r, \end{aligned} \quad (3.3.11)$$

где $J_{evp} = E_s \cdot S$ — массовый поток примеси с поверхности испарения, S — площадь поверхности разлива, J_{in} — массовый приток чистого воздуха, a и r — индексы примеси и воздуха, соответственно, c^i — концентрация компонента в воздушной смеси ($i = a, r$), J_{out}^i — выходящий из помещения поток i -го компонента,

связанный с суммарным стоком воздушной среды J_{out} соотношением

$$J_{out}^i = \frac{c^i}{\rho_r} J_{out},$$

где ρ_r — плотность воздушной среды в помещении.

Концентрации компонентов связаны следующим соотношением:

$$\chi c^a + c^r = \rho, \quad (3.3.12)$$

где $\chi = \mu^r / \mu^a$, μ^i — молекулярный вес компонента, ρ — плотность чистого воздуха.

Продифференцировав уравнение связи (3.3.12) по времени и предполагая воздушную среду изотермической, получим выражение для суммарного стока:

$$J_{out} = \chi J_{evp} + J_{in}. \quad (3.3.13)$$

Отметим, что из-за различия молекулярных весов компонентов выходящий поток J_{out} не равен сумме входных потоков J_{evp} и J_{in} .

Подставляя (3.3.13) в систему (3.3.11), получим уравнение для средней концентрации токсичной примеси в помещении:

$$\frac{dc^a}{dt} = p_1 + p_2 c^a + p_3 (c^a)^2, \quad (3.3.14)$$

где введены обозначения: $p_1 = J_{evp}^{max} S/V$, $p_2 = -[p_1/c_v + \chi p_1/\rho_r + J_{in}/\rho_r V]$ и $p_3 = \chi p_1/(\rho_r c_v)$. Параметр J_{evp}^{max} определяется способом оценки интенсивности испарения: $J_{evp}^{max} = \beta c_v J_{max} / (\beta c_v + J_{max})$ при нижней оценке и $J_{evp}^{max} = \beta c_v$ — при верхней.

Плотность воздушной среды помещения есть сумма массовых концентраций примеси и воздуха $\rho_r = c^a + c^r$, а, следовательно, учитывая (3.3.12), получим следующее выражение:

$$\rho_r = \rho + (1 - \chi)c^a.$$

При нормальных условиях концентрация примеси не может превышать концентрацию насыщенного пара c_v^a . Среди фосфорорганических ОБ наибольшее значение c_v характерно для зарина. При температуре $20^\circ C$ и атмосферном давлении имеем:

$$\rho_r |_{c^a=c_v^a, зарин} = (1206,8 + (1 - 0,2) * 11,3) \quad \text{г/м}^3,$$

т. е. фактически максимальное изменение плотности среды не превышает 1%. Следовательно, хорошим приближением для рассматриваемого случая можно считать $\rho_r = \rho$. В общем случае (особенно при испарении, например, жидкого хлора), плотность среды является функцией концентрации агента, и уравнение (3.3.14) следует записать в другом виде.

Рассмотрим случай, когда пролив образуется в результате полного разрушения емкости с жидким химическим агентом, находящимся при температуре помещения и атмосферном давлении. Предполагаем, что разрушение происходит достаточно быстро и начальным выбросом паров в объем помещения можно пренебречь. Этот сценарий позволяет сделать верхнюю оценку типовых аварий с ОБ на объектах хранения или утилизации химического оружия. Решение уравнения (3.3.14),

удовлетворяющее начальному условию $c^a(0) = 0$, имеет вид:

$$c^a(t) = \frac{2 p_1 (e^{\sqrt{p}t} - 1)}{(p_2 + \sqrt{p}) - (p_2 - \sqrt{p}) e^{\sqrt{p}t}}, \quad (3.3.15)$$

где $p = \sqrt{p_2^2 - 4 p_1 p_3}$. При наличии газовой фазы в емкости, либо при повышенной температуре агента нужно учитывать также начальный выброс вещества в парообразном виде в объем технологического помещения. Выражения для оценки концентрации химического вещества, выбрасываемого в виде пара, могут быть определены, например, с использованием методики [38].

При действии вытяжной вентиляции уравнение (3.3.11) сохраняет вид. Заданной величиной является выходной поток J_{out} . Входной поток подлежит определению.

Продифференцировав уравнение связи (3.3.12) по времени и предполагая воздушную среду изотермической, приходим к выражению для притока чистого воздуха:

$$J_{in} = J_{out} - \chi J_{evp}. \quad (3.3.16)$$

Решение системы (3.3.11) с учетом (3.3.16) и начальным условием $c^a(0) = 0$ имеет вид:

$$c^a(t) = \frac{p_1}{p_2} (e^{p_2 t} - 1), \quad (3.3.17)$$

где $p_2 = -[p_1/\rho_r + J_{out}/\rho_r V]$, а величина p_1 определена выше.

Рассмотрим вопрос о целесообразности разделения типов вентиляционной системы. Как следует из выражений (3.3.15) и (3.3.17), при различных типах вентиляции динамика концентрационного поля примеси в помещении будет несколько различаться, причем ожидаемое отличие тем больше, чем больше скорость испарения. В свою очередь, скорость испарения зависит не только от уровня турбулентности и температуры, но также и от концентрации примеси в помещении (см. (3.3.6), (3.3.7)). Главные отличия будут обусловлены следующими обстоятельствами. Во-первых, механизм поступления воздуха при действии различных типов вентиляции несколько различен, а, следовательно, скорость диссипации турбулентной энергии также может быть несколько различной. В рамках настоящей работы предполагается, что ϵ одинакова для обоих типов вентиляции. Во-вторых, суммарный сток массы J_{out} также зависит от типа вентиляции: при действии приточной вентиляции испарение будет влиять на суммарный сток (см. выражение (3.3.13)). Очевидно, такое влияние будет тем больше, чем значительнее скорость испарения. При условии $4 p_1 p_3 \ll p_2^2$ выражение (3.3.17) переходит в (3.3.15), и динамика накопления агента в помещении идентична для приточной и вытяжной вентиляции. Рассмотрим ОВ с наибольшей скоростью испарения — зарин. Пусть $S = 1 \text{ м}^2$, $V = 1000 \text{ м}^3$, $J_{in}/V = 10/3600 \text{ с}^{-1}$, $J_{evp}^{max} = 0,1 \text{ г/м}^2\text{с}$, тогда $p_1 = 1,0 \cdot 10^{-3}$, $p_2 \approx -1,1 \cdot 10^{-5}$ и $p_3 \approx 1,5 \cdot 10^{-9}$. Отсюда $4 p_1 p_3/p_2^2 = 4,7 \cdot 10^{-3}$, т. е. при характерных скоростях испарения фосфорорганических боевых отравляющих веществ эффект различия типа вентиляции не сказывается.

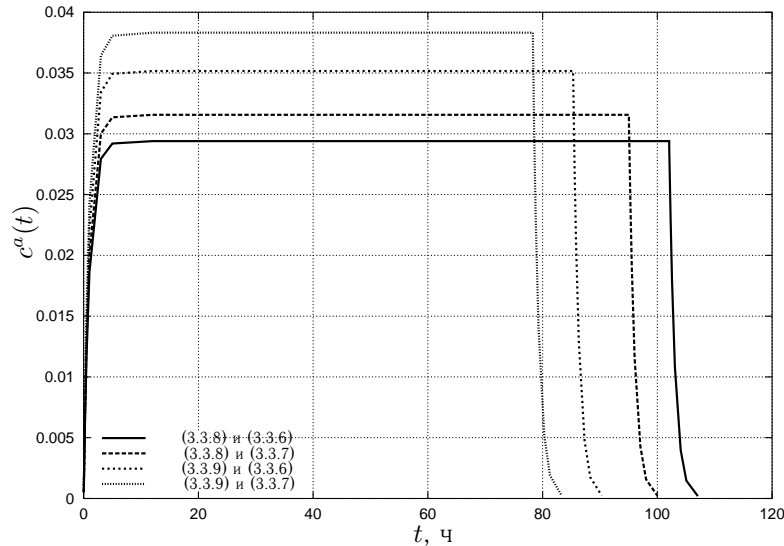


Рис. 3.8. Зависимость концентрации заразы в помещении от времени при кратности вентиляции $W/V = 1 \text{ ч}^{-1}$

Уравнение баланса массы паров токсичного агента после прекращения испарения выражается уравнением

$$V \frac{dc^a}{dt} = -c^a J_{out}/\rho_r, \text{ при } t > t_e, \quad (3.3.18)$$

где t_e — момент завершения испарения, определяемый следующим уравнением:

$$m_0 = \int_0^{t_e} J_{evp}(t) dt. \quad (3.3.19)$$

Параметр m_0 в последнем уравнении есть начальная масса пролитого вещества. Уравнение (3.3.19) может быть решено, например, итерационным методом.

Решение уравнения (3.3.18) с начальным условием $c^a(t_e) = c_e$, где c_e — концентрация примеси в помещении к моменту окончания испарения, определяемая по формуле (3.3.15) или (3.3.17), имеет вид:

$$c^a(t) = c_e \exp\left(-\frac{J_{out}}{\rho_r \cdot V} (t - t_e)\right). \quad (3.3.20)$$

Представленная модель испарения и накопления паров химического агента удовлетворительно описывает процесс испарения веществ с высокой энальпией испарения, таких, как фосфорорганические отравляющие вещества. При моделировании испарения жидкостей, кипящих при низких температурах (жидкий хлор или углеводороды), целесообразно использование модели, дополненной уравнением теплового баланса [75] и решать сопряженную задачу теплопереноса.

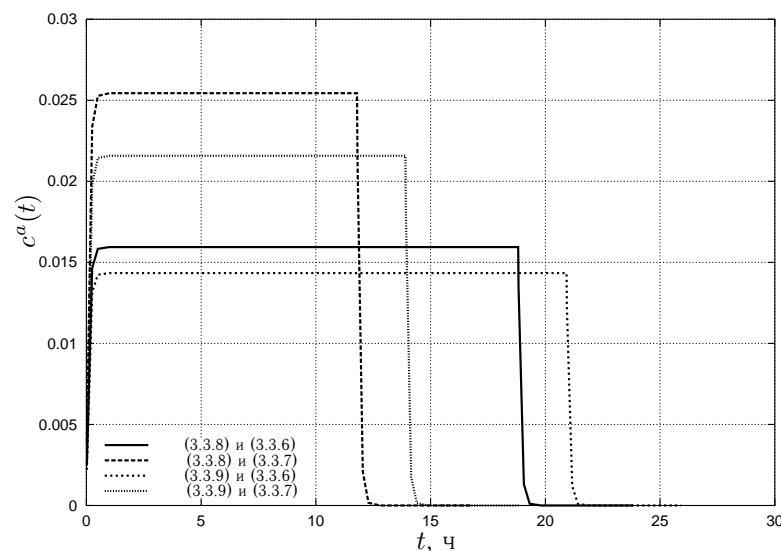


Рис. 3.9. Зависимость концентрации зарина в помещении от времени при кратности вентиляции $W/V = 10 \text{ ч}^{-1}$

3.3.3. Результаты расчетов. Некоторые из результатов расчетов представлены на рисунках 3.8 и 3.9. Все вычисления были проведены при следующих условиях протекания процесса: температура воздушной среды и поверхности токсичной жидкости, в качестве которой был выбран зарин — 293 К (20°C), площадь разлива — 1 м², масса пролива — 3 кг, объем помещения — 1000 м³.

Из рисунков хорошо видно, что использование нижней оценки интенсивности испарения вызывает увеличение прогнозируемого времени полного испарения и, соответственно, уменьшение значения средней концентрации примеси в помещении. Использование различных аппроксимаций числа Нуссельта приводит к неопределенности результата в пределах максимальной погрешности 30% (см. стр. 58). В свою очередь, увеличение кратности вентиляции вызывает уменьшение как концентрации агента, так и времени протекания процесса. Отметим, что для прогноза верхней оценки ущерба следует производить расчет при помощи формул (3.3.8) и (3.3.7). Кроме того, учитывая значительную неопределенность полученных результатов, представляется целесообразным использовать статистические методы анализа погрешности, например, метод Монте-Карло.

На рисунках 3.10 и 3.11 представлены результаты прогноза вероятности смертельного поражения персонала в случае повреждения средств защиты при проливе ОВ в технологическом помещении. При расчетах использовали следующие входные параметры: масса пролива — 3 кг, площадь зеркала испарения — 1 м², объем помещения — 12000 м³, мощность вентиляции — 50000 м³/ч. Указанные параметры моделируют аварийную ситуацию на объекте утилизации химического оружия, при которой происходит вылив ОВ из одного химического боеприпаса вследствие

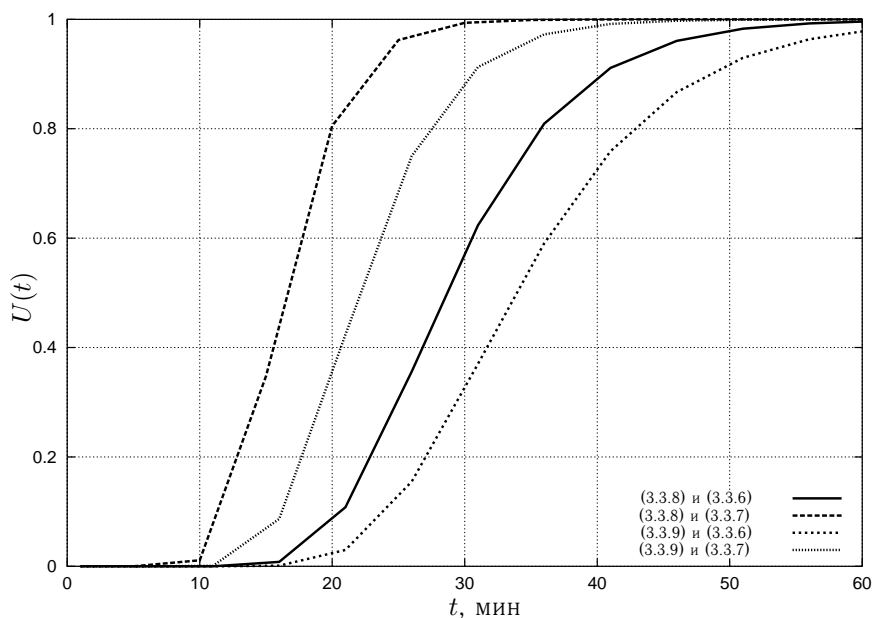


Рис. 3.10. Зависимость вероятности летального ущерба U от времени при испарении зарина

разгерметизации. Расчет вероятности летального поражения проводили по логарифмически нормальной модели (см. п. 1.3).

Из рисунка 3.10 видно, что прогноз ущерба при помощи различных параметризаций модели испарения приводит к существенному разбросу в динамике функции ущерба. При испарении зомана (см. рис. 3.11) ситуация усугубляется еще больше: прогноз по молекулярно-кинетической модели испарения дает практически нулевую вероятность смертельного поражения в течение 1,5 часов после начала испарительного инцидента. Отметим, что в рамках представленных в книге модельных представлений при проливе Ви-газа вообще не прогнозируется какого-либо летального ущерба!

Проведенные расчеты при помощи простой балансной модели накопления и нескольких физически обоснованных параметризаций процесса испарения фосфорорганических боевых отравляющих веществ показывают, что прогнозы последствий аварийных проливов ОВ различаются существенным образом. Требуют уточнения как модели испарения, используемые в практике прогноза последствий химических аварий (особенно возможность их применения к расчету испарения веществ с относительно высокой энтальпией испарения), так и допустимость применения балансного подхода, описывающего динамику накопления паров токсичного агента в замкнутом вентилируемом пространстве.

Результаты моделирования испарения токсичной жидкости в технологическом помещении позволяют прогнозировать степень поражения персонала. Кроме того,

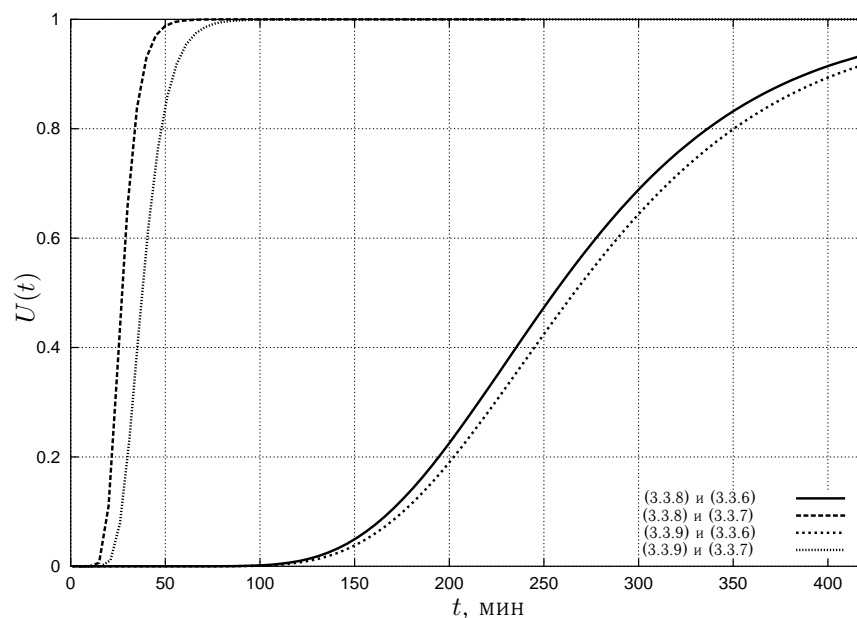


Рис. 3.11. Зависимость вероятности летального ущерба U от времени при испарении зомана

значение массового потока пара на выходе из ограниченного пространства представляет собой граничное условие III рода для решения задачи переноса токсичных веществ в атмосфере и прогнозирования уровня поражения населения.

3.4. Моделирование переноса примеси при пожаре в помещении

В данном разделе анализу подлежит стадия переноса токсичных веществ в ограниченном пространстве в условиях, характерных для пожара. Главная особенность этих условий — существенное влияние температуры газовой среды на последствия химической аварии. При высокой температуре токсичные вещества могут претерпеть различные превращения. В результате характеристики носителей химической опасности — концентрации токсичных веществ — изменяются. В частности, пары фосфорорганических отравляющих веществ могут окислиться (сгореть) в зоне, где температура газовой среды выше температуры воспламенения. Токсичные вещества могут разложиться, если они попадут в зону, где температура газовой среды выше критической для реакции деструкции, но ниже температуры воспламенения. Причем, продукты разложения могут значительно различаться по токсическим свойствам. Таким образом, в условиях повышенной температуры, характерной для пожара, масса поступившего в атмосферу токсичного вещества уменьшится. Следовательно, поток токсичного вещества, попадающий в атмосферу из горящего помещения, будет отличаться от потока, входящего в зону пожара.

Возможность образования источника химической опасности при пожаре на объекте с химическими боеприпасами, и, как следствие, возможность попадания токсичных веществ в окружающую среду, обсуждалась в разделе 2.3. Как было показано, источник токсической опасности возникает при разгерметизации внутренних полостей химических боеприпасов, начиненных фосфорорганическими отравляющими веществами, вследствие теплового воздействия на боеприпасы. Основной механизм возникновения химической аварии в условиях пожара связан с реакцией разложения отравляющих веществ и выделением газообразных продуктов реакции. При этом происходит повышение давления в газовой фазе, ограниченной объемом внутренней полости боеприпаса. При определенных условиях возможно разрушение химического боеприпаса и попадание токсичных веществ в воздушную среду. Модель образования источника химической опасности в условиях, характерных для пожара, позволяет оценить количество токсичных веществ, освобождающихся из боеприпаса.

Представленная в данном разделе модель⁴ распространения токсичных веществ в среде с высокой температурой является промежуточным звеном при определении химической опасности при пожаре. Модель ориентирована на анализ распространения фосфорорганических отравляющих веществ. Она должна ответить на вопрос — при каких условиях и какая часть вещества, освободившегося из разрушенных при пожаре химических боеприпасов, может попасть в атмосферу [81].

В условиях неоднородного температурного поля, характерного для пожара, возникает конвективное движение, обеспечивающее перенос субстанции. Течение вязкого теплопроводного газа описывается системой уравнений Навье-Стокса [82], которые, с учетом усреднения полевых характеристик по пространству, редуцируются к уравнениям Рейнольдса для средних значений скоростей:

$$\begin{aligned} \nabla \rho \vec{V} &= 0, \\ \nabla (\rho \vec{V} \vec{V}) - \nabla \mathbf{P} - \nabla \pi + (\rho - \rho_0) \vec{g} &= 0, \\ \nabla (E \vec{V}) + \nabla (\vec{V} \cdot \mathbf{P}) - \nabla (\vec{q} + \vec{q}_\gamma) - \nabla \vec{q}_\pi &= 0, \end{aligned} \quad (3.4.1)$$

где все значения переменных берутся усредненными и приняты обозначения: ρ — плотность газа, \vec{V} — вектор скорости, $E = \frac{1}{2} \rho \vec{V} \cdot \vec{V} + \rho e$ — плотность энергии, e — удельная внутренняя энергия, \mathbf{P} — тензор давлений, связанный с давлением p и тензором вязких напряжений \mathbf{S} соотношением $\mathbf{P} = p\mathbf{I} + \mathbf{S}$. Тензор вязких напряжений определен как $\mathbf{S} = -\mu [\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T] + \frac{2}{3} \mu (\nabla \vec{V}) \cdot \mathbf{I}$. Здесь \mathbf{I} — единичный тензор, μ — коэффициент динамической вязкости. Тепловой поток \vec{q} определяется законом Фурье $\vec{q} = -\lambda \nabla T$, где λ — коэффициент теплопроводности, T — температура, \vec{q}_γ — тепловой поток излучением. Тензор турбулентных напряжений Рейнольдса π и вектор турбулентного теплообмена \vec{q}_π , имеют вид:

$$\pi_{ij} = \langle V_i V_j \rangle \quad \vec{q}_\pi = \langle E V_i \rangle.$$

Для определения этих величин необходимо вводить предположения о характере возникновения турбулентности и модель переноса турбулентных характеристик.

⁴ Модель и программа разрабатывались при участии В. А. Тененева

Скобки $\langle \rangle$ означают усреднение величины по пространству. К системе уравнений (3.4.1) необходимо добавить уравнение состояния в виде $p = \rho RT$, где R — газовая постоянная.

Распределения концентраций газообразных компонентов отвечают уравнениям переноса:

$$\nabla (c_i \rho \vec{V}) = \nabla D \nabla c_i + Q_i, \quad (3.4.2)$$

где c_i — концентрация i -го компонента, D — коэффициент диффузии, Q_i — скорость производства i -го компонента.

Граничные условия для уравнений (3.4.1)–(3.4.2) определяются следующим образом:

1. На инертных (не горящих) поверхностях задаются условия равенства нулю всех компонентов скорости и граничные условия третьего рода для температуры —

$$V_x|_G = V_y|_G = V_z|_G = 0; \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_G = \alpha_k (T^* - T|_G) + q_\gamma,$$

где λ , α_N , q_γ — коэффициент теплопроводности, коэффициент теплопередачи Ньютона и лучистый тепловой поток соответственно, T^* — температура окружающей среды.

2. На горящих поверхностях и на участках поступления воздуха (при моделировании пожара в помещении) задаются нормальные компоненты скорости газа, температура и концентрации газообразных компонентов.
3. На участках выхода продуктов горения из помещения задаются величины давления и условие равенства нулю вторых производных по нормали от температуры и концентрации.

Предполагается, что массовые скорости горения материалов постоянны, полная энергия продуктов горения определяется их температурой, т. е. $E = \frac{1}{2} \rho \vec{V} \vec{V} + \rho \cdot e \approx C_v T$, где C_v — теплоемкость при постоянном объеме. Влияние вязкой диссипации на перенос энергии в этом случае пренебрежимо мало. Для расчета коэффициентов турбулентного переноса применяется однопараметрическая модель турбулентности [85].

Модель горения рассматривается в рамках модели простой химически реагирующей системы (ПХРС) [86]. Эта модель включает три вещества: горючее, окислитель и продукты, образующиеся в результате горения. Модель предполагает, что состояние газовой смеси в любой точке пламени характеризуется двумя параметрами. Первый параметр характеризует результат молекулярного или турбулентного смешения компонентов. Второй параметр характеризует результат химической реакции. В рамках модели ПХРС используется понятие переноса сохраняющегося свойства f . Если обозначить через c_i концентрации компонентов ($i = 1, 2, 3$ — горючий, окислительный и инертный компоненты газа), то для f имеем выражение [86]:

$$f = \frac{c_1 - \frac{c_2}{\chi} + \frac{c_{2\infty}}{\chi}}{c_{10} + \frac{c_{2\infty}}{\chi}}.$$

Индекс «0» соответствует параметрам на поверхности горения, а индекс «∞» соответствует параметрам в атмосфере. Величина χ определяется стехиометрическим соотношением компонентов. Переменная f в этом случае имеет смысл «смесевой доли» [86]. Комбинируя уравнение энергии с уравнениями для концентраций [86], приходим к выражению, связывающему f с температурой:

$$f = \frac{C_p(T - T_\infty) + c_1 Q}{C_p(T_s - T_\infty) + c_{10} Q},$$

где C_p — теплоемкость при постоянном давлении, Q — теплота сгорания. Для переменной f справедливо уравнение

$$\nabla(\rho \vec{V} f) = \nabla D \nabla f$$

с граничными условиями $f = 1$ на поверхности горения и $f = 0$ на ∞.

Положение фронта пламени определяется условиями:

$$c_1 = \frac{c_2}{\chi}, \quad f_{st} = \frac{\frac{c_{2\infty}}{\chi}}{c_{10} + \frac{c_{2\infty}}{\chi}}. \quad (3.4.3)$$

Соотношения (3.4.3) позволяют вычислить значения концентраций горючего (паров испаряющейся жидкости), окислителя и температуру газа:

$$\begin{aligned} f < f_{st}: \quad c_1 = 0, \quad c_2 = c_{2\infty} \frac{f_{st} - f}{f_{st}}, \quad T = T_\infty + \frac{f}{f_{st}} (T_{st.ad} - T_\infty); \\ f > f_{st}: \quad c_2 = 0, \quad c_1 = c_{10} \frac{f_{st} - f}{f_{st} - 1}, \quad T = T_s + \frac{1 - f}{1 - f_{st}} (T_{st.ad} - T_s). \end{aligned} \quad (3.4.4)$$

$$(3.4.5)$$

Температура в стехиометрической смеси при адиабатических условиях $T_{st.ad}$ определяется соотношением:

$$T_{st.ad} = T_\infty + \left(T_s - T_\infty + \frac{Q}{C_p} \right).$$

Для скорости разложения токсичных веществ принимается выражение:

$$Q_i = \rho \cdot c_i \cdot K_{0i} \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{R_i T}\right),$$

где K_{0i} , E_i , R_i — эмпирические константы.

С учетом сделанных допущений система уравнений, описывающая процессы тепло-массопереноса при пожаре в здании, в прямоугольной системе координат имеет вид:

$$\begin{aligned} (\rho u)_x + (\rho v)_y + (\rho w)_z &= 0, \\ (\rho u u)_x + (\rho v u)_y + (\rho w u)_z &= -p_x + a_x(\rho_0 - \rho) + A_1, \\ (\rho u v)_x + (\rho v v)_y + (\rho w v)_z &= -p_y + a_y(\rho_0 - \rho) + A_2, \\ (\rho u w)_x + (\rho v w)_y + (\rho w w)_z &= -p_z + a_z(\rho_0 - \rho) + A_3, \end{aligned} \quad (3.4.6)$$

где u , v , w — проекции вектора скорости на оси x , y , z ; a_x , a_y , a_z — проекции вектора массовой силы на соответствующие оси, в остальных случаях нижние

индексы x, y, z означают дифференцирование по соответствующей координате. Коэффициенты в правых частях уравнений в системе координат записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} A_1 &= P_{11x} + P_{12y} + P_{11x}, \quad A_2 = P_{12x} + P_{22y} + P_{23x}, \quad A_3 = P_{13x} + P_{23y} + P_{33x}, \\ P_{11} &= 2\mu \left(u_x - \frac{2}{3} \nabla V \right), \quad P_{22} = 2\mu \left(u_y - \frac{2}{3} \nabla V \right), \quad P_{33} = 2\mu \left(u_z - \frac{2}{3} \nabla V \right), \\ P_{12} &= \mu (v_x + u_y), \quad P_{13} = \mu (w_x + u_x), \quad P_{23} = \mu (v_x + w_y), \\ \nabla V &= u_x + v_y + w_z. \end{aligned}$$

Коэффициент динамической вязкости имеет вид $\mu = \rho(\nu_T + \nu_0)$, где ν_T — коэффициент турбулентной вязкости, ν_0 — коэффициент молекулярной кинематической вязкости. Система (3.4.6) решается совместно с уравнением для коэффициента турбулентной диффузии ν_T :

$$(\rho w \nu_T)_x + (\rho v \nu_T)_y + (\rho w \nu_T)_z = (\mu (\nu_T)_x)_x + (\mu (\nu_T)_y)_z + (\mu (\nu_T)_z)_z + \Gamma_T, \quad (3.4.7)$$

где $\Gamma_T = \alpha \mu G - \gamma \mu \frac{\beta \nu_T + \nu_0}{s^2}$ — член, описывающий генерацию турбулентной вязкости, и

$$G = \sqrt{2(u_x^2 + v_y^2 + w_z^2) + (u_y + v_x)^2 + (u_z + w_x)^2 + (w_y + v_z)^2},$$

где s — расстояние от стенки. Коэффициент $\beta = 0,06$, коэффициент $\gamma = 50$, коэффициент α выражается в виде:

$$\alpha = 0,2 \frac{(\nu_T/\nu)^2 + 11(\nu_T/\nu) + 13}{(\nu_T/\nu)^2 - 11(\nu_T/\nu) + 64}.$$

В зоне, непосредственно прилегающей к непроницаемой поверхности, вводится пограничный слой. Граничное условие для уравнения (3.4.7) выставляется на границе пограничного слоя. В пограничном слое коэффициент турбулентной диффузии рассчитывается по алгебраической модели турбулентности [83, 84]:

$$\nu_T^b = 0,0168 \cdot \delta^* \cdot V + \nu_0, \quad \delta^* = 0,04625 \cdot X Re^{-0,2}, \quad Re = \frac{VX}{\nu_0},$$

где δ^* — толщина вытеснения, Re — число Рейнольдса, X — расстояние вдоль твердой поверхности, V — модуль скорости на границе пограничного слоя.

На проницаемой поверхности с заданной нормальной компонентой скорости газа задается уровень начальной турбулентности. На выходной границе задается условие

$$\frac{\partial^2 \nu_T}{\partial x^2} = 0.$$

Уравнение переноса свойства f :

$$(\rho u f)_x + (\rho v f)_y + (\rho w f)_z = (Df_x)_x + (Df_y)_y + (Df_z)_z, \quad (3.4.8)$$

где $D = \mu / Pr$ — коэффициент переноса, Pr — число Прандтля.

Распределение концентрации i -го токсичного вещества определяется уравнением:

$$(\rho c_i)_x + (\rho v c_i)_y + (\rho w c_i)_z = (D(c_i)_x)_x + (D(c_i)_y)_y + (D(c_i)_z)_z. \quad (3.4.9)$$

Плотность ρ связана с температурой и давлением уравнением состояния $\rho = p/RT$, а температура определена выражением (3.4.4).

Коэффициент конвективной теплоотдачи α_k на твердой поверхности определяется по скорости газовой фазы на границе пограничного слоя [43]:

$$\alpha_k = c_p p V \frac{Nu}{Re Pr}, \quad Nu = 0,0296 \cdot Re^{0,8}, \quad Pr = \frac{\rho \nu_0 c_p}{\lambda}.$$

Предполагая, что отравляющее вещество не участвует в горении (только в этом случае возможен токсичный выброс) и что скорость его поступления в помещение не настолько велика, чтобы существенно повлиять на движение остального газа при пожаре (это справедливо для боеприпасов, размеры которых много меньше размеров помещения), можно считать, что скорость выброса отравляющего вещества из помещения линейно зависит от скорости поступления отравляющего вещества в помещение: $V_{ist} = \Xi \cdot V_{tox}$. Это следует из линейности соотношения (3.4.2) и предположения о независимости основных газодинамических функций от скорости поступления отравляющего вещества в помещение. Тогда, задавая предполагаемую скорость выброса отравляющего вещества в помещение, можно оценить коэффициент Ξ и массу выброса отравляющего вещества в окружающую среду как $Q_{ist} = \Xi \cdot Q_{tox}$.

На основе вышеописанной численной модели произведены расчеты относительной доли вещества, попадающей из горящего помещения в атмосферу. Для расчетов параметров токсической опасности при пожаре использовались упрощенные геометрические схемы, учитывающие основные геометрические характеристики помещений. В частности, анализировались случаи пожара в железнодорожном вагоне с химическими боеприпасами, в помещении объекта утилизации и в помещении объекта хранения.

Поскольку возникновение пожара возможно в произвольном месте помещения, с произвольным взаимным расположением очагов огня и разрушенных при тепловом воздействии химических боеприпасов, то для оценки уровня химической опасности, возникающей в горящем помещении, необходимо провести усреднение по всевозможным значениям случайных параметров. Считая различные взаимные расположения источников тепла и разрушенных химических боеприпасов равновероятными, для корректного определения параметров источников химической опасности произведено их усреднение методом Монте-Карло. Предполагалось случайное распределение мест очагов пожаров и очагов химического выброса по площади помещения.

Табл. 3.5 содержит средние значения коэффициентов Ξ , характеризующих относительную долю вещества, попавшего из помещения в окружающую среду, для различных конфигураций очага $n \times S$, где n — число очагов горения, S — площадь очага.

Рассмотрены различные конфигурации расположения очага пожара, расположения проемов и источников токсического «выброса» в окружающее пространство.

Таблица 3.5. Параметры химической опасности при пожаре.

Место аварии	Очаг $n \times S$	Ξ	$T_{out}, ^\circ C$	Очаг $n \times S$	Ξ	$T_{out}, ^\circ C$
Ж/д вагон	$1 \times 1 \text{ м}^2$	0,15	46	$3 \times 1 \text{ м}^2$	0,06	71
	$1 \times 3 \text{ м}^2$	0,07	73	$1 \times 10 \text{ м}^2$	0,01	85
Объект утилизации	$1 \times 3 \text{ м}^2$	0,11	31	$1 \times 10 \text{ м}^2$	0,04	57
	$3 \times 3 \text{ м}^2$	0,05	52			
Объект хранения	$10 \times 1 \text{ м}^2$	0,05	61	$10 \times 3 \text{ м}^2$	0,01	75

Поскольку области с высокой температурой занимают относительно небольшую часть объема, то величина токсического выброса сильно зависит от того, проходят ли отравляющие вещества через эти области или нет. Так, при изменении расположения очага токсического выброса и очага пожара относительно проемов с выходящими потоками воздуха доля отравляющего вещества, «выброшенного» из помещения, изменялась от 0 до 0,99.

Таким образом, на основе результатов раздела 2.3, позволяющих определить количества отравляющих веществ, попадающего из химических боеприпасов в помещения, и на основе описанной выше модели можно оценить среднее ожидаемое количество отравляющих веществ, попавших в атмосферу при пожаре.

3.5. Заключительные замечания

Математические модели развития начальной стадии аварийного процесса совместно с моделями источников аварийной опасности позволяют прогнозировать характеристики «выбросов» токсичных веществ в атмосферу. Необходимо учесть, что при прогнозировании вводятся определенные допущения как относительно потенциальных источников химической опасности, так и относительно начальных стадий аварийных процессов. Эти допущения влияют на численные значения характеристик аварийных воздействий. Поэтому в данном разделе представлены верхние границы математических ожиданий характеристик аварийных воздействий.

По результатам ситуационного моделирования, прогнозирования характеристик аварийных воздействий выделяются значимые, с точки зрения последствий, аварийные ситуации. Действительно, последствия химических аварий для населения в значительной степени определяются значениями масс токсичных веществ, попавших в приземный слой атмосферы. Выделенные аварийные ситуации вносят определяющий вклад в оценки аварийного риска и, следовательно, подлежат дальнейшему детальному исследованию.

Моделирование рассеяния примеси в пограничном слое атмосферы

Моделирование процесса переноса и турбулентного рассеяния примеси в атмосфере с учетом многообразия протекающих в ней физических процессов является сложной физико-математической задачей. Требования, предъявляемые к модели, зависят от характера конкретной прикладной задачи.

Исторически первые модели распространения примеси в атмосфере были разработаны в 60-е и 70-е года XX века и основывались на очень упрощенном решении уравнения переноса в переменных Эйлера. Упрощенное дифференциальное уравнение переноса имеет аналитическое решение, и, как следствие, результаты могут быть получены достаточно быстро. Со временем такие модели (гауссовы или статистические модели переноса) стали довольно сложны, поскольку производилась постоянная параметризация новых и более сложных задач, таких, как, например, влияние застройки и рельефа местности. Такой подход использован во многих методиках и широко применяется в практике прогнозирования загрязнения атмосферы [87]. Отметим, что гауссовы модели описывают распространение примеси от точечных или линейных источников в небольшой пространственной области (5-10 км) с постоянными по времени метеорологическими условиями. Данные модели плохо передают особенности рассеяния примеси в переменном поле скоростей и имеют определенные сложности при моделировании множественных, нестационарных и протяженных источников.

В последнем десятилетии XX века, в связи с бурным развитием вычислительной техники, появилась возможность использовать при прогнозировании трехмерные численные модели переноса примеси в атмосфере, учитывающие реальную или прогнозируемую синоптическую ситуацию. При этом использовались как лагранжевы [88, 89], так и эйлеровы [90–93] подходы к описанию процесса переноса. Получили также развитие смешанные модели [94, 95].

При прогнозировании распространения токсичных веществ в атмосфере обычно принимается приближение инертной примеси. Это приближение наиболее значимо для ряда практически важных задач и справедливо, когда воздействием примеси на процесс переноса можно пренебречь. В противном случае, процесс распространения примеси или его начальная стадия должны описываться с привлечением уравнений газовой динамики [90, 96].

Поскольку одно и то же вещество может присутствовать в атмосфере в состояниях, имеющих различные физико-химические характеристики, полагаем, что



Рис. 4.1. Структура пограничного слоя

все рассматриваемое токсичное вещество состоит из набора компонентов, отличающихся друг от друга поведением в атмосфере.

4.1. Пограничный слой атмосферы

По признаку взаимодействия атмосферы с земной поверхностью атмосферу делят на пограничный слой (иногда называемый также слоем трения) и свободную атмосферу [97]. В пограничном слое (высотой до 1-1,5 км) на характер движения большое влияние оказывают земная поверхность и силы турбулентного трения. В этом слое хорошо выражены суточные изменения метеорологических величин. В свободной атмосфере (выше 1-1,5 км) турбулентный обмен (в смысле пульсаций скорости ветра) выражен ничуть не слабее, чем в пограничном слое. Однако роль трения в свободной атмосфере мала по сравнению с другими силами, т. к. здесь малы вертикальные градиенты скорости ветра. В свободной атмосфере в первом (достаточно грубом) приближении силами турбулентного трения можно пренебречь.

В пределах пограничного слоя (ПСА) выделяют приземный слой атмосферы (высотой 50-100 м или 5% от толщины пограничного слоя), где метеорологические величины (например, температура и скорость ветра) резко изменяются с высотой [97, 98]. Структура ПСА схематично проиллюстрирована на рис. 4.1.

Для большинства аварийных ситуаций, являющихся предметом рассмотрения настоящей работы, характерна эмиссия опасной субстанции в пределах пограничного и даже скорее приземного слоя. Вертикальная неоднородность пограничного слоя создает специфические условия рассеяния примеси. Облако примеси, возникшее близко у земли, рассеивается интенсивнее вверх, чем вниз, за счет вовлечения в этот процесс вихрей все большего размера и за счет сноса частиц ветром, сила которого с высотой увеличивается. Для поперечного рассеивания дополнительные условия создаются изменением направления ветра с высотой [97, 99]. Кроме того, верхняя граница пограничного слоя (из-за низкого коэффициента турбулентного

Таблица 4.1. Параметр шероховатости z_0 по [98] (h — высота препятствий, x — расстояние между ними).

Тип поверхности	z_0 , м
Открытая спокойная вода; гладкий лед	$10^{-6} - 10^{-4}$
Снег; равнина без растительности	$2 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3}$
Открытая равнина, трава высотой до 0,2 м	0,01 – 0,03
Низкие посевы; отдельные препятствия	0,04 – 0,10
Высокие посевы; препятствия $15 \leq x/h < 20$	0,25
Парковая зона, препятствия $x/h \cong 10$	0,5
Лес, пригороды с низкими зданиями: $x/h \ll 10$	0,5 – 5,0
Центр города с высокими и низкими зданиями	1,0 – 6,0

обмена) служит своего рода поверхностью отражения для примеси. Указанные обстоятельства должны адекватно описываться математической моделью рассеяния примеси в вертикально-неоднородном пограничном слое.

Толщина пограничного слоя является изменчивой величиной [100]. С одной стороны, неоднородный характер подстилающей поверхности обуславливает пространственную неоднородность ПСА в выделенный момент времени. С другой стороны, суточные изменения радиационного баланса обуславливают временную изменчивость пограничного слоя в выделенной точке. Пограничный слой следует рельефу местности при условии, что высота ПСА сравнима с характерным размером препятствий. В противном случае влияние рельефа местности на структуру пограничного слоя достаточно адекватно учитывается через эквивалентную высоту шероховатости z_0 . Указанное приближение — приближение стационарного ПСА над однородной подстилающей поверхностью — наиболее значимо для практических приложений по краткосрочному (порядка нескольких часов) прогнозу последствий аварий и применимо для достаточно «гладкого» рельефа. При моделировании турбулентного рассеяния примеси в условиях пересеченной местности необходимо учитывать пространственную неоднородность ПСА [96].

Параметр шероховатости местности, как правило, определяют по данным градиентных измерений профиля скорости ветра [101]. При отсутствии таких измерений значения параметра шероховатости подстилающей поверхности z_0 для различных типов поверхности можно определить по данным, приведенным в таблице 4.1. В некоторых нормативных методиках (см., например, методику [76]) также учитывается и зависимость параметра шероховатости от направления ветра.

На поведение вертикальных профилей скорости ветра и коэффициентов турбулентного обмена, а следовательно, и на характер турбулентного рассеяния примеси, существенное влияние оказывает термическая стратификация пограничного слоя. Кратко рассмотрим влияние стратификации на характер рассеяния примеси на примере метода частиц [97].

Выделим на определенной высоте элементарный объем сухого воздуха — воздушную частицу — и поднимем ее адиабатически на большую высоту. При адиабатическом подъеме частицы за счет работы расширения (давление с высотой падает) происходит падение температуры частицы с постоянной величиной $\gamma_a \approx 1^\circ/100$ м.

Эта величина называется сухоадиабатическим градиентом температуры. Устойчивость атмосферы определяется сопоставлением реального градиента температуры γ с γ_a .

Возможны следующие ситуации:

- При $\gamma = \gamma_a$ температурная стратификация безразлична (равновесна): температура частицы и воздуха после смещения одинакова, и, следовательно, частица будет находиться в равновесии с окружающим воздухом на любой высоте.
- При $\gamma > \gamma_a$ стратификация неустойчива: случайное увеличение высоты частицы приведет к возникновению подъемной силы и соответствующего ускорения, т. к. плотность частицы будет меньше, чем плотность окружающего воздуха. Неустойчиво статифицированный пограничный слой (называемый также конвективным) развивается обычно к полудню за счет нагревания подстилающей поверхности солнечной радиацией. Турбулентное рассеяние примеси в конвективном ПСА выражено наиболее сильно.
- При $\gamma < \gamma_a$ стратификация устойчива: любое случайное изменение вертикального положения частицы будет приводить к возникновению компенсирующей силы, стремящейся вернуть частицу в первоначальное положение. В этом случае выделяют изотермию $\gamma = 0$ и инверсию $\gamma < 0$. Инверсионная стратификация характерна для безоблачной погоды ночью либо при сильных заморозках в течение суток зимой. Устойчиво стратифицированный пограничный слой создает наиболее консервативные условия для рассеяния примеси: примесь распространяется в виде компактного облака на значительные расстояния, что приводит к значительной величине наземных концентраций.

Для приближенного определения устойчивости используются способы, основанные на стандартных метеорологических данных: скорости ветра на уровне флюгера, характеристиках солнечной и земной радиации. В соответствии с классификацией Тернера–ИЭМ [102] класс (или категория) устойчивости определяется по времени суток, состоянию облачности и скорости ветра на высоте флюгера. Категориям 1–3 соответствуют разные степени неустойчивости (от сильной до слабой), категория 4 — безразличная стратификация, категориям 5–7 — различные степени устойчивости (см. табл. 4.2). В таблице приведено соответствие между категориями стратификации по Тернеру с классами устойчивости по Паскуилу [99], которые широко используются для параметризации дисперсий примеси

Стратификация атмосферы	Класс по Тернеру	Класс по Паскуилу
Очень неустойчивая	1	A
Умеренно неустойчивая	2	B
Слабо неустойчивая	3	C
Безразличная	4	D
Слабо устойчивая	5	—
Умеренно устойчивая	6	E
Очень устойчивая	7	F

Таблица 4.2. Качественное соответствие между классом устойчивости и характеристикой стратификации.

в различных гауссовых моделях рассеяния. Отметим, что класс устойчивости — величина достаточно неопределенная: различные классификационные схемы дают существенный разброс в классе устойчивости [103].

4.2. Экспресс-методика прогнозирования уровня аварийной опасности

В настоящее время в Российской Федерации имеется ряд методик, позволяющих быстро оценивать масштабы и последствия загрязнения атмосферы. Однако часть из них ориентирована на систематическое загрязнение атмосферы в предположении, что процессы рассеяния примесей в атмосфере носят стационарный характер. К ним относится, в первую очередь, методика ОНД-86 [87].

Другие ориентированы на аварийное загрязнение атмосферы, но они страдают существенными недостатками. Так, в одной из самых ранних среди них [104] расчет масштабов загрязнения атмосферы ведется с помощью эмпирических формул и таблиц при отсутствии какого-либо теоретического обоснования. В методике [105] допущены неточности при записи формул концентрационного поля, порождаемого кратковременно действующим непрерывным точечным источником. Неточным является выражение для вычисления токсической дозы. В ряде методик [22, 38, 106], имеющих нормативный характер, неверно записаны дисперсионные зависимости Смита-Хоскера. Кроме того игнорируется тот факт, что дисперсии в моделях нестационарного концентрационного поля зависят не от координаты x_1 , характеризующей место нахождения реципиента, а от координаты центра клуба облака (в случае мгновенного точечного источника). Некорректно записаны формулы для расчета концентрационного поля, порождаемого кратковременно действующим непрерывным источником, а также — для расчета токсической дозы. Однако главное состоит в том, что в этих и других известных нам экспресс-методиках прогнозирования масштабов и последствий аварийного загрязнения отсутствует анализ особенностей нестационарного поля концентраций, порождаемого при аварийных выбросах токсиканта.

В предлагаемой экспресс-методике прогноза масштабов и последствий загрязнения приземного слоя атмосферы от спонтанных выбросов токсикантов восполняются указанные пробелы¹.

4.2.1. Основные положения методики. В основу расчетов концентраций поллютантов в атмосфере положена гауссова модель переноса поллютантов от мгновенного точечного источника. При этом учитываются как полное отражение поллютанта от поверхности земли, так и сопутствующие явления в виде химического превращения поллютанта по реакции первого порядка и оседания его частиц на поверхность земли.

Отметим, что гауссовы модели переноса работоспособны при выполнении следующих условий:

- Поллютанты могут представлять собой либо газы или паро-газовые смеси с плотностью, не превышающей плотность воздуха, либо аэрозоли с размерами частиц до 10 мкм.

¹В написании раздела принимала участие Т. Н. Швецова-Шиловская.

- Пока облако поллютанта не рассеется, метеоусловия предполагаются неизменными.
- Расстояния от источника рассматриваются в интервале от 100 метров до 10 километров.
- В условиях пересеченной местности эмпирические зависимости для дисперсий применимы ограниченно.

4.2.2. Модель концентрационного поля поллютанта. Рассмотрим перенос поллютанта в рамках гауссовой модели в прямоугольной системе координат. Ось x_1 совпадает по направлению с направлением ветра (движения атмосферы).

Точечный источник имеет координаты:

$$x_1 = 0, x_2 = 0, x_3 = x_{30} (x_{30} \geq 0).$$

Источник является мгновенным. Предполагается, что источник массой M появляется в атмосфере одномоментно, а именно, в момент времени $t = 0$. Скорость ветра вдоль оси x_1 равна u_1 . Имеется в виду, что граница диффузионной области (плоскость земли) является непроницаемой для поллютанта.

Концентрационное поле поллютанта при указанных выше предпосылках может быть выражено формулой [107]:

$$\begin{aligned} c(\underline{x}, t) = & \frac{M}{(2\pi)^{3/2} \sigma_{(1)}(u_1 t) \sigma_{(2)}(u_1 t) \sigma_{(3)}(u_1 t)} \times \\ & \times \exp \left[-\frac{(x_1 - u_1 t)^2}{2\sigma_{(1)}^2(u_1 t)} \right] \cdot \exp \left[-\frac{x_2^2}{2\sigma_{(2)}^2(u_1 t)} \right] \times \\ & \times \left\{ \exp \left[-\frac{(x_3 - x_{30})^2}{2\sigma_{(3)}^2(u_1 t)} \right] + \exp \left[-\frac{(x_3 + x_{30})^2}{2\sigma_{(3)}^2(u_1 t)} \right] \right\} \cdot f_p(t) \cdot f_{oc}(t), \end{aligned} \quad (4.2.1)$$

где $\underline{x} = (x_1, x_2, x_3)^T$ — радиус-вектор точки диффузионного пространства, в которой расположен реципиент, t — время, отсчитываемое с момента начала выброса, $\sigma_{(i)}(u_1 t)$ — условное стандартное отклонение облака поллютанта по оси x_i , $f_p(t)$ — функция истощения облака, обусловленная химическим превращением поллютанта, $f_{oc}(t)$ — функция истощения облака за счет оседания поллютанта ($f_p(0) = f_{oc}(0) = 1$).

Дисперсии $\sigma_{(i)}^2$, входящие в модель концентрационного поля (4.2.1), можно выразить, следуя рекомендации в [108], в виде формулы

$$\sigma_{(i)}^2 = \sigma_i^2(u_1 t) + \sigma_0^2, \quad (4.2.2)$$

где $\sigma_i^2(u_1 t)$ — эмпирические дисперсионные зависимости, отражающие характер возрастания дисперсий облака по координатам с увеличением расстояния $u_1 t$ от источника до центра облака (вдоль оси x_1).

Поправку σ_0^2 предлагается вычислять по формуле [108]

$$\sigma_{(0)}^2 = [M / (2^{1/2} \pi^{3/2} \rho)]^{2/3}, \quad (4.2.3)$$

где ρ — плотность парообразного (газообразного) поллютанта. В формуле концентрационного поля (4.2.1) содержатся две корректирующие функции. Первая из них

выражается формулой

$$f_p(t) = \exp(-k \cdot t), \quad (4.2.4)$$

где k — константа скорости превращения (деградации) поллютанта. Вторая описывается формулой [107]

$$f_{oc}(t) = \exp \left\{ -\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\nu_d}{u_1} \int_0^{z=u_1 t} \frac{dz}{\sigma_3(z) \exp[x_3^2/2\sigma_3^2(z)]} \right\}, \quad (4.2.5)$$

где ν_d — скорость оседания частиц поллютанта.

В работах [107, 109] приведены вспомогательные графики для определения поправки $f_{oc}(t)$. Информация о скорости оседания частиц ν_d для разных поллютантов представлена в работах [107, 110–112].

Под клубом облака (КО) будем понимать геометрическое место точек облака (диффузионного пространства), в которых в данный момент времени t^* концентрация поллютанта не ниже некоторой пороговой величины c^* . Поверхность КО выражается уравнением

$$c(x_1, x_2, x_3, t^*) = c^*. \quad (4.2.6)$$

Уравнение (4.2.6) с учетом (4.2.1) редуцируется к виду:

$$\frac{(x_1 - u_1 t^*)^2}{a_1^2(x_3, t^*)} + \frac{x_2^2}{a_2^2(x_3, t^*)} = 1, \quad (4.2.7)$$

где

$$a_i^2(x_3, t^*) = 2\sigma_{(i)}^2(u_1 t^*) \ln [d(x_3, t^*)], \quad i = 1, 2, \quad (4.2.8)$$

$$d(x_3, t^*) = \left\{ \exp \left[-\frac{(x_3 - x_{30})^2}{2\sigma_{(3)}^2(u_1 t^*)} \right] + \exp \left[-\frac{(x_3 + x_{30})^2}{2\sigma_{(3)}^2(u_1 t^*)} \right] \right\} d_2(t^*), \quad (4.2.9)$$

$$d_2(t^*) = \frac{M \cdot f_p(t^*) f_{oc}(t^*)}{c^* (2\pi)^{3/2} \sigma_{(1)}(u_1 t^*) \sigma_{(2)}(u_1 t^*) \sigma_{(3)}(u_1 t^*)}. \quad (4.2.10)$$

Рассмотрим сечение концентрационного поля плоскостью на высоте $x_3 = 1,5$ м — пятно загрязнения (ПЗ),

$$c(x_1, x_2, 1,5) \geq c^*. \quad (4.2.11)$$

Контурная линия, ограничивающая ПЗ, задается уравнением

$$c(x_1, x_2, 1,5) = c^*. \quad (4.2.12)$$

Эту линию будем называть изоплетой ПЗ. В общем случае, уравнение этой изоплеты можно получить, исходя из формул (4.2.7 — 4.2.9), в которых следует положить $x_3 = 1,5$ м, т. е.

$$\frac{(x_1 - u_1 t^*)^2}{a_1^2(1,5, t^*)} + \frac{x_2^2}{a_2^2(1,5, t^*)} = 1, \quad (4.2.13)$$

где

$$a_i^2(1, 5, t^*) = 2\sigma_{(i)}^2(u_1 t^*) \ln [d(1, 5, t^*)], \quad i = 1, 2, \quad (4.2.14)$$

$$d(1, 5, t^*) = \exp \left[-\frac{(1, 5 - x_{30})^2}{2\sigma_{(3)}^2(u_1 t^*)} \right] \times \\ \times \left\{ 1 + \exp \left[-\frac{3 \cdot x_{30}}{2\sigma_{(3)}^2(u_1 t^*)} \right] \right\} d_2(t^*). \quad (4.2.15)$$

Можно ожидать, что размеры ПЗ сначала будут увеличиваться, а затем уменьшаться до полного вырождения в точку.

Столь специфический характер изменения размеров ПЗ во времени обусловлен прежде всего монотонно возрастающим характером зависимости $\sigma_{(i)}^2$ от времени. Если бы дисперсии не увеличивались (при $f_p(t) = f_{oc}(t) = 1$), то и размеры ПЗ при этом не изменялись бы. Возрастание дисперсий во времени, обусловленное турбулентностью среды, приводит к двум противоположно направленным процессам. С одной стороны, происходит турбулентное рассеивание поллютанта, что влечет за собой увеличение размеров ПЗ. С другой стороны, центральная часть ПЗ обедняется поллютантом (поллютант «уходит» за пределы области ПЗ), а это приводит к уменьшению размеров ПЗ. Конкуренция двух таких «противоречивых» процессов и определяет особенности изменения размеров ПЗ во времени.

4.2.3. Эмпирические зависимости для дисперсий стационарного концентрационного поля. Бриггс получил [114, 115] эмпирические зависимости для стандартных отклонений отдельно для сельской местности и для городских условий. Дисперсионные зависимости для сельской местности выражаются формулами

$$\sigma_2(x_1) = \frac{\alpha_2 x_1}{\sqrt{1 + 10^{-4} x_1}}, \quad \sigma_3(x_1) = \frac{\alpha_3 x_1}{S_3(x_1)}. \quad (4.2.16)$$

Для условий городской застройки формулы Бриггса имеют вид

$$\sigma_2(x_1) = \frac{\alpha_2 x_1}{\sqrt{1 + 4 \cdot 10^{-4} x_1}}, \quad \sigma_3(x_1) = \frac{\alpha_3 x_1}{S_3(x_1)}. \quad (4.2.17)$$

В формулах (4.2.16) и (4.2.17) α_2, α_3 — коэффициенты, $S_3(x_1)$ — дополнительная функция. Стандартные отклонения, вычисляемые по этим формулам, выражаются в метрах при условии, что значения x_1 также выражаются в метрах. В таблице 4.3 даны численные значения коэффициентов α_2, α_3 и выражения функций $S_3(x_1)$ в зависимости от классов устойчивости атмосферы по Паскуилу (см. табл. 4.2).

Формулы Бриггса применимы для расстояний x_1 от источника в интервале от 100 до 10000 метров. Время осреднения концентраций при этом составляло 20 мин. Параметр шероховатости z_0 для сельской местности был равен 0,03 м, а в городских условиях — 1 м [116]. В [116] указаны работы, в которых описаны исследования, направленные на уточнение формул Бриггса. Полезные сведения на этот счет содержатся также в работах [112, 113, 117–119].

Более совершенными в настоящее время считаются дисперсионные зависимости Смита-Хоскера [109, 120–124].

Таблица 4.3. Значения коэффициентов α_2 , α_3 и выражения функций $S_3(x_1)$ для вычисления дисперсионных зависимостей Бриггса в зависимости от классов устойчивости атмосферы.

Класс устойчивости	Открытая сельская местность			Городская застройка		
	α_2	α_3	$S_3(x_1)$	α_2	α_3	$S_3(x_1)$
A	0,22	0,20	1	0,32	0,24	$\sqrt{1 + 1 \cdot 10^{-3}(x_1)}$
B	0,16	0,12	1	0,32	0,24	$\sqrt{1 + 1 \cdot 10^{-3}(x_1)}$
C	0,11	0,08	$\sqrt{1 + 2 \cdot 10^{-4}x_1}$	0,22	0,20	1
D	0,08	0,06	$\sqrt{1 + 1,5 \cdot 10^{-4}x_1}$	0,16	0,14	$(1 + 3 \cdot 10^{-4}x_1)^{-1/2}$
E	0,06	0,03	$(1 + 3 \cdot 10^{-4}x_1)^{-1}$	0,11	0,08	$(1 + 1,5 \cdot 10^{-4}x_1)^{-1/2}$
F	0,04	0,016	$(1 + 3 \cdot 10^{-4}x_1)^{-1}$	0,11	0,08	$(1 + 1,5 \cdot 10^{-4}x_1)^{-1/2}$

Зависимость стандартного отклонения σ_2 в поперечном направлении от x_1 по Смиуту-Хоскеру определяется по формуле

$$\sigma_2(x_1) = \frac{\alpha_2 x_1}{\sqrt{1 + 10^{-4}x_1}}, \quad (4.2.18)$$

где α_2 — коэффициент дисперсионной зависимости (см. табл. 4.3).

Зависимость σ_3 от x_1 и других факторов по Смиуту-Хоскеру представляется следующим образом:

$$\sigma_3(x_1) = \begin{cases} g(x_1) \cdot F(x_1, z_0), & \text{при } g(x_1) \cdot F(x_1, z_0) \leq \sigma_3^{max}, \\ \sigma_3^{max}, & \text{при } g(x_1) \cdot F(x_1, z_0) > \sigma_3^{max}, \end{cases} \quad (4.2.19)$$

где σ_3^{max} — максимально возможное значение стандартного отклонения, которое задается таблично в зависимости от класса устойчивости атмосферы (табл. 4.4).

Первый сомножитель в выражении $\sigma_3(x_1)$ — функция $g(x_1)$ — отражает изменение стандартного отклонения с изменением удаленности от источника при

Таблица 4.4. Максимально возможное значение стандартного отклонения σ_3^{max} и значения коэффициентов a_1 , a_2 , b_1 и b_2 при разных классах устойчивости атмосферы.

Класс устойчивости	σ_3^{max}	a_1	a_2	b_1	b_2
A	1600	0,112	$5,38 \cdot 10^{-4}$	1,06	0,815
B	920	0,130	$6,52 \cdot 10^{-4}$	0,95	0,750
C	640	0,112	$9,05 \cdot 10^{-4}$	0,92	0,718
D	400	0,098	$1,35 \cdot 10^{-3}$	0,889	0,688
E	220	0,0609	$1,96 \cdot 10^{-3}$	0,895	0,684
F	100	0,0638	$1,36 \cdot 10^{-3}$	0,783	0,672

Таблица 4.5. Коэффициенты c_1 , d_1 , c_2 , d_2 для функции $F(x_1, z_0)$ в зависимости от параметра шероховатости z_0 .

z_0 , м	c_1	d_1	c_2	d_2
0,01	1,56	0,048	$6,75 \cdot 10^{-4}$	0,45
0,04	2,02	0,0269	$7,76 \cdot 10^{-4}$	0,37
0,1	2,72	0	0	0
0,4	5,16	-0,098	18,6	-0,225
1	7,37	-0,096	$4,29 \cdot 10^3$	-0,60
4	11,7	-0,128	$4,59 \cdot 10^4$	-0,78

разных состояниях устойчивости атмосферы:

$$g(x_1) = \frac{a_1 x_1^{b_1}}{1 + a_2 x_1^{b_2}}, \quad (4.2.20)$$

где коэффициенты a_1 , a_2 , b_1 , и b_2 имеют значения в зависимости от состояния устойчивости атмосферы (табл. 4.4).

Функция $F(x_1, z_0)$, от которой также зависит $\sigma_3(x_1)$, играет роль корректирующего фактора. Она описывает влияние шероховатости подстилающей поверхности на изменение стандартного отклонения σ_3 с расстоянием. Эта функция выражается соотношениями:

$$F(x_1, z_0) = \begin{cases} \ln \left\{ c_1 x_1^{d_1} \cdot \left[1 + (c_2 x_1^{d_2})^{-1} \right] \right\}, & \text{при } z_0 > 0,1 \text{ м,} \\ \ln \left\{ c_1 x_1^{d_1} \cdot \left[1 + c_2 x_1^{d_2} \right]^{-1} \right\}, & \text{при } z_0 \leq 0,1 \text{ м.} \end{cases} \quad (4.2.21)$$

Значения коэффициентов, входящих в эти выражения, представлены в табл. 4.5.

4.2.4. Эмпирические зависимости для дисперсий нестационарного концентрационного поля. Исходя из статистической теории диффузии, можно показать [110,117], что стандартное отклонение, характеризующее нестационарное поле концентраций (от мгновенного источника) при малых значениях времени транспорта пропорционально времени в первой степени, при больших — времени транспорта в степени 1/2.

При отсутствии эмпирических зависимостей для дисперсий концентрационного поля, связанного с мгновенным точечным источником, можно воспользоваться имеющимися эмпирическими зависимостями для непрерывно действующего точечного источника, вводя поправочный коэффициент для стандартного отклонения σ_2 , равный $C_t = 0,5$. Это приведет к более жестким оценкам уровня опасности, порождаемой мгновенным точечным источником, чем при принятии одинакового стандартного отклонения для непрерывного и мгновенного источника.

Из сказанного ранее следует, что при аварийных ситуациях, связанных с мгновенным точечным источником, можно использовать эмпирические дисперсионные зависимости Бриггса и Смита-Хоскера, если произвести замену аргумента x_1 на

$u_1 t$ и уменьшить вдвое величину стандартного отклонения для σ_2 . В таком случае, модифицированные формулы Бриггса будут выражаться в виде:

$$\begin{aligned}\sigma_1(u_1 t) &= \frac{\alpha_2 \cdot (u_1 t)}{\sqrt{1 + 4 \cdot 10^{-4}(u_1 t)}}, \\ \sigma_2(u_1 t) &= \frac{\sigma_1(u_1 t)}{2}, \\ \sigma_3(x_1) &= \frac{\alpha_3 \cdot (u_1 t)}{S_3(u_1 t)}.\end{aligned}\quad (4.2.22)$$

Значения коэффициентов и вид функции $S_3(u_1 t)$ следует брать из табл. 4.3 (случай «открытая сельская местность»).

Аналогичным образом могут быть модифицированы формулы Смита-Хоскера:

$$\begin{aligned}\sigma_1(u_1 t) &= \frac{\alpha_2 \cdot (u_1 t)}{\sqrt{1 + 4 \cdot 10^{-4}(u_1 t)}}, \\ \sigma_2(u_1 t) &= 0,5 \cdot \sigma_1(u_1 t), \\ \sigma_3(u_1 t) &= \begin{cases} g(u_1 t) \cdot F(u_1 t, z_0), & \text{при } g(u_1 t) \cdot F(u_1 t, z_0) \leq \sigma_3^{max}, \\ \sigma_3^{max}, & \text{при } g(u_1 t) \cdot F(u_1 t, z_0) > \sigma_3^{max}, \end{cases}\end{aligned}\quad (4.2.23)$$

где

$$\begin{aligned}g(u_1 t) &= \frac{a_1 (u_1 t)^{b_1}}{1 + a_2 (u_1 t)^{b_2}}, \\ F(u_1 t, z_0) &= \begin{cases} \ln \{c_1 (u_1 t)^{d_1} \cdot [1 + (c_2 (u_1 t)^{d_2})]\}, & \text{при } z_0 > 0, 1, \\ \ln \{c_1 (u_1 t)^{d_1} \cdot [1 + c_2^{-1} (u_1 t)^{-d_2}]^{-1}\}, & \text{при } z_0 \leq 0, 1. \end{cases}\end{aligned}$$

Коэффициенты, фигурирующие в этих формулах, приведены в таблицах 4.4–4.5.

4.3. Лагранжевы стохастические модели

Лагранжевы стохастические модели описывают траектории дискретных частиц или облаков (клубов) в турбулентном потоке [125]. При использовании дискретных частиц концентрации находят исходя из массы частиц, приходящейся на ячейку эйлеровой сетки. При использовании облаков или клубов предполагается, что распределение концентрации примеси в облаке подчиняется нормальному закону, а концентрации определяются путем суммирования вкладов в выделенной точке от всех моделируемых облаков.

В последние годы лагранжевым моделям дискретных частиц уделяется повышенное внимание, поскольку они имеют определенные преимущества по сравнению с классической эйлеровой моделью турбулентной диффузии и моделью лагранжева облака [125]: отсутствие численной диффузии и других ошибок аппроксимации, связанных с дискретизацией дифференциальных уравнений, отсутствие

предположений о нормальном распределении концентрации в облаке, прямое использование функций распределения вектора турбулентной скорости [126] и т. д.

При помощи стохастических лагранжевых моделей успешно моделировалось рассеяние как тяжелого газа [127], так и струйных течений [128], рассеяние примеси вблизи строений [80, 129] и в конвективном пограничном слое [131], рассеяние химически реагирующей примеси [132].

Положение дискретной частицы в пространстве находится интегрированием уравнения движения:

$$\frac{d\vec{X}}{dt} = \vec{v}[\vec{X}(t)], \quad (4.3.1)$$

где t обозначает время, \vec{X} — вектор, определяющий положение частицы в момент времени t , а $\vec{v} = \vec{v}_{macro} + \vec{v}_{meso} + \vec{v}_t$ — вектор скорости ветра, определяемый суперпозицией макроскопического ветра \vec{v}_{macro} ($L > 100$ км), мезомасштабной составляющей \vec{v}_{meso} ($L = 1 - 100$ км) и турбулентной (микромасштабной) составляющей \vec{v}_t ($L < 1$ км) [88], L — пространственный масштаб.

Макромасштабная составляющая определяется текущей синоптической ситуацией, а мезомасштабная — рассчитывается либо из синоптических уравнений [88], либо с использованием некоторой интерполирующей схемы между макро- и микромасштабами, как, например, в [89]. В работе [130] для расчета эволюции мезомасштабной составляющей предлагается использовать стохастическое уравнение Ланжевена.

Эволюция турбулентной составляющей описывается на основе стохастического уравнения Ланжевена [88, 89, 125] для декартовой компоненты скорости потока α :

$$dv_{t\alpha} = a_{\alpha}(\vec{X}, \vec{v}_t, t)dt + b_{\alpha\beta}(\vec{X}, \vec{v}_t, t)dW_{\beta}, \quad (4.3.2)$$

где dt — шаг по времени, регулярная составляющая a (связана с вязкими силами) и диффузионная составляющая b (связана с флуктуациями давления) являются функциями положения частицы, скорости и времени [133]. В уравнении (4.3.2) dW_{β} — приращение винеровского процесса с нулевым средним значением и отклонением dt , которое не коррелировано с другими компонентами и некоррелировано во времени.

4.4. Эйлера модель турбулентного рассеяния примеси

Другим популярным подходом к описанию процесса распространения примеси в атмосфере является классическое эйлерово представление на основе полуэмпирического уравнения диффузии. Модели такого типа очень широко используются в практике прогноза последствий аварий и регулирования загрязнения атмосферы. Различные экспресс-методики (в частности, методика, изложенная в разделе 4.2) представляют собой аналитическое решение уравнения диффузии (при ряде упрощающих предположений) с последующей подгонкой дисперсий под экспериментальные данные.

Несмотря на определенные преимущества лагранжевых моделей при воспроизведении структуры турбулентности, они обладают существенными ограничениями при моделировании рассеяния многокомпонентных реагирующих поллютантов. Так, в работе [132] рассмотрен вопрос только о двухкомпонентной смеси. Эйлеровы модели, в свою очередь, позволяют моделировать рассеяние нескольких десятков (иногда сотен) реагирующих химических компонентов [134, 135], процессы взаимодействия аэрозоля и пара [91]. В эйлеровых моделях также достаточно естественным образом учитывается рассеяние тяжелой и перегретой (всплывающей) примеси, тогда как в лагранжевых моделях приходится прибегать к перерасчету некоторых величин на эйлеровой сетке [127]. И, наконец, сопоставление расчетов рассеяния примеси (с учетом реальной метеорологической ситуации в условиях пересеченной местности), проведенных по эйлеровой и лагранжевой моделям [136], показало, что разница в результатах относительно небольшая и обусловлена следующими обстоятельствами. Во-первых, в эйлеровой модели использовалась равномерная разностная сетка, которая не обеспечивает нужное разрешение вблизи источника, и, как следствие, значения наземных концентраций занижены. Во-вторых, время отклика на изменение поля ветра в лагранжевой модели составляло 10 мин, тогда как в эйлеровой — 1 час. Последнее обстоятельство привело к тому, что прогноз по эйлеровой модели несколько «запаздывал» и концентрационные поля несколько отличались. Однако подчеркнем, что расхождения в прогнозах несущественны, несмотря на большую разницу (на наш взгляд) в методиках расчета.

В настоящем разделе кратко описана эйлерова модель рассеяния примеси, используемая авторами на протяжении ряда лет для краткосрочного прогноза последствий химических аварий. Необходимо отметить, что поскольку модель базируется на численном решении уравнения диффузии, материал представлен соответствующим образом. Программная реализация модели и используемые численные методы приведены в главе 5. В работе не рассматриваются вопросы, связанные с аналитическим решением уравнения турбулентной диффузии.

4.4.1. Уравнение диффузии. В областях, не содержащих источников примеси, эволюция концентрации примеси c_i описывается уравнением

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \sum_{\alpha=1}^3 \frac{\partial u_{\alpha} c_i}{\partial x_{\alpha}} = D \frac{\partial^2 c_i}{\partial x_{\alpha}^2}, \quad (4.4.1)$$

где t — время, x_{α} — декартовы прямоугольные координаты, $c_i = c_i(t, x_1, x_2, x_3)$ — мгновенная концентрация i -го компонента примеси, u_{α} — α -компонент поля скоростей основной среды в переменных Эйлера.

При формулировке исходных уравнений, описывающих процесс распространения примесей в атмосфере и изменение их концентраций во времени, используется возможность отделения пульсаций от средних значений концентраций примеси. Это позволяет с помощью известных приемов осреднения перейти от уравнения

для мгновенных концентраций (4.4.1) к уравнению диффузии для средних концентраций [99, 137]:

$$\frac{\partial \bar{c}_i}{\partial t} + \sum_{\alpha=1}^3 \frac{\partial U_{\alpha} \bar{c}_i}{\partial x_{\alpha}} = - \sum_{\alpha=1}^3 \frac{\partial S_{\alpha}}{\partial x_{\alpha}}, \quad (4.4.2)$$

где U_{α} — компоненты средней скорости, $S_{\alpha} = -\overline{u'_{\alpha} c'_i}$ — потоки примеси, вызванные турбулентными пульсациями ее концентрации и поля скоростей. Для замыкания уравнения (4.4.2) принимается полуэмпирическая гипотеза о линейной зависимости между компонентами вектора потока примеси S_{α} и градиента ее средней концентрации:

$$-\overline{u'_{\alpha} c'_i} = S_{\alpha} = -K_{\alpha} \frac{\partial \bar{c}_i}{\partial x_{\alpha}}, \quad (4.4.3)$$

где K_{α} — диагональные элементы тензора коэффициентов турбулентной диффузии. В уравнении (4.4.3) используется предположение, что главные оси тензора коэффициентов обмена совпадают с осями координат.

Считая основное движение потока однородным по осям x_1 и x_2 и опуская знак осреднения, уравнение переноса примеси в атмосфере может быть представлено в виде [99, 102, 137, 138]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_i}{\partial t} + \sum_{\alpha=1}^3 (U_{\alpha} + U_{\alpha}^i) \frac{\partial c_i}{\partial x_{\alpha}} = \sum_{\alpha=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_{\alpha}} K_{\alpha} \frac{\partial c_i}{\partial x_{\alpha}} + \\ + R_s(c_1, c_2, \dots, c_N) + E_s - (k_{1s} + k_{2s})c_i, \end{aligned} \quad (4.4.4)$$

где U_{α}^i — поправка на неинертность примеси (учитывающая гравитационное оседание, например), E_s описывает распределение источников и стоков произвольной формы (точечных, линейных, поверхностных и объемных), R_s — вклад химических реакций, который в общем случае может содержать нелинейные вклады относительно концентраций [134], k_{1s} и k_{2s} — коэффициенты, описывающие поглощение частиц по высоте (моделируют взаимодействие примеси с растительностью и облачностью, вымывание примеси осадками). Заметим, что вышеуказанная процедура осреднения в случае химически реагирующих компонентов приводит к несколько другому выражению (см., например, [139, 140]). Однако на практике используется уравнение в форме (4.4.4) с линеаризованным вкладом от химических реакций $R_s^i(c_i)$.

Необходимо отметить, что гипотеза о том, что коэффициенты турбулентной диффузии совпадают с соответствующими коэффициентами турбулентной вязкости, не является очевидной [99]. Она может быть справедливой лишь на достаточном расстоянии от источника примеси. Кроме того, при выборе коэффициентов обмена необходимо учитывать и масштабы явления, поскольку эти величины зависят от размеров вихрей, участвующих в процессе рассеяния.

Обычно в декартовой системе координат оси x_1 и x_2 , расположенные в горизонтальной плоскости, обозначают через x и y , а вертикальную ось x_3 — через z , соответственно, $U_1 \equiv u$, $U_2 \equiv v$, $U_3 \equiv w$ и $K_1 \equiv K_x$, $K_2 \equiv K_y$, $K_3 \equiv K_z$.

При решении конкретных задач уравнение (4.4.4) упрощается. Так, если ось x ориентирована по направлению средней скорости ветра, то $v = 0$. При анализе распространения паров токсичных веществ в атмосфере принимается $w_i = 0$. При переносе в атмосфере аэрозоля w_i представляет собой скорость гравитационного оседания капель аэрозоля, которая в соответствии с формулой Стокса равна:

$$w_i = 2\rho_0 r^2 g / (9\eta), \quad (4.4.5)$$

где ρ_0 — плотность вещества капли, r — радиус капли, g — ускорение свободного падения, η — коэффициент вязкости. В более общем случае нужно учитывать распределение частиц аэрозоля по размерам (дисперсность), а также процессы взаимодействия аэрозоля с газовой фазой [91, 141].

Краевые условия. При проведении конкретных расчетов уравнение (4.4.4) должно быть дополнено граничными и начальными условиями. Уравнение (4.4.4) является параболическим, а следовательно, корректна постановка неоднородной начально-краевой задачи [46] с неоднородным начальным условием

$$c_i(x, y, z, 0) = c_i^0(x, y, z), \quad (4.4.6)$$

описывающим начальное (фоновое) распределение примеси, и неоднородными граничными условиями, заданными на границе расчетной области Γ :

$$\text{а) } c_i = f_i^1(x, y, z) \quad \text{при } (x, y, z) \in \Gamma \quad (\text{первая краевая задача}); \quad (4.4.7)$$

$$\text{б) } K_n \frac{\partial c_i}{\partial n} = f_i^2(x, y, z) \quad \text{при } (x, y, z) \in \Gamma \quad (\text{вторая краевая задача}); \quad (4.4.8)$$

$$\text{в) } K_n \frac{\partial c_i}{\partial n} + f_i^4(c_i - f_i^3(x, y, z)) = 0 \quad \text{при } (x, y, z) \in \Gamma \quad (4.4.9)$$

(третья краевая задача),

где $f_i^1(x, y, z)$, $f_i^2(x, y, z)$, $f_i^3(x, y, z)$ и $f_i^4 = f_i^4(x, y, z) \geq 0$ — заданные функции координат, $\partial c_i / \partial n$ — производная по внешней нормали к Γ .

На бесконечном удалении от источника граничные условия принимаются в соответствии с естественным предположением о том, что при этом их концентрация убывает до нуля [102, 137, 138]:

$$\begin{aligned} c_i|_{|x, y| \rightarrow \infty} &\rightarrow 0, \\ c_i|_{|z| \rightarrow \infty} &\rightarrow 0. \end{aligned}$$

Граничные условия удобно задавать на уровне шероховатости подстилающей поверхности $z = z_0$ [99]. При этом предполагается, что при формулировании граничных условий второго и третьего рода коэффициент турбулентного обмена на уровне шероховатости отличен от нуля. Отметим, что это условие выполняется всегда, т. к. имеет место молекулярная диффузия.

В общем случае, граничные условия могут быть сформулированы в виде:

$$K_z \frac{\partial c_i}{\partial z} + c_i(w_i - \nu_d^i) \Big|_{z=z_0} = \alpha c_i + \beta,$$

где v_d^i — скорость сухого осаждения, коэффициенты a_i и b_i зависят от конкретного сценария аварийной ситуации, свойств примеси и свойств подстилающей поверхности.

При формулировании граничного условия на подстилающей поверхности выделяют случаи, когда примеси распространяются над водной поверхностью. Большей частью вода поглощает примеси, и поэтому концентрация их непосредственно у поверхности принимается равной нулю [102], т. е.

$$c_i|_{z=z_0} = 0.$$

С поверхностью почвы примеси обычно взаимодействуют слабо. Попав на нее, примеси не накапливаются, а с турбулентными вихрями снова уносятся в атмосферу. Поэтому с достаточной точностью принимается, что средний турбулентный поток примеси у земной поверхности мал, т. е.

$$K_z \frac{\partial c_i}{\partial z} + c_i w_i \Big|_{z=z_0} = 0.$$

Учет начального перегрева примеси. При некоторых аварийных процессах в атмосферу испускается перегретая примесь (например, при пожаре). В этом случае образуется течение струйного типа из-за действия сил плавучести, что должно быть учтено при моделировании.

Наиболее простой и широко используемый на практике способ учета подъема перегретой примеси заключается в использовании эмпирических выражений для определения эффективной высоты источника:

$$h^{eff} = h + \Delta h,$$

где для начального подъема примеси Δh может быть использована, например, формула [102]:

$$\Delta h = \frac{3,75 \cdot w_0 R_0}{u_1} + \frac{1,6 \cdot g(\pi R_0^2 w_0) \Delta T}{T_a u_1^3}, \quad (4.4.10)$$

где w_0 — начальная скорость подъема примеси, R_0 — внутренний радиус устья трубы, g — ускорение свободного падения, ΔT — начальный перегрев. Широко используются также эмпирические зависимости Бриггса [102].

В рамках численной модели удобно также использовать совместное решение уравнения переноса вертикальной компоненты импульса, обусловленной действием архимедовой силы, и уравнения переноса тепла [102]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \sum_{\alpha=1}^3 (U_\alpha + w \delta_{\alpha 3}) \frac{\partial w}{\partial x_\alpha} &= \sum_{\alpha=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_\alpha} K_\alpha \frac{\partial w}{\partial x_\alpha} + \frac{g}{T_a} \theta, \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} + \sum_{\alpha=1}^3 (U_\alpha + w \delta_{\alpha 3}) \frac{\partial (\theta + T_a)}{\partial x_\alpha} &= \sum_{\alpha=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_\alpha} K_\alpha \frac{\partial \theta}{\partial x_\alpha}. \end{aligned} \quad (4.4.11)$$

Здесь $\delta_{\alpha\beta}$ — символ Кронекера, θ — отклонение температуры от температуры окружающего воздуха T_a . В качестве граничных условий используется предположение о наличии источника газовых выбросов с некоторой начальной скоростью

и с относительным перегревом, а также допущение об обращении θ и w в нуль на подстилающей поверхности и на бесконечном удалении от источника.

Отметим, что при получении системы уравнений (4.4.11) предполагалось, что на характер движения струи существенное влияние оказывает только атмосферная турбулентность. Турбулентностью, генерируемой самой струей, а также фазовыми превращениями воды при этом пренебрегали. Хотя известно, что теплота, выделяющаяся при конденсации водяного пара или поглощаемая при его испарении, оказывает определенное влияние на характер движения струи [142].

4.4.2. Характеристики турбулентности и скорости ветра. Уравнение диффузии (4.4.4) описывает изменение концентрации компонентов примеси в атмосфере с течением времени за счет адвективного переноса средним ветром, гравитационного оседания, процессов турбулентного перемешивания, химических и фазовых превращений. Кинетика этих процессов зависит от состояния атмосферы, которое можно охарактеризовать вертикальным профилем средней скорости ветра и коэффициентов турбулентной диффузии. Последние, в свою очередь, могут быть восстановлены методами турбулентной теории подобия по данным стандартных наземных метеорологических наблюдений.

Для определения вертикального профиля модуля скорости ветра $u(z)$ для горизонтального, однородного и стационарного пограничного слоя атмосферы можно воспользоваться, например, результатами работы [143], в соответствии с которыми:

$$u(z) = \frac{u_*}{\aleph} \tilde{u}(\tilde{z}), \quad (4.4.12)$$

где $\tilde{z} = z/\Lambda$ — безразмерная высота, $\Lambda = \aleph u_*/f$ — масштаб толщины пограничного слоя атмосферы, u_* — динамическая скорость, играющая роль масштаба скорости, \tilde{u} — безразмерная скорость, $\aleph = 0,4$ — постоянная Кармана, f — параметр Кориолиса.

Динамическая скорость u_* выражается через скорость u_1 на высоте флюгера z_1 с помощью соотношения, вытекающего из закономерностей приземного слоя [144, 145]:

$$u_* = \frac{\aleph u_1}{\ln(z_1/z_0) + A_k(\zeta_1)}, \quad (4.4.13)$$

где z_0 — параметр шероховатости подстилающей поверхности, k — номер категории устойчивости, $\zeta = z/L_k$ — безразмерная переменная, $\zeta_1 = z_1/L_k$, L_k — масштаб Монина-Обухова. Значения A_k определяются видом универсальных функций профиля скорости ветра, в частности, по результатам [143]:

$$A_k(\zeta) = -\psi_u(\zeta) + \psi_u(\zeta_0), \text{ где } \zeta_0 = z_0/L_k,$$

$$\psi_u(\zeta) = \begin{cases} -4,7 \cdot \zeta, & \text{при } \zeta > 0, \\ \ln \left[\left(\frac{1+x}{2} \right)^2 \cdot \left(\frac{1+x^2}{2} \right) \right] - 2 \arctan x, & \text{при } \zeta < 0, \end{cases}$$

где введено обозначение $x = (1 - 15 \cdot \zeta)^{1/4}$.

В таблицах 4.6 и 4.7 представлены типовые профили безразмерной скорости ветра \tilde{u} в зависимости от безразмерной координаты \tilde{z} , значения коэффициента L_k

Таблица 4.6. Типовые безразмерные вертикальные профили модуля скорости \tilde{u} , угла поворота ветра $\Delta\phi$, коэффициента \tilde{k} для холодного периода года и средние значения L_k для категорий устойчивости.

Категория устойчивости		\tilde{z}								L_k
		0,01	0,06	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	
1										-25
2	\tilde{u}	4,7	—	7,2	8,3	8,8	9,5	9,6	9,3	-48
	$\Delta\phi$	0	—	4	6	10	12	14	16	
	$\tilde{k}_z \cdot 10^2$	1,0	—	6,2	5,5	3,1	1,3	0,4	0,0	
3	\tilde{u}	5,1	—	7,8	9,0	9,8	10,4	10,0	—	-80
	$\Delta\phi$	0	—	5	9	12	15	19	—	
	$\tilde{k}_z \cdot 10^2$	0,9	—	4,9	3,6	1,1	0,4	0,0	—	
4	\tilde{u}	5,4	—	9,2	11,5	12,4	11,8	—	—	640
	$\Delta\phi$	0	—	8	14	19	28	—	—	
	$\tilde{k}_z \cdot 10^2$	0,8	—	2,1	0,8	0,2	0,0	—	—	
5	\tilde{u}	5,3	7,9	9,3	11,7	12,5	—	—	—	150
	$\Delta\phi$	0	2	13	22	33	—	—	—	
	$\tilde{k}_z \cdot 10^2$	0,8	2,1	1,9	0,6	0,1	—	—	—	
6	\tilde{u}	5,1	8,1	9,8	13,1	12,0	—	—	—	54
	$\Delta\phi$	0	5	20	27	39	—	—	—	
	$\tilde{k}_z \cdot 10^2$	0,8	1,5	1,1	0,2	0,0	—	—	—	
7	\tilde{u}	5,0	8,4	10,8	14,3	—	—	—	—	34
	$\Delta\phi$	0	10	28	44	—	—	—	—	
	$\tilde{k}_z \cdot 10^2$	0,7	1,1	0,1	0,0	—	—	—	—	

и углы поворота ветра $\Delta\phi$ в зависимости от категории устойчивости атмосферы [143].

Вертикальные профили коэффициентов поперечной K_y и вертикальной K_z турбулентной диффузии выражаются в виде [102, 138, 143]:

$$\begin{aligned} K_y(z) &= D_i + \aleph u_* \Lambda \tilde{k}_y(\tilde{z}), \\ K_z(z) &= D_i + \aleph u_* \Lambda \tilde{k}_z(\tilde{z}), \end{aligned} \quad (4.4.14)$$

где D_i — коэффициент молекулярной диффузии для i -той компоненты, \tilde{k}_y , \tilde{k}_z — безразмерные коэффициенты турбулентного обмена. Множитель $\aleph u_* \Lambda$ играет роль масштаба коэффициентов турбулентности.

Экспериментальные данные показывают [146], что до некоторой высоты \tilde{z}_m имеет место близкий к линейному рост коэффициента вертикальной турбулентной диффузии. При дальнейшем увеличении высоты значения коэффициента вертикального турбулентного обмена уменьшаются. Для безразмерного коэффициента поперечной турбулентной диффузии, в соответствии с работами [102, 138], может

Таблица 4.7. Типовые безразмерные вертикальные профили модуля скорости \tilde{u} , угла поворота ветра $\Delta\phi$, коэффициента \tilde{k} для теплого периода года (значения L_k соотв. табл. 4.6).

Категория устойчивости		\tilde{z}								
		0,01	0,06	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
1	\tilde{u}	3,2	—	4,7	5,2	5,4	5,6	5,8	5,9	6,0
	$\Delta\phi$	0	—	2	3	4	5	6	7	8
	$\tilde{k}_z \cdot 10^2$	1,5	—	14,8	23,8	26,9	27,2	25,5	22,7	19,6
2	\tilde{u}	3,7	—	5,3	6,4	6,8	7,1	7,4	7,6	7,7
	$\Delta\phi$	0	—	2	3	5	7	8	9	10
	$\tilde{k}_z \cdot 10^2$	1,3	—	9,7	13,7	13,7	11,8	8,9	6,5	3,9
3	\tilde{u}	3,9	—	6,4	7,4	8,1	8,7	8,9	8,9	—
	$\Delta\phi$	0	—	4	6	8	10	12	13	—
	$\tilde{k}_z \cdot 10^2$	1,1	—	6,0	5,2	3,0	1,4	0,4	0,2	—
4	\tilde{u}	4,2	6,5	7,4	8,8	9,7	10,2	—	—	—
	$\Delta\phi$	0	2	5	17	21	24	—	—	—
	$\tilde{k}_z \cdot 10^2$	0,9	3,1	3,8	2,6	1,4	0,3	—	—	—
5	\tilde{u}	4,4	7,2	8,8	11,8	11,9	—	—	—	—
	$\Delta\phi$	0	2	10	20	30	—	—	—	—
	$\tilde{k}_z \cdot 10^2$	0,8	1,4	1,4	0,4	0,0	—	—	—	—
6	\tilde{u}	4,2	7,7	10,1	13,7	12,0	—	—	—	—
	$\Delta\phi$	0	4	15	26	37	—	—	—	—
	$\tilde{k}_z \cdot 10^2$	0,7	1,1	0,6	0,1	0,0	—	—	—	—
7	\tilde{u}	3,9	8,0	11,0	14,3	13,0	—	—	—	—
	$\Delta\phi$	0	9	18	31	43	—	—	—	—
	$\tilde{k}_z \cdot 10^2$	0,7	0,8	0,5	0,0	0,0	—	—	—	—

быть использовано следующее приближение:

$$\tilde{k}_y(\tilde{z}) = \begin{cases} \tilde{k}_z(\tilde{z}_m) \tilde{u}(\tilde{z})/\tilde{u}(\tilde{z}_m), & \text{при } \tilde{z} \leq \tilde{z}_m, \\ \tilde{k}_z(\tilde{z}), & \text{при } \tilde{z} > \tilde{z}_m. \end{cases}$$

Приближение соответствует свойству изотропности атмосферной турбулентности для больших высот ($\tilde{z} \geq \tilde{z}_m$) и более сильному влиянию подстилающей поверхности на вертикальную компоненту коэффициента обмена (по сравнению с горизонтальной) для малых высот ($\tilde{z} \leq \tilde{z}_m$).

При необходимости определения скорости ветра и параметра турбулентности на высотах, не совпадающих с табличными, используется линейная интерполяция. Профиль модуля скорости ветра на малых высотах ($\tilde{z} < 0,01$) определяется при помощи универсальных функций Бюзингера:

$$\tilde{u}(\tilde{z}) = \ln(\tilde{z}/\tilde{z}_0) + A_k(\tilde{z}/\tilde{L}_k).$$

Учет времени рассеяния. При сравнении результатов численного моделирования и экспериментально измеренных концентраций важное значение имеет временной интервал осреднения значений концентраций, а следовательно, и времени диффузии. Это существенно и потому, что результаты от воздействия токсичной примеси определяются не только концентрацией, но и продолжительностью действия (см. раздел 1.3).

При увеличении времени диффузии в процесс перемешивания вовлекаются вихри все большего масштаба, и, как следствие, для адекватного описания реального процесса рассеяния коэффициенты диффузии должны быть функциями времени. Причем, поскольку спектр турбулентных вертикальных пульсаций ограничен со стороны низких частот [99] (из-за конечной высоты ПСА), наиболее чувствительными ко времени процесса оказываются коэффициенты горизонтального обмена. Так, например, поперечный коэффициент обмена может принимать значения от $0,1 \text{ м}^2/\text{с}$ (при времени рассеяния 20-40 с и времени осреднения 10 с) [99] до $10^5 - 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$ (при моделировании макротурбулентного обмена [147]). Это известный недостаток, присущий эйлеровому описанию на основе уравнения диффузии.

В работе [102] приведены численные оценки времени обычного осреднения коэффициентов турбулентного обмена τ — 2-3 мин. Сопоставление значений коэффициентов горизонтальной диффузии, рассчитанных по представленной модели атмосферной турбулентности для различных категорий устойчивости и полученных из экспериментальных данных [133], также свидетельствует о временных масштабах процесса порядка 10^2 с, хотя время осреднения профилей модуля скорости ветра соответствуют 1 часу [143]. Таким образом, поле концентрации, описываемое уравнением диффузии (4.4.4) с коэффициентами (4.4.14), определяется действием на процесс рассеяния вихрей сравнительно малого масштаба.

Указанное обстоятельство приводит к тому, что рассчитанные концентрации оказываются несколько выше экспериментальных, а поперечные размеры загрязненной зоны — уже. Один из способов учесть пульсации большего масштаба — ввести зависимость коэффициентов горизонтальной диффузии от расстояния до источника или от времени диффузии [102]. Такой подход удобен для описания одиночного точечного источника, но не подходит для расчета протяженных или нескольких источников в рамках численной модели.

Поэтому в настоящей работе используется упрощенный подход, учитывающий горизонтальные пульсации ветра. Суть предлагаемого подхода заключается в попытке статистически воспроизвести картину горизонтальных пульсаций.

Согласно экспериментальным данным [102], вероятность отклонения среднего за период τ направлений ветра на произвольный угол от среднего за период $T > \tau$ примерно подчиняется закону Гаусса. Тогда горизонтальные пульсации ветра можно ввести, изменяя через определенное число шагов по времени (при численном решении уравнения турбулентной диффузии) угол поворота ветра на случайную величину ξ с нулевым средним значением и дисперсией, соответствующей экспериментальной. При этом предполагается, что вертикальные пульсации корректно учтены в коэффициенте вертикального обмена.

Зависимости дисперсии флуктуаций от скорости ветра, времени осреднения пульсаций и класса устойчивости приведены в [102].

4.5. Тестирование моделей рассеяния примеси

Проверка адекватности моделей рассеяния примеси в атмосфере, используемых для прогноза последствий аварий, является достаточно актуальной задачей. В настоящее время разработано большое количество моделей, основанных на различных параметризациях и использующих различные подходы. Так, в реестре Европейского агентства по окружающей среде (European Environment Agency) [148] по состоянию на 2000 год зарегистрировано 96 моделей. Причем для тестирования моделей используются совершенно различные подходы (см., например, [90, 99, 150, 151]).

В 1991 году, под эгидой Национального исследовательского института окружающей среды (Дания), был начат проект по «гармонизации моделирования атмосферной дисперсии в целях регулирования» (harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes) [149]. В рамках проекта проводятся конференции, посвященные методологии проверки моделей рассеяния, разрабатываются тесты и методики тестирования. Текущие наработки представлены в программном продукте «model validation kit» [152], который включает в себя три набора данных по диффузионным экспериментам в пограничном слое атмосферы, набор программ и протоколов [153] для проверки теоретических моделей. Для тестирования моделей дисперсии примеси в атмосфере, представленных в настоящей работе, главным образом был использован этот программный продукт.

При тестировании сравнивались результаты модельных расчетов с данными полевых диффузионных экспериментов. Экспериментальные данные относятся к случаю одиночного точечного стационарного источника [154]. Очевидно, что такого рода тестирования все-таки недостаточно для моделей, описывающих нестационарные аварийные процессы. Хотя необходимо сказать, что время осреднения концентраций в используемых экспериментах варьируется от 15 до 60 мин. Пространственный охват — от 500 м до 50 км. Кроме того, метеорологические условия изменялись от одного измерения к другому.

Сравнивались максимальные концентрации на определенных расстояниях от источника c_{max} и, в некоторых случаях, интегральные концентрации в поперечном направлении c_{int} :

$$c_{int} = \int c(x, y | x^2 + y^2 = r^2) dy,$$

где r — радиус дуги. Все концентрации нормированы на значение мощности источника.

Результаты характеризуются следующими величинами: средним значением \bar{c} , дисперсией σ_c , систематической ошибкой ε , нормализованной среднеквадратичной ошибкой d , коэффициентом корреляции ξ , долей данных, попадающих в интервал $0,5 \leq c_{mod}/c_{exp} \leq 2 - N$, относительной систематической ошибкой σ_0 и относительной дисперсией δ_0 , определяемыми следующими выражениями [153]:

$$\sigma_c = \sqrt{(c - \bar{c})^2}, \quad (4.5.1)$$

$$\varepsilon = \bar{c}_{exp} - \bar{c}_{mod}, \quad (4.5.2)$$

$$d = \frac{(c_{exp} - c_{mod})^2}{c_{exp} \cdot c_{mod}}, \quad (4.5.3)$$

$$\xi = \frac{(c_{exp} - \bar{c}_{exp}) \cdot (c_{mod} - \bar{c}_{mod})}{\sigma_{c_{exp}} \cdot \sigma_{c_{mod}}}, \quad (4.5.4)$$

$$\sigma_0 = \frac{\bar{c}_{exp} - \bar{c}_{mod}}{0,5(\bar{c}_{exp} + \bar{c}_{mod})}, \quad (4.5.5)$$

$$\delta_0 = \frac{\sigma_{exp} - \sigma_{mod}}{0,5(\sigma_{exp} + \sigma_{mod})}, \quad (4.5.6)$$

где c_{exp} — значение концентрации, следующее из экспериментов, а c_{mod} — значение концентрации, отвечающее численному эксперименту.

«Совершенная» модель должна иметь σ_0 и d равные нулю и единичный коэффициент корреляции. Значение N , близкое к единице, характеризует степень неопределенности модели как «порядка 2».

Качественное поведение модели удобно иллюстрировать так называемым квантиль-квантильным графиком (К-К график). По оси ординат К-К графика откладываются значения прогнозируемых концентраций, упорядоченные в порядке возрастания, а по оси абсцисс — значения, отвечающие экспериментальным данным, упорядоченные аналогично [155].

При представлении статистических результатов тестирования приведены также и результаты проверки некоторых других моделей, известные по литературным источникам [156]:

- HPDM — гибридная модель лагранжевого клуба;
- IFDM — статистическая би-гауссова модель рассеяния;
- INPUFF — модель лагранжевого облака (клуба), используется однородное по вертикали поле ветра и несколько алгоритмов для описания диффузионного рассеяния;
- OML — модель лагранжевого облака.
- UK-ADMS — статистическая псевдо-гауссова модель: при устойчивой и нейтральной стратификации распределение концентрации подчиняется нормальному закону, при конвекции (неустойчивая стратификация) — закон вертикального распределения отличен от нормального.

Отметим, что более детальная информация по вышеуказанным моделям может быть найдена, например, в реестре [148].

Введем следующие обозначения для моделей, используемых в экспресс-методике: ЭКСБР — с дисперсиями, определяемыми зависимостями Бриггса, ЭКССХ — с дисперсионными зависимостями Смита-Хоскера. Во всех расчетах по моделям ЭКССХ и ЭКСБР в качестве входных параметров использовали скорость ветра на высоте источника, параметр шероховатости и класс устойчивости атмосферы. Для численной модели, изложенной в разделе 4.4, введено обозначение АТМ.

Хотя экспериментальные данные соответствуют условиям рассеяния от стационарного источника, все расчеты по моделям ЭКСБР, ЭКССХ и АТМ проводили методом установления, т. е. фактически проводили тестирование модели,

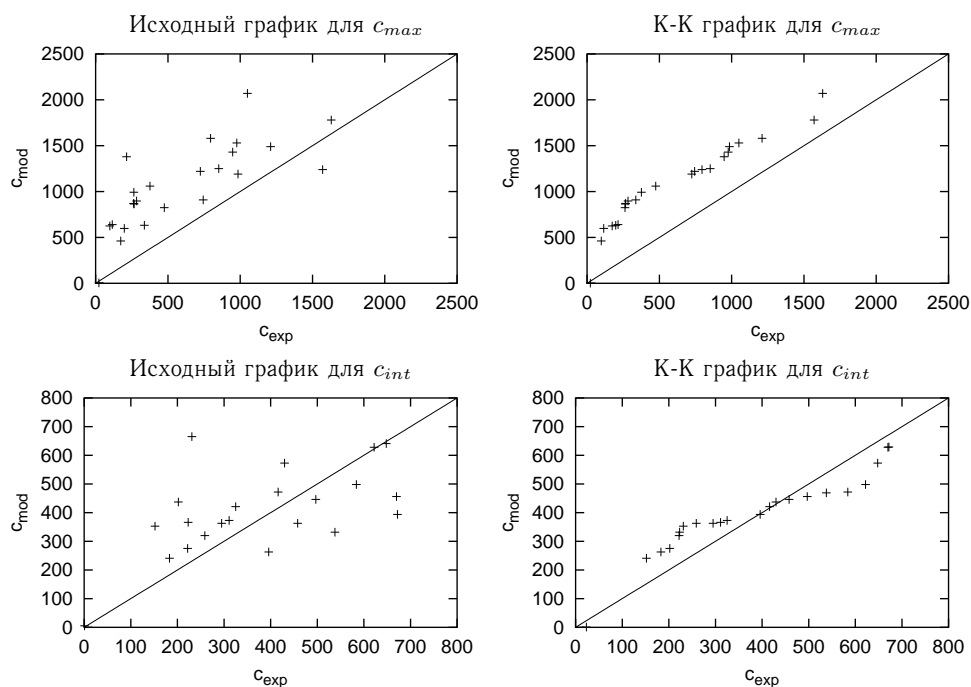


Рис. 4.2. Сопоставление прогнозируемых (модель АТМ) и наблюдаемых концентраций для экспериментов в г. Копенгагене

описывающей нестационарное концентрационное поле, на предмет сходимости к некоторому стационарному значению (за соответствующее эксперименту время), зафиксированному в диффузионном эксперименте.

4.5.1. Рассеяние примеси в условиях городской застройки. Серия экспериментов по рассеянию примеси проводилась в северной части города Копенгагена в 1978-79 гг при нейтральной и неустойчивой стратификации атмосферы [157]. Стационарный источник пассивной примеси (SF_6) располагался на высоте 115 м в зоне жилой застройки. В экспериментах фиксировались концентрации на высоте 2-3 м, усредненные по временному интервалу один час. Датчики были расположены в виде трех дуг, удаленных от источника на расстояние 2-6 км. Средняя высота шероховатости составляла $0,5 \text{ м}^2$.

На рис. 4.2 приведены результаты расчетов по численной модели (слева — исходные данные, справа — К-К график). В расчетах использовались следующие входные данные: широта местности, параметр шероховатости, класс устойчивости, скорость ветра на высоте 10 м, масштаб Монина-Обухова. Результаты расчетов по экспресс-методике приведены на рисунках 4.3 и 4.4.

Статистические характеристики рассматриваемых моделей и моделей, известных по литературным источникам, представлены в таблицах 4.8 и 4.9.

²Рекомендуемая высота шероховатости согласно [152].

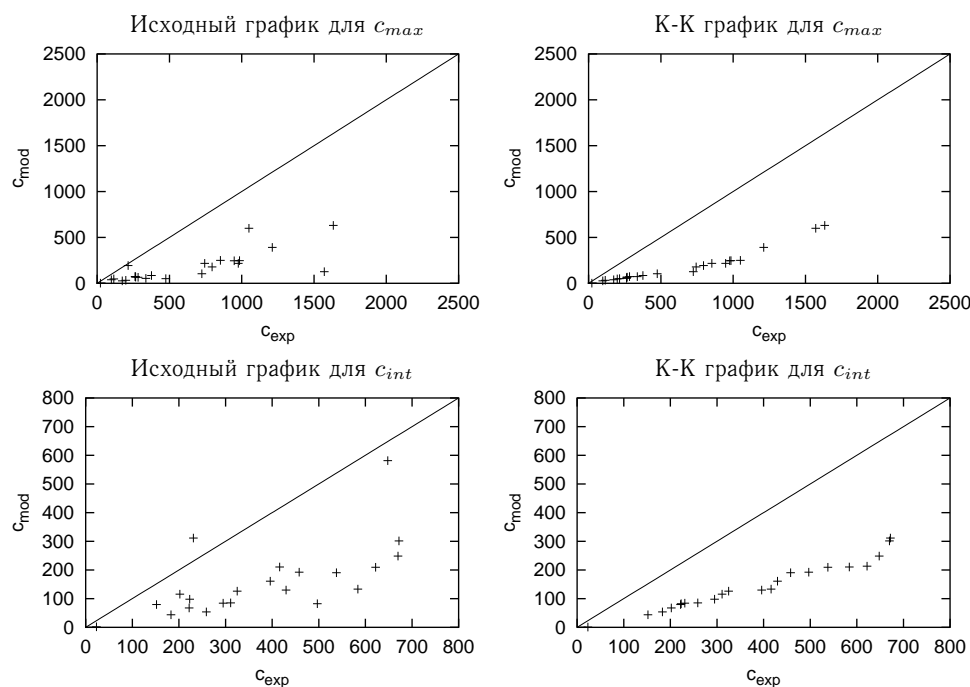


Рис. 4.3. Сопоставление прогнозируемых (модель ЭКСБР) и наблюдаемых концентраций для экспериментов в г. Копенгагене

Можно отметить общую тенденцию большинства моделей в недооценке максимальных концентраций. Соответственно, несколько занижены значения интегральных концентраций. Однако численная модель демонстрирует обратную тенденцию — систематическую переоценку максимальных концентраций, что обеспечивает некоторый запас надежности.

Таблица 4.8. Прогнозируемые значения максимальных концентраций, отвечающие эксперименту в г. Копенгагене.

Модель	\bar{c}_{max}	σ_c	ε	d	ξ	N	σ_0	δ_0
Эксп.	632,66	450,25	0,00	0,00	1,000	1,000	0,000	0,000
АТМ	1110,13	407,11	-477,70	0,45	0,756	0,565	-0,548	0,100
ЭКСБР	174,60	164,36	458,05	2,97	0,753	0,087	1,135	0,930
ЭКССХ	603,99	374,28	28,67	0,30	0,674	0,870	0,046	0,184
HPDM	358,23	268,09	274,42	0,61	0,874	0,652	0,554	0,507
IFDM	551,87	345,27	80,79	0,19	0,843	0,870	0,136	0,264
INPUFF	560,55	352,65	72,10	0,50	0,490	0,739	0,121	0,243
OML	283,61	251,05	349,05	1,12	0,823	0,217	0,762	0,568
UK-ADMS	177,12	138,48	455,53	2,84	0,891	0,043	1,125	1,059
UK-ADMS(доп.)	261,84	176,89	370,82	1,37	0,913	0,348	0,829	0,872

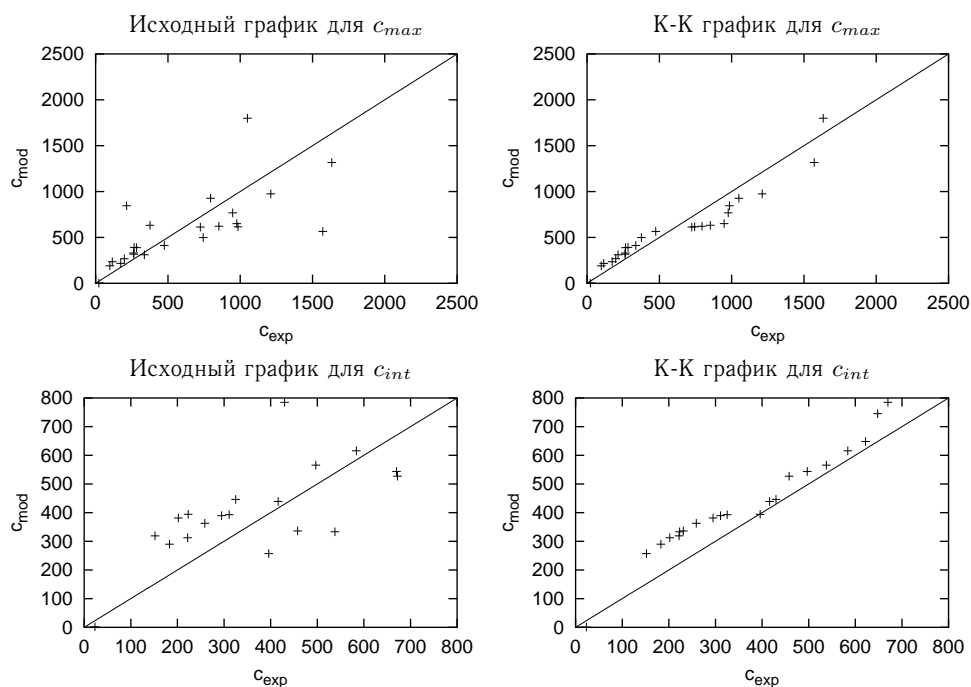


Рис. 4.4. Сопоставление прогнозируемых (модель ЭКССХ) и наблюдаемых концентраций для экспериментов в г. Копенгагене

Указанное обстоятельство, по-видимому, обусловлено недооценкой поперечного коэффициента обмена в городской черте. Известно, что в черте города наблюдается повышенное поперечное рассеяние примеси [99].

Из экспресс-моделей наилучший результат получен для модели ЭКССХ, расчеты по ЭКСБР сильно занижают приземные концентрации. Интересно, что только

Таблица 4.9. Прогнозируемые значения интегральных концентраций в направлении, перпендикулярном направлению ветра. Эксперимент в г. Копенгагене.

Модель	\bar{c}_{int}	σ_c	ε	d	ξ	N	σ_0	δ_0
Эксп.	448,70	239,29	0,00	0,00	1,000	1,000	0,000	0,000
АТМ	433,83	121,68	15,04	0,22	0,518	0,870	0,034	0,654
ЭКСБР	181,19	127,97	267,51	1,36	0,564	0,261	0,849	0,606
ЭКССХ	529,33	244,83	-80,63	0,30	0,453	0,913	-0,165	-0,023
HPDM	382,32	161,62	66,37	0,16	0,778	1,000	0,160	0,387
IFDM	443,26	193,38	5,43	0,16	0,681	0,957	0,012	0,212
INPUFF	339,59	180,43	109,10	0,46	0,361	0,696	0,277	0,280
OML	249,17	131,70	199,52	0,52	0,893	0,565	0,572	0,580
UK-ADMS	207,05	110,68	241,64	0,86	0,912	0,348	0,737	0,735
UK-ADMS(доп.)	297,06	122,51	151,63	0,34	0,856	0,783	0,407	0,646

Таблица 4.10. Прогнозируемые значения максимальных концентраций, отвечающие эксперименту в г. Лиллестреме.

Модель	$\bar{c}_{max} \cdot 10^4$	$\sigma_c \cdot 10^4$	$\varepsilon \cdot 10^4$	d	ξ	N	σ_0	δ_0
Эксп.	6,72	5,70	0,00	0,00	1,000	1,00	0,000	0,000
АТМ	3,70	2,19	3,02	2,25	-0,383	0,60	0,579	0,888
АТМ*	5,73	3,40	0,99	0,58	0,583	0,65	0,159	0,505
ЭКСБР	4,38	4,92	2,34	1,20	0,479	0,55	0,421	0,146
ЭКССХ	4,27	3,26	2,46	1,16	0,428	0,50	0,447	0,543
HPDM	3,04	3,24	3,68	1,54	0,678	0,35	0,753	0,550
IFDM	4,49	4,04	2,23	1,83	-0,029	0,60	0,399	0,339
INPUFF	3,84	3,57	2,88	1,99	0,055	0,50	0,546	0,460
OML	2,24	3,07	4,48	2,23	0,810	0,20	0,999	0,598
UK-ADMS	1,73	2,27	4,99	4,07	0,585	0,15	1,180	0,861

модель ЭКССХ дает завышенные интегральные концентрации, тогда как максимальные концентрации воспроизводятся довольно хорошо. Вероятно, это обусловлено тем, что для параметризации поперечной дисперсии в модели ЭКССХ используется выражение, полученное для сельской местности (см. выражения (4.2.16) и (4.2.18)). Использование дисперсии для городской черты приводит к тому, что прогноз по модели ЭКССХ также оказывается занижен.

Кроме того, необходимо обратить внимание на тот факт, что в экспресс-методике подразумевается постоянство скорости ветра с высотой, тогда как скорости ветра на высоте источника и высоте 10 м, по данным измерений, различаются в 2 раза. Следовательно, выбирая по разному параметр u_1 (измеренную на высоте источника, на высоте флюгера или средневзвешенную по высоте скорость ветра) в экспресс-моделях всегда можно добиться хорошего согласия прогнозируемых концентраций с измеряемыми.

4.5.2. Рассеяние примеси при низких скоростях ветра. Эксперименты по рассеянию примеси в приземном слое проводили в городке Лиллестреме (Норвегия) зимой 1987 г. при довольно низкой температуре воздуха ($\approx -20^\circ\text{C}$). Источник пассивной примеси (SF_6) располагался на мачте на высоте 36 м. Примесь рассеивалась в районе жилой застройки, где высота зданий и деревьев составляет 6-10 м. Значение параметра шероховатости принималось равным 1 м. Измерялась средняя по интервалу времени 15 минут концентрация примеси на уровне земли. Метеорологические условия характеризуются небольшими скоростями ветра.

В рамках численной модели кроме основного метода расчета использовали дополнительный метод расчета, в котором были введены флуктуации среднего ветра в вертикальном направлении. При этом предполагалось, что дисперсия вертикальных флуктуаций составляет половину значения поперечной дисперсии. Последнее предположение основывается на соответствующих экспериментальных наблюдениях.

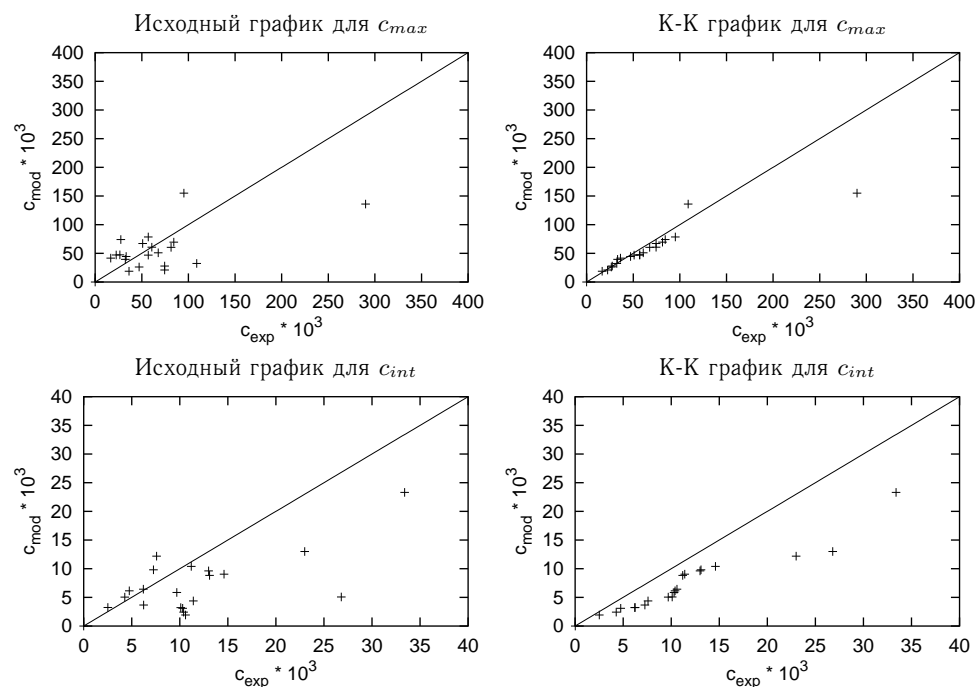
Статистические характеристики прогнозирования распределения примеси в атмосфере представлены в таблицах 4.10 и 4.11. В таблицах второй метод расчета

Таблица 4.11. Прогнозируемые значения интегральных концентраций в направлении, перпендикулярном направлению ветра. Эксперимент в г. Лиллестреме.

Модель	$\bar{c}_{int} \cdot 10^3$	$\sigma_c \cdot 10^3$	$\varepsilon \cdot 10^3$	d	ξ	N	σ_0	δ_0
Эксп.	11,8	7,53	0,00	0,00	1,000	1,00	0,000	0,000
АТМ	2,51	1,87	9,31	4,79	0,174	0,15	1,300	1,203
АТМ*	7,34	4,89	4,49	0,62	0,639	0,70	0,468	0,250
ЭКСБР	4,93	3,73	6,89	1,81	0,222	0,25	0,823	0,675
ЭКССХ	4,82	4,24	7,00	1,63	0,488	0,40	0,842	0,559
HPDM	3,82	3,71	7,99	2,18	0,644	0,20	1,022	0,679
IFDM	3,94	3,89	7,87	2,34	0,424	0,20	0,999	0,637
INPUFF	4,96	4,80	6,86	1,52	0,525	0,40	0,818	0,443
OML	4,30	4,53	7,52	1,86	0,576	0,25	0,933	0,498
UK-ADMS	2,88	3,57	8,94	3,48	0,574	0,20	1,216	0,713

по численной модели обозначен как АТМ*. На рис. 4.5 приведены результаты расчетов по численной модели (слева — исходные данные, справа — К-К график). Результаты расчетов по экспресс-моделям представлены на рисунках 4.6 и 4.7.

Результаты прогноза рассеяния примеси в атмосфере с использованием математических моделей для условий диффузионных экспериментов, проведенных в

**Рис. 4.5.** Сопоставление прогнозируемых (модель АТМ) и наблюдаемых концентраций для условий г. Лиллестрема

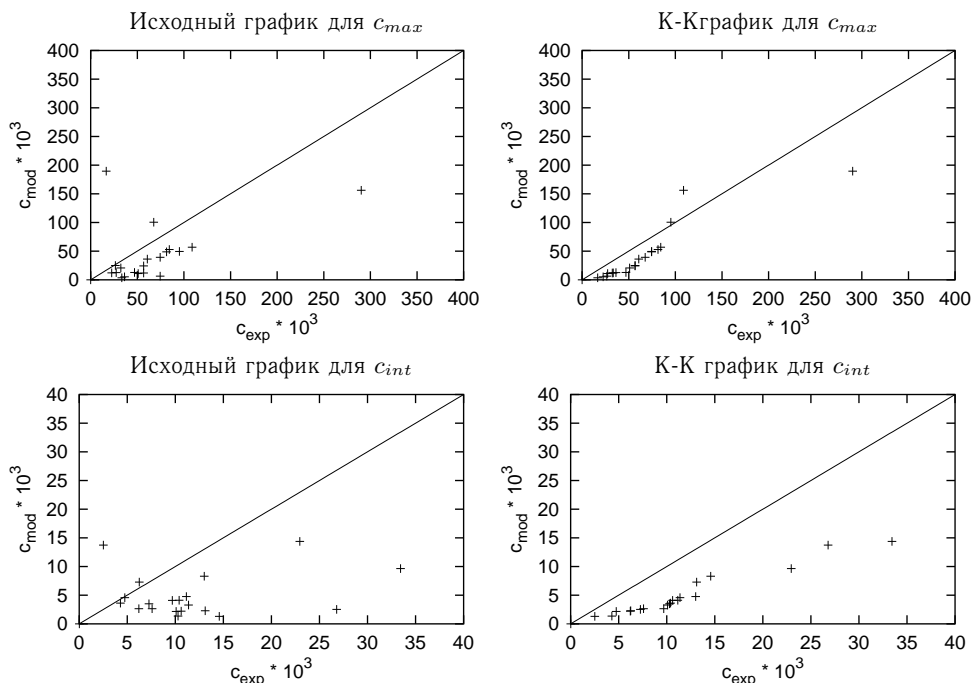


Рис. 4.6. Сопоставление прогнозируемых (модель ЭКСБР) и наблюдаемых концентраций для условий г. Лиллестрема

районе города Лиллестрема, приводят к результатам, отличающимся от результатов, полученных экспериментально. Анализ условий экспериментов позволяет выдвинуть несколько гипотез, объясняющих различия [156]: во-первых, метеорологические характеристики измерялись вне Лиллестрема; во-вторых, высота зданий (6-10 м) сравнима с высотой источника (36 м). Кроме того, отмечалось [156], что анализ полного набора метеорологических данных выявил присутствие гравитационных волн.

Важным обстоятельством может являться также тот факт, что в основе некоторых моделей лежит теория подобия Монина-Обухова для определения метеорологических величин в приземном слое. В случае слабо выраженной турбулентности (низкие скорости ветра или устойчивая стратификация) на профиль метеорологических величин оказывают существенное воздействие мезомасштабные возмущения (локальная неоднородность поверхности, гравитационные волны и т. д.), что приводит к некоторой неадекватности теории Монина-Обухова [158] и, соответственно, таких математических моделей рассеяния.

Отметим, что попытка смоделировать такие возмущения, хотя и в довольно грубой форме, в рамках численной модели приводят к существенному улучшению результатов прогноза. На важность учета низкочастотных колебаний направления ветра (ответственных за меандрирование струи) в рамках моделей рассеяния при условиях, близких к штилю, указывалось, в частности, в работах [150, 151].

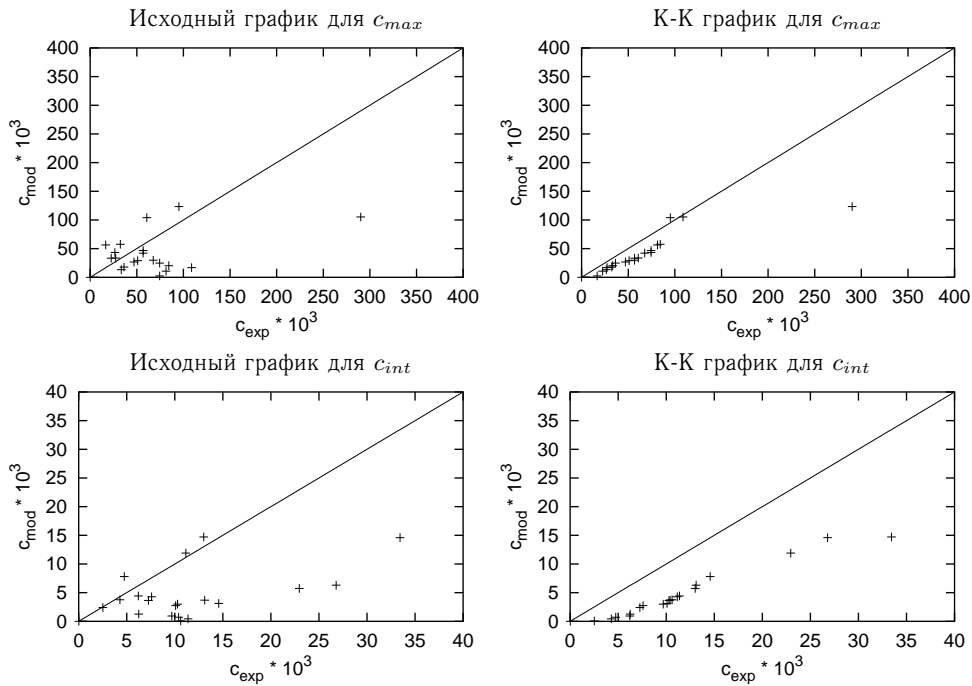


Рис. 4.7. Сопоставление прогнозируемых (модель ЭКССХ) и наблюдаемых концентраций для условий г. Лиллестрема

4.5.3. Рассеяние перегретой примеси. Тепловая электростанция г. Кинсайда (штат Иллинойс, США) расположена в сельской местности с несколькими озерами. Примесь (SF_6) вводилась в дымовую трубу электростанции, которая имеет высоту 187 м и внутренний диаметр устья 9 м. Начальный перегрев примеси относительно окружающего воздуха составлял до $150^\circ C$, начальная скорость выхода газа — от 10 до 30 м/с. В экспериментах фиксировались приземные концентрации, усредненные по временному интервалу один час. Последовательные серии измерений выполнялись на протяжении 6-10 часов. Датчики были удалены от источника эмиссии на расстояния от 1 до 50 км. Для проверки модели использовали данные с индикаторами качества 2-3 [152, 156]. Среднее значение параметра шероховатости принималось равным 10 см.

При моделировании последовательной серии измерений в рамках численной модели АТМ входные параметры модели изменяли в соответствии с метеослужбиями эксперимента, однако поле концентраций бралось с конца предыдущего численного эксперимента, так что направление ветра для всех серий оставалось постоянным. Однако то обстоятельство, что в действительности направление ветра менялось от одного измерения к другому, привело к некоторой дополнительной переоценке прогнозируемых концентраций.

Таблица 4.12. Прогнозируемые значения максимальных концентраций. Серия экспериментов в г. Кинсайде.

Модель	\bar{c}_{max}	σ_c	ε	d	ξ	N	σ_0	δ_0
Эксп.	40,96	39,27	0,00	0,00	1,000	1,000	0,000	0,000
АТМ ¹	63,92	77,27	-22,96	3,14	-0,031	0,146	-0,438	-0,652
АТМ ²	35,30	60,46	5,66	3,56	0,017	0,137	0,148	-0,425
АТМ ³	84,52	63,51	-43,57	1,94	0,155	0,379	-0,694	-0,472
АТМ ⁴	63,26	56,34	-22,61	1,51	0,297	0,357	-0,435	-0,371
ЭКСБР	72,27	76,29	-31,31	2,67	0,073	0,332	-0,553	-0,641
ЭКССХ	43,95	45,07	-2,99	1,92	0,035	0,282	-0,070	-0,138
HPDM	42,3	38,61	-1,40	1,16	0,337	0,514	-0,034	0,017
IFDM	29,79	28,81	11,17	2,06	-0,007	0,395	0,316	0,307
INPUFF	30,41	26,82	10,55	1,49	0,244	0,437	0,296	0,377
OML	38,42	43,84	2,54	1,63	0,264	0,437	0,064	-0,110
UK-ADMS	89,59	121,28	-48,63	4,73	0,131	0,435	-0,745	-1,022

¹ Расчет по (4.4.10). Базовая параметризация пограничного слоя атмосферы (ПСА).

² Расчет по (4.4.10). Используется экспериментальное значение высоты ПСА.

³ Совместное решение (4.4.4) и (4.4.11). Базовая параметризация ПСА.

⁴ Совместное решение (4.4.4) и (4.4.11). Используется эксп. значение высоты ПСА.

На рис. 4.8 приведены результаты расчетов максимальных концентраций по численной модели (слева — исходные данные, справа — К-К график) для обоих методов учета начального подъема примеси. Статистические характеристики прогноза рассеяния перегретой примеси в атмосфере для диффузионных экспериментов в районе электростанции г. Кинсайда представлены в таблице 4.12.

Результаты расчетов вновь демонстрируют тенденцию численной модели к переоценке приземных концентраций. Отметим, что использование экспериментальных значений высоты ПСА в обоих вариантах расчета приводит к улучшению результатов: увеличению коэффициента корреляции и уменьшению отклонения. Вариант расчета с использованием эффективной высоты источника, хотя и привлекателен с точки зрения экономии машинных ресурсов, неудовлетворителен с физической точки зрения: в случае если эффективная высота источника, рассчитанная по (4.4.10), превышает высоту слоя трения, то прогнозируются чрезвычайно низкие (или нулевые) приземные концентрации. Однако соответствующие экспериментальные измерения регистрируют отличные от нуля концентрации.

На рис. 4.9 и 4.10 представлены результаты расчетов рассеяния перегретой примеси, выполненные по экспресс-методике с учетом начального перегрева по формуле (4.4.10).

Наилучшие показатели получены при расчете дисперсий по формуле Смита-Хоскера. Следует подчеркнуть, что корреляция прогнозируемых концентраций по экспресс-моделям и экспериментальных данных довольно низка (3-5%), тогда как при прогнозе по численной модели корреляция составляет 30% (что несколько хуже, чем для HPDM модели - 34%).

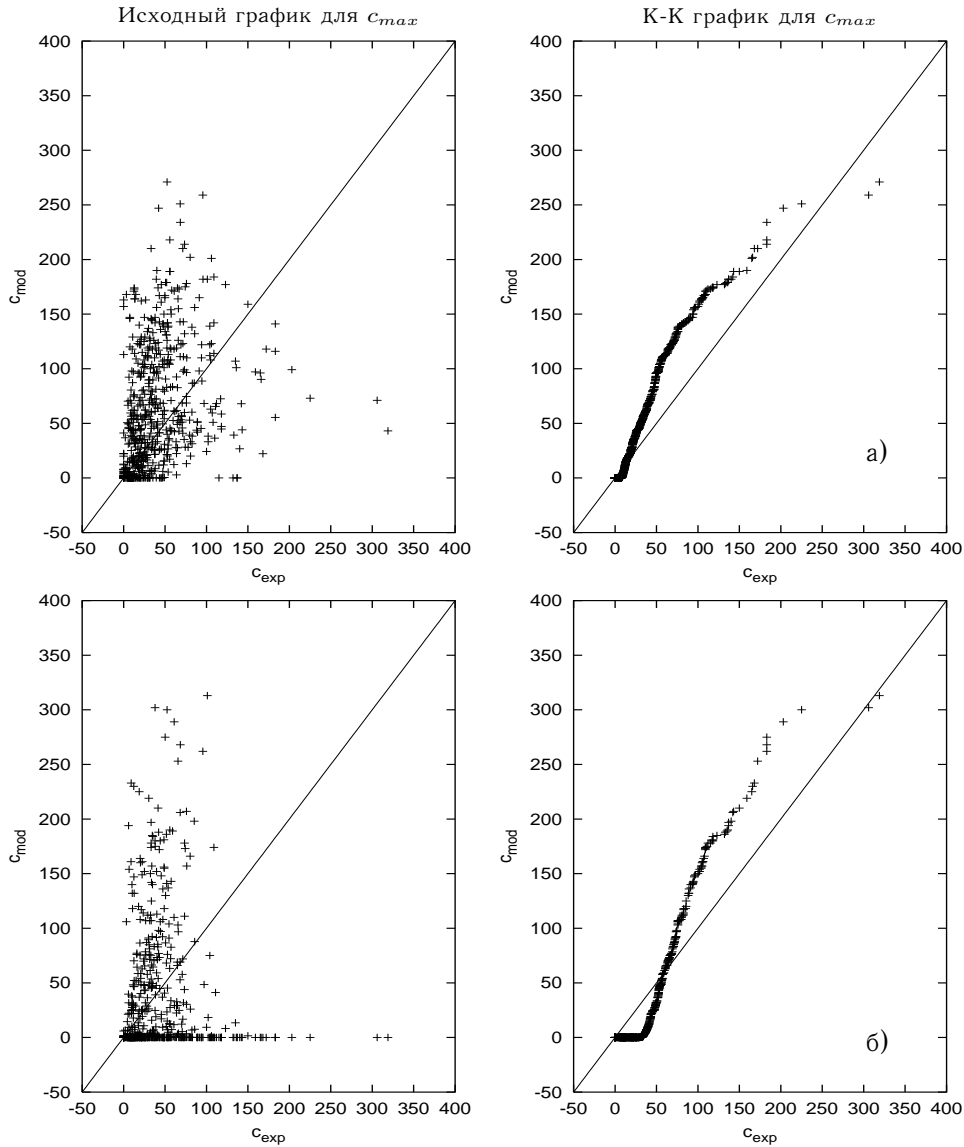


Рис. 4.8. Сопоставление прогнозируемых (модель АТМ) и наблюдаемых концентраций для условий г. Кинсайда: а) совместное решение (4.4.4) и (4.4.11); б) расчет при помощи формулы (4.4.10)

Тестирование моделей турбулентного рассеивания примеси в атмосфере показало, что численная модель, в среднем, приводит к некоторой переоценке среднечасовых приземных концентраций для большинства метеорологических условий. В конечном итоге, это приводит к несколько завышенным оценкам аварийного риска, что, впрочем, отвечает общей идеологии прогнозирования. Некоторая

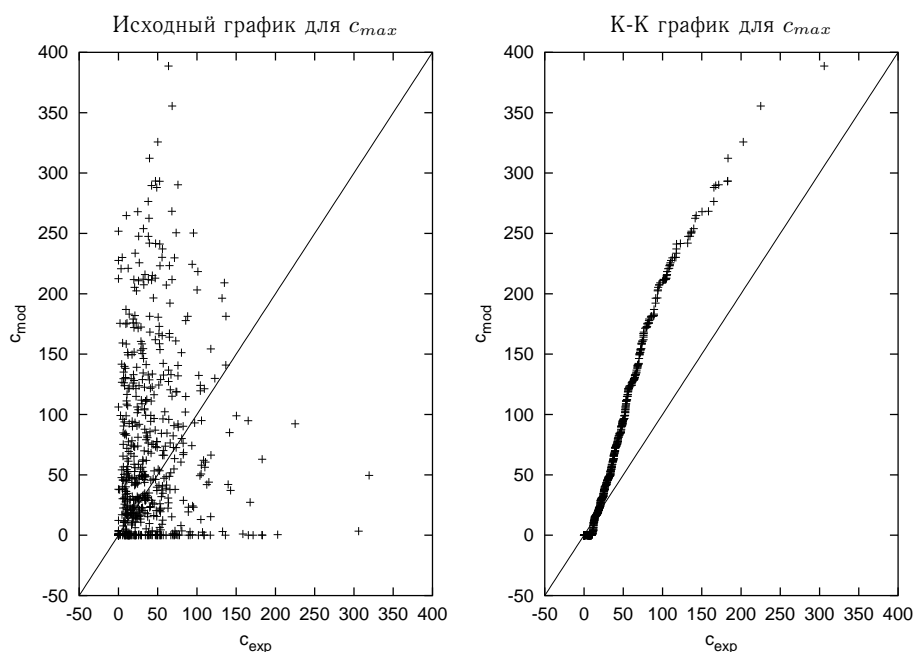


Рис. 4.9. Сопоставление прогнозируемых (модель ЭКСБР) и наблюдаемых концентраций для условий г. Кинсайда

недооценка максимальных приземных концентраций возможна вблизи высотного источника. Определенными неточностями характеризуется прогноз распределения примеси при малых скоростях среднего ветра (штиле). Указанные обстоятельства, по-видимому, обусловлены тем, что используемые коэффициенты обмена описывают мелкомасштабную турбулентность.

При прогнозировании загрязнения атмосферы с помощью экспресс-моделей гауссового типа целесообразно использовать дисперсионные зависимости Смита-Хоскера, которые обеспечивают достаточно хорошие результаты для большинства метеорологических условий.

Результаты тестовых расчетов также показали, что достаточно грубый учет рельефа подстилающей поверхности в виде эквивалентной высоты шероховатости, позволяет с удовлетворительной погрешностью прогнозировать среднечасовые значения приземных концентраций. Следует отметить, что учет рельефа подстилающей поверхности в рамках численной модели является относительно простой задачей, поскольку требуется лишь воспроизвести поле течения, тогда как мелкомасштабная турбулентность учтена в коэффициентах обмена.

Кроме того, сопоставление прогнозов с экспериментами по рассеянию примеси в районе г. Кинсайда позволяет утверждать, что модели продолжают удовлетворительно работать на масштабах времени нескольких часов (до 5-7), если рельеф подстилающей поверхности можно считать достаточно однородным.

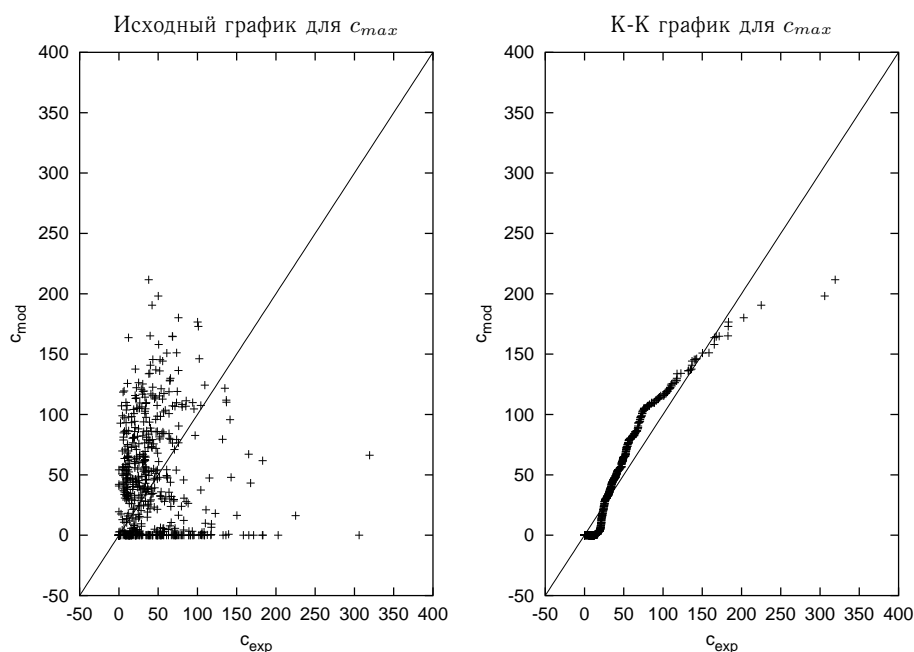


Рис. 4.10. Сопоставление прогнозируемых (модель ЭКССХ) и наблюдаемых концентраций для условий г. Кинсайда

4.6. Заключение

Заканчивая этот экскурс в задачу турбулентного рассеяния примеси в атмосфере, остановимся на вопросе о целесообразности использования того или иного модельного подхода.

По всей видимости, использование экспресс-методик прогноза зоны заражения, основанных на гауссовых статистических моделях, целесообразно только при отсутствии вычислительной техники, поскольку расчет может быть выполнен аналитически. Однако последнее обстоятельство остается верным только в случае одиночного точечного «мгновенного» источника. При описании нестационарного концентрационного поля от нескольких источников продолжительного времени действия, как и при моделировании пространственных источников, требуется учитывать вклады от элементарных «облаков» для каждого рецептора. Последнее обстоятельство приводит к тому, что вычислительные затраты становятся сравнимыми с затратами, требуемыми на проведение прямого численного моделирования. Кроме того, известные трудности возникают при моделировании процессов испарения и химических превращений, при учете вертикальной неоднородности пограничного слоя.

В свою очередь, использование численной эйлеровой модели, построенной на базе полумпирического уравнения диффузии, снимает вышеуказанные сложности. Использование экономичных численных схем в сочетании с параллельными

вычислениями обеспечивают низкое время счета, сравнимое с вычислительными затратами при проведении расчетов по экспресс-моделям. При численном решении не возникает особых трудностей при моделировании множественных пространственных источников. Достаточно тривиальной задачей является учет изменения метеорологических параметров, особенностей рельефа местности и характера подстилающей поверхности.

Таким образом, обоснование использования численной эйлеровой модели включает следующие пункты. Во-первых, сопоставление экспериментальных данных и расчетов для сложной ситуации (эмиссия перегретой примеси) показывает, что численная модель обеспечивает более высокую степень корреляции. Во-вторых, при численном решении можно использовать экспериментально измеряемые величины. В-третьих, использование численной модели имеет некоторые дополнительные преимущества, например, возможность постановки прямых численных экспериментов по детальному моделированию начальной стадии аварийного воздействия, формирования вторичного источника заражения. Наконец, вычислительные затраты, как отмечалось выше, можно понизить и сравнить во времени счета с экспресс-моделями (методиками).

Существующие подходы к решению задач турбулентного рассеяния примеси весьма разнообразны, разработано огромное число различных моделей и параметризаций. Цель данной главы — дать не всеобъемлющее описание, а лишь представление о различных ключевых методах моделирования атмосферного рассеяния и познакомить с наработками авторов. Предлагаемые здесь методы и модели могут использоваться и интенсивно используются для решения практических задач. Чтобы усовершенствовать предложенные модели и более полно использовать их возможности, необходимо провести дополнительные исследования, относящиеся к характеристикам атмосферной турбулентности и более детальному тестированию по данным полевых диффузионных экспериментов.

Компьютерная система прогноза последствий аварий

Реализация моделей, описанных в предыдущих главах, привела к созданию компьютерной системы (КС) «ChemRisk», ориентированной на использование специалистами разного уровня подготовки в области решения задач по обеспечению безопасности.

При разработке КС преследовалось несколько различных целей. Во-первых, создание высокопроизводительного программного обеспечения (ПО) с поддержкой параллельных вычислений для наиболее вычислительно-затратных задач. Фактически, эта цель являлась главной, поскольку

- типовой расчет риска включает в лучшем случае несколько десятков аварийных ситуаций (АС), каждая из которых может иметь до сотни реализаций;
- современные информационные технологии позволяют организовать виртуальную параллельную вычислительную систему (ПВС) из довольно дешевых персональных компьютеров (ПК) на базе свободно распространяемого системного ПО.

Во-вторых, обеспечение учета разнообразных входных данных, используемых моделей и аварийных сценариев для привязки к особенностям конкретного техногенного объекта. В-третьих, обеспечение обработки в автономном фоновом режиме огромного количества АС и их реализаций. В-четвертых, обеспечение возможности интеграции с другими программными продуктами, легкая модифицируемость и расширяемость КС. Наконец, переносимость программного обеспечения, начиная с ПК и заканчивая UNIX-рабочими станциями.

Для достижения указанных целей были использованы следующие методы:

- использование промышленных стандартов для системных интерфейсов: POSIX [159], MPI [160];
- объектно-ориентированный подход (ООП) к разработке ПО [161];
- реализация на высокоуровневых переносимых языках: ANSI C/C++ [162];
- разнесение расчетных, управляющих и графических модулей;
- отказ от встроенного графического интерфейса пользователя и использование интерпретируемых языков в качестве управляющих программ;
- реализация расчетных модулей либо в виде небольших самостоятельных программ, либо в виде динамически загружаемых в интерпретатор библиотек;
- организация обмена данными через файлы.

Текущая версия системы релизована и протестирована для следующих UNIX-платформ: Sun Sparc/OC Solaris, Intel Pentium/OC Linux, однако, может быть перенесена и на другие UNIX-платформы.

5.1. Объектно-ориентированный дизайн

Объектно-ориентированный подход [161] к разработке ПО полагается на довольно простые понятия для управления сложными системами. Секрет успешного применения ООП заключается в построении такой абстрактной модели (имеется в виду программная модель), которая близко соответствует предметам и понятиям (прагматике) рассматриваемой области. Хорошая модель обязана своей устойчивости и силе тем инвариантам (существенным признакам и свойствам), которые присутствуют в предметной области. В большинстве случаев, проблемная область довольно статична по отношению к классам объектов. Таким образом, абстрактные модели, основанные на предметных классах, имеют внутреннюю гибкость к неизбежным изменениям, происходящим при эволюции модели.

В свою очередь, другой подход к программированию — процедурно-ориентированное программирование, использует для отражения инвариантов предметной области несколько иные абстракции — процедуры, которые соответствуют процессам (операциям, действиям), протекающим в проблемной области. Взаимосвязь между различными процедурами является главной опорой процедурной модели. Обычно главные процедуры связываются в главный модуль, являющийся «хребтом» программы. Однако абстрактные процедуры имеют тенденцию к изменению при доработке старых или разработке новых алгоритмов: эволюция модели приводит к добавлению новых аспектов проблемной области, что влечет серьезные изменения в процедурах и их дробление. Указанное обстоятельство может привести к дальнейшему ветвлению программы и, зачастую, изменению ее логики.

Объектно-ориентированные программы рассматривают проблемную область в терминах ее объектов и их классов. Может быть выделено несколько классов объектов, и, соответственно, один или несколько объектов выделенного класса. Каждый класс характеризуется наборами элементов данных (атрибутов) и операций (методов). Объекты одного класса имеют идентичные атрибуты, хотя значения этих атрибутов могут быть различны. Объекты одного класса ведут себя одинаково, поскольку используют одинаковые методы.

Поведение класса определяется его методами, которые олицетворяют взаимодействие объектов класса с другими объектами. Методы также образуют интерфейс объектов данного класса. Тогда как реализация данного метода в рамках интерфейса может меняться, последний остается достаточно стабильным. Это позволяет развиваться модели путем добавления новых классов не затрагивая существующие классы. Таким образом, классы объектов и их интерфейсы служат безопасной структурой для абстрактной модели. Их внутренняя неизменность, полученная из инвариантов проблемной области, приводит к стабильности модели, делая ее эластичной для изменений.

Понятия абстракции, инкапсуляции и наследования служат дополнительными источниками стабильности модели, добавляя безопасные способы работы с зависимостями между классами.

Абстракция позволяет управлять сложностью модели путем концентрации на существенных аспектах объекта: абстрактный объект является «черным ящиком» с определенными свойствами, которые определяют поведение объекта при взаимодействии с другими объектами. Инкапсуляция, реализующая концепцию «скрытия информации», имеет дело с реализацией поведения объектов: детали реализации должны быть максимально «невидимы», «видны» должны быть только интерфейсы. Использование инкапсуляции помогает уменьшить сложность ПО, усиливая барьеры между абстрактными объектами: все, что происходит внутри абстрактного объекта остается скрытым. Понятие наследования также уменьшает сложность путем организации подобных классов в иерархические деревья: более общие классы находятся вблизи корня, движение от корня соответствует более специализированным классам. Использование наследования делает модель более гибкой, поскольку изменения просто реализуются расширением иерархии классов.

Таким образом, использование ООП способствует решению таких сложных проблем, как:

- уменьшение сложности ПО;
- повышение надежности ПО;
- обеспечение возможности модификации отдельных компонент КС без изменения остальных ее компонентов;
- возможность повторного использования КС.

Итак, прикладная система представляет собой множество взаимозависимых объектов. Каждый объект характеризуется набором атрибутов, значения которых определяют состояние объекта, и набором операций, которые можно применять к этому объекту. Объектная модель системы задает множество взаимозависимых объектов, составляющих систему, и, следовательно, определяет набор интерфейсов, доступных внутри системы. Все возможности по обработке данных внутри системы (т. е. в каждом объекте, входящем в состав системы) определяются этим набором интерфейсов, который задает внутреннее окружение (или среду) системы.

Введем понятие подсистемы, именуемой в дальнейшем и как компонент компьютерной системы. Подсистема [161] — это набор объектов и подсистем, обеспечивающих некоторую функциональность и взаимодействующих между собой в соответствии с их интерфейсами. Интерфейс подсистемы представляет собой подмножество объединения интерфейсов всех объектов и подсистем, составляющих эту подсистему. В состав подсистемы может входить один или более взаимозависимых объектов и/или подсистем. Взаимосвязь подсистем определяет архитектуру КС. В свою очередь, каждая подсистема может иметь свою архитектуру.

В рассматриваемой компьютерной системе подсистемы реализованы либо в виде отдельных небольших программ с организацией интерфейсов через внешние файлы, либо в виде модулей к высокоуровневому интерпретируемому языку Python [163–167], используемому как «склеивающая» основа для различных подсистем и организации интерфейса к ним. Выбор языка Python обусловлен тем, что, во-первых, это простой и мощный объектно-ориентированный бестиповый язык, программировать на котором может начинающий пользователь. Во-вторых, язык

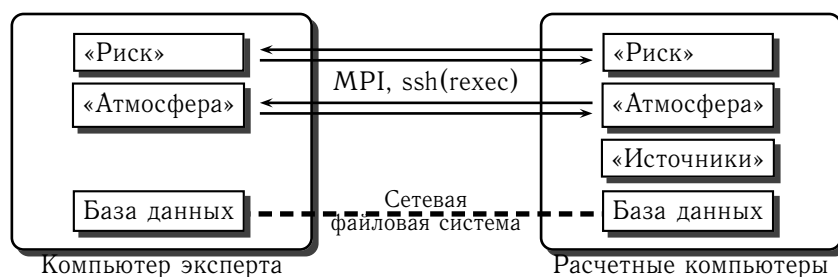


Рис. 5.1. Архитектура системы «ChemRisk»

имеет такие встроенные типы данных, как списки и словари, удобные для написания сложных аварийных сценариев. Наконец, объектная структура подсистемы, реализованной на языках FORTRAN/C/C++, легко отображается в соответствующую структуру на языке Python при использовании программного продукта Siloon [168]. Выбранное решение позволяет использовать в гибком и динамически расширяемом языке всю вычислительную мощь библиотек, реализованных на компилируемых языках и выполняемых на высокопроизводительных ПВС.

5.2. Архитектура системы

В рамках компьютерной системы выделено несколько подсистем, отражающих основные этапы в схеме прогноза последствий аварий (см. рис. 1.3 в разделе 1.6).

Архитектура компьютерной системы прогноза последствий аварий показана на рисунке 5.1. Система имеет следующие основные подсистемы: подсистему расчета источников опасности («Источники»), подсистему расчета распространения примеси в атмосфере («Атмосфера»), подсистему расчета и анализа аварийного риска («Риск»). Подсистемы «Атмосфера» и «Риск» имеют распределенный характер, обеспечивая распараллеливание вычислений. Для распараллеливания расчетов использовали как интерфейс передачи сообщений MPI, так и стандартные средства UNIX-платформ — средства удаленного выполнения команд ssh (или rhexec, rsh). Данные хранятся на управляющем компьютере (компьютере эксперта) и распределяются при помощи сетевой файловой системы (ФС). В текущей версии КС для этих целей используется стандартная ФС для UNIX-систем — NFS.

Дополнительными компонентами, не показанными на рисунке, являются внешние и встроенные средства визуализации расчетов, внешняя ГИС.

На рис. 5.2 показана функциональная диаграмма КС, иллюстрирующая процесс вычислений и основные потоки данных.

5.3. Подсистема «Источники»

Подсистема состоит из изолированных модулей-программ, обеспечивающих расчет характеристик источников токсической опасности, полей барического и термического воздействия. Каждая из программ обеспечивает расчет источника по определенной модели.

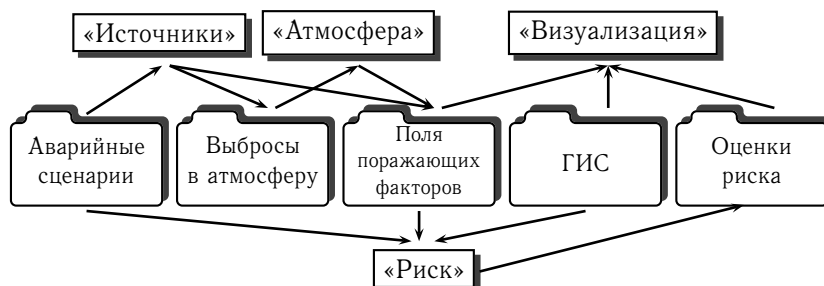


Рис. 5.2. Укрупненная функциональная диаграмма системы

5.3.1. Модуль «Пролив». Реализует модель источника при проливе токсичной жидкости внутри производственных помещений (см. разделы 2.1 и 3.3). Модуль реализован на языке С и имеет небольшой встроенный интерпретатор файла команд, управляющих процессом расчета.

Объектная структура. Объектная модель модуля представлена на рис. 5.3. Объекты класса «Помещение» содержат всю информацию, относящуюся к характеристикам помещения: объем, давление, температуры воздуха и стен, параметры вентиляционной системы и др. В каждом помещении может быть задано несколько проливов, абстракцией которых является класс «Пролив». Каждый пролив имеет следующие атрибуты: площадь, массу, температуру, химический состав. Индивидуальные химические вещества представлены объектами класса «Агент».

Возможности. Модуль обеспечивает расчет концентраций химических веществ, скоростей испарения и потоков на выходе из помещения, прогнозирование ингаляционных токсических доз и вероятностей поражения персонала. Результаты расчетов выводятся в текстовом виде в стандартный поток вывода.

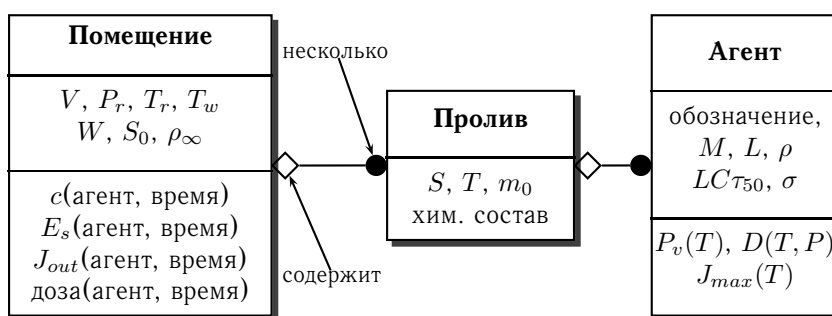


Рис. 5.3. Упрощенная объектная модель модуля «Пролив»

5.3.2. Модуль «Боеприпас». Модуль реализует модель, представленную в разделе 2.3, и предназначен для количественной оценки выброса отравляющих веществ в окружающее пространство из боеприпасов с фосфорорганическими отравляющими веществами при пожаре¹. Модуль реализован на языке С.

Численный метод. Давление во внутренней полости химического боеприпаса при нагревании, в первую очередь, определяется количеством отравляющего вещества, которое было подвергнуто разложению в результате реакции термодеструкции. Оценка количества отравляющего вещества, подвергнутого термодеструкции, основана на результатах моделирования температурного поля в боеприпасе при нагревании. Уравнение теплопереноса решалось численно с использованием разностной схемы Дугласа [46]. Схема абсолютно устойчива. Решается уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{d}{rdr} r a(r) \frac{dT}{dr} + \frac{a(r)}{r^2} \frac{d^2T}{d\phi^2}. \quad (5.3.1)$$

Разностный оператор второй производной по радиусу аппроксимирован следующим выражением:

$$\frac{1}{r_i \cdot dr_i} \left((r_i + dr_i/2) \cdot a_{i+1/2} \frac{T_{i+1} - T_i}{\delta r} - (r_i - dr_i/2) \cdot a_{i-1/2} \frac{T_i - T_{i-1}}{\delta r} \right), \quad (5.3.2)$$

где $a_{i+1/2} = 2 \cdot a_i \cdot a_{i+1} / (a_i + a_{i+1})$ и $a_{i-1/2} = 2 \cdot a_i \cdot a_{i-1} / (a_i + a_{i-1})$, δr — шаг разностной сетки по радиусу.

Разностный оператор второй производной по углу аппроксимирован выражением

$$\frac{a_i \cdot (T_{i+1} + T_{i-1} - 2 \cdot T_i)}{\delta \phi^2}, \quad (5.3.3)$$

где $\delta \phi$ — шаг разностной сетки по углу.

Для решения разностного уравнения по углу применяется алгоритм циклической прогонки.

Структура. Тело программы включает блоки:

- Расчёт температурного поля в химическом боеприпасе при заданных условиях пожара.
- Расчёт характеристик (объем, давление) продуктов реакции термодеструкции жидкости. Вычисление внутренних напряжений в материале запального стакана. Сравнение значений внутренних напряжений со значениями предела текучести.

Возможности. Модуль обеспечивает расчет массы неразложившихся отравляющих веществ в разрушенных химических боеприпасах при его нагреве. Рассчитывается временной интервал нагрева химического боеприпаса до разрушения (нарушения герметичности внутренней полости). Результаты расчетов выводятся в текстовом виде в стандартный поток вывода.

¹Раздел написан совместно с А. В. Аксаковым.

5.3.3. Модуль «Пожар». Реализует модель, представленную в разделе 3.4, и предназначен для решения задачи определения газových потоков при пожаре в технологических помещениях. На основе рассчитанных полей течения и температуры делается прогноз выхода отравляющих веществ (с учетом их термодеструкции) из зоны пожара. Модуль реализован на языке С.

Численный метод. Для решения задачи (3.4.6) применяется численный метод «SIMPLE» [169], реализованный в трехмерной постановке в [170]. Этот метод имеет в своей основе циклическую последовательность операций «прогноз-коррекция». Используя некоторое начальное приближение для поля давления, вычисляются компоненты скорости по уравнениям движения. Затем давление и компоненты скорости корректируются так, чтобы удовлетворить уравнению неразрывности.

Значения давления и скорости представляются в виде:

$$p = p_* + p', \quad (5.3.4)$$

где параметры со звездочкой являются промежуточными, а со штрихом — корректирующими поправками. Поправки для скорости связываются с поправкой для давления соотношением:

$$V' = -b\nabla p', \quad (5.3.5)$$

где b — вектор разностных коэффициентов. После подстановки скорректированной скорости в уравнение неразрывности для нахождения поправки к давлению приходим к эллиптическому уравнению вида:

$$\nabla \cdot b(\nabla p') = \nabla \cdot (\rho V_*). \quad (5.3.6)$$

Найденная поправка к давлению используется для коррекции полей давления и скорости с помощью соотношений (5.3.4) и (5.3.5). Затем процесс повторяется до снижения величины поправки до заданного значения.

Дискретные аналоги дифференциальных уравнений (3.4.6) и (5.3.6) представляют собой системы линейных алгебраических уравнений большой размерности вида:

$$Au = f, \quad (5.3.7)$$

где A — матрица разностных коэффициентов, u — вектор неизвестных значений сеточной функции в узлах, f — известный вектор.

Матрица системы уравнений (5.3.7) плохо обусловлена. Поэтому для ее решения применяется метод сопряженных градиентов с неполной факторизацией [170]. Для уравнений движения матрица разностных коэффициентов не обладает свойством симметрии. Однако в случае положительно-определенной матрицы, в целях применения к системе (5.3.7) метода сопряженных градиентов, ее можно преобразовать к симметричному виду. Система уравнений (5.3.7) приводится к эквивалентной форме:

$$(A^T A) u = A^T f. \quad (5.3.8)$$

Система уравнений (5.3.8) также имеет плохо обусловленную матрицу. Для ее решения целесообразно использовать оператор B , повышающий степень обусловленности матрицы $(B^{-1}A)$. Представим оператор B в виде произведения верхней

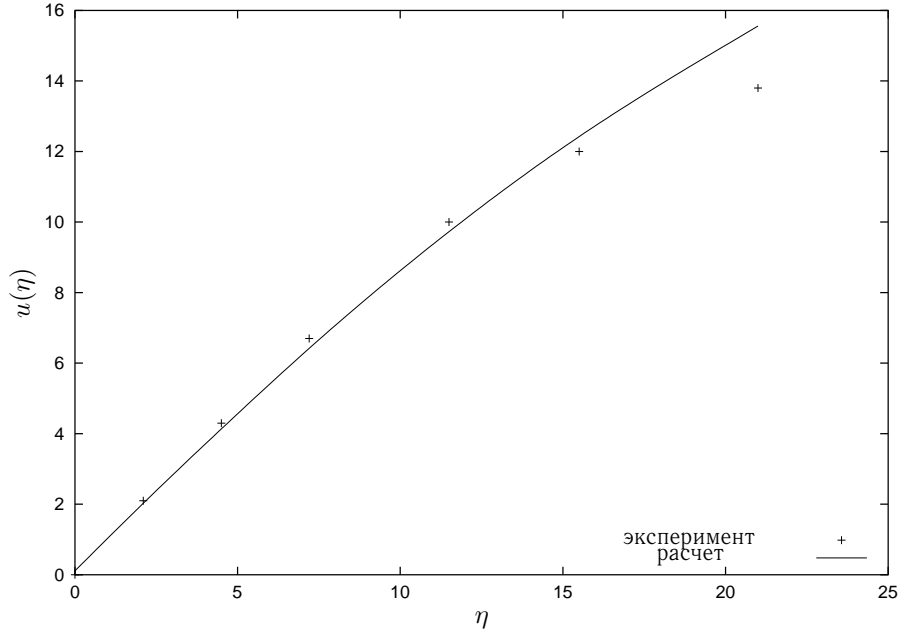


Рис. 5.4. Сопоставление расчетной и экспериментальной скорости в ламинарном и буферном подслое

и нижней треугольных матриц $B = LU$. Для получения такого разложения можно применить модифицированную сильно неявную процедуру (MSIP) [171] с нулевым итерационным параметром. Для решения системы уравнений (5.3.8) применяется метод сопряженных градиентов с оператором $B^T B$.

Алгоритм метода представляется в виде:

$$\begin{aligned} r^0 &= f - Au^0, \quad y^0 = A^T r^0, \quad w^0 = (U^T L^T)^{-1} y^0, \\ \Delta u^0 &= (LU)^{-1} w^0, \quad S_1^0 = (\Delta u^0, y^0), \quad Pk^0 = \Delta u^0 \\ &\text{(начальное приближение),} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z^k &= A^T Pk^k, \quad S_2^k = (z^k, z^k), \quad \alpha = -S_1^k / S_2^k, \\ u^{k+1} &= u^k - \alpha Pk^k, \quad r^{k+1} = r^k - \alpha z^k, \\ y^{k+1} &= A^T r^{k+1}, \quad w^{k+1} = (U^T L^T)^{-1} y^{k+1}, \\ \Delta u^{k+1} &= (LU)^{-1} w^{k+1}, \quad S_1^{k+1} = (\Delta u^{k+1}, y^{k+1}), \\ \beta &= S_1^{k+1} / S_1^k, \quad Pk^{k+1} = \Delta u^{k+1} + \beta Pk^k. \end{aligned}$$

Здесь k — номер итерации, Pk , Δu , w , y , r — промежуточные вектора, используемые в итерационном процессе, который продолжается до достижения нормы невязки r^k заданного значения ϵ , т. е. до выполнения условия $\|r^k\| \leq \epsilon$.

Аттестация численного алгоритма. Основную сложность при численном решении задач тепломассопереноса представляет расчет поля скоростей и поля давления. Поэтому тестирование газодинамического решателя предполагает проверку корректности расчетов этих величин в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

В качестве тестовой задачи рассматривалась задача моделирования движения газа в трубе прямоугольного сечения. Данная задача исследовалась экспериментально, и для нее имеется большой объем данных [43]. На рисунке 5.4 показаны рассчитанные и экспериментальные результаты, которые удовлетворительно согласуются [2].

5.4. Подсистема «Атмосфера»

Подсистема предназначена для расчета турбулентного рассеяния примеси в пограничном слое атмосферы на масштабе времени несколько часов в условиях достаточно однородной подстилающей поверхности при химических авариях. В рамках подсистемы реализованы модели, представленные в главе 4. Кроме того, реализован интерфейс к данным и программам из «model validation kit» для проведения процедуры верификации моделей рассеяния (см. раздел 4.5).

Основными результатами расчетов, управляемых сценариями на языке Python, являются поля токсонагрузок и концентраций токсичных агентов в зависимости от времени, метеорологических условий и других факторов.

5.4.1. Архитектура. Эта подсистема имеет архитектуру «мастер-рабочий». Структура подсистемы такова (см. рис. 5.5): на компьютере эксперта в качестве управляющей программы (мастера) работает интерпретатор языка Python, на котором пишутся все сценарии расчета. Использование полноценного языка позволяет создавать сложные сценарии, включающие циклы, условные переходы, вызов дополнительных модулей и др. Такой подход позволяет автоматизировать рутинные

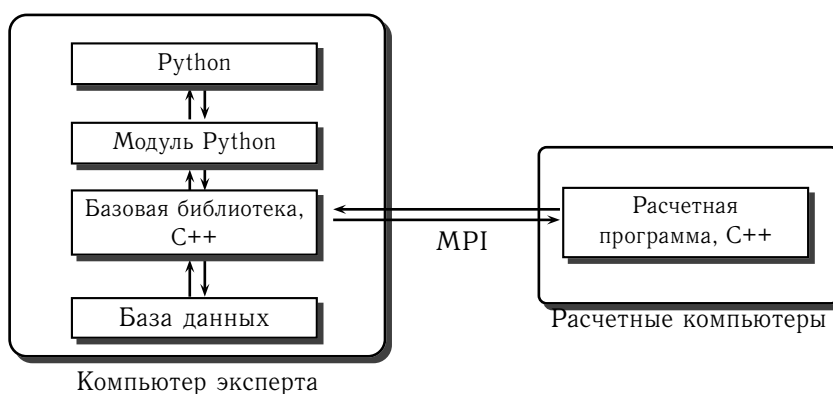


Рис. 5.5. Архитектура подсистемы «Атмосфера»

расчеты, состоящие, как правило, в выполнении одной последовательности действий для большого набора метеоусловий.

Интерпретатор расширен рядом динамически загружаемых интерфейсных модулей, служащих для организации интерфейса между языком Python и базовой библиотекой, реализованной на языке C++. Базовая библиотека осуществляет трансляцию вызовов из интерпретатора в вызовы соответствующих методов объектов C++. В свою очередь, все операции ввода-вывода, обмен данными по сети (распределение заданий, синхронизация, сбор результатов) с расчетной программой (рабочим) выполняются на уровне объектов C++. Для организации обмена данными между «мастером» и «рабочими» использован интерфейс передачи сообщений MPI [160].

5.4.2. Объектная модель. Абстракцией физической параметризации пограничного слоя атмосферы являются абстрактный класс «Пограничный слой», методы которого дают доступ к скорости и направлению ветра, температуре, коэффициентам обмена на заданной высоте, и абстрактный класс «Дисперсия», обеспечивающий доступ к дисперсии облака в зависимости от времени или расстояния от источника. Классы, реализующие конкретную физическую параметризацию наследуют свой интерфейс от соответствующего абстрактного класса.

Класс «Облако» реализует модель гауссова облака от точечного источника (4.2.1) и обеспечивает расчет концентраций в любой точке пространства. Дисперсия «Облака» зависит от конкретной параметризации «Дисперсии». Измерение концентраций (и токсонагрузок) в выделенной точке осуществляется объектами класса «Рецептор», каждый «Рецептор» может регистрировать вклады в концентрацию от нескольких «Облаков». Моделирование сложной конфигурации выброса или источника, действующего в течение какого-либо времени, осуществляется созданием нескольких экземпляров класса «Облако», каждый из которых имеет свое время создания (и, соответственно, дисперсию).

Для программной реализации численного решателя уравнения турбулентной диффузии (4.4.4) в вертикально-неоднородном ПСА используются следующие сущности.

Во-первых, при аварийных выбросах иногда необходимо учитывать несколько компонентов. Для их представления служит класс «Трасер», инкапсулирующий все характеристики компонента, влияющие на его рассеяние, распад, химические превращения, поглощения поверхностью и др. «Трасер» путем наследования дополняет атрибуты и методы класса «Агент» (см. раздел 5.3.1) аспектами, специфичными для рассеивания в атмосфере.

Во-вторых, при численном решении (см. следующий раздел) непрерывные величины (концентрации, например) задаются в дискретных узлах. Пространственная дискретизация задается объектом класса «Сетка3D», а непрерывные функции моделируются объектами классов «Поле3D» и «Поле2D», построенных на «Сетке3D». Метеорологические величины, определяемые «Пограничным слоем», также дискретизируются на «Сетке3D» и представлены экземплярами класса «Вертикаль». Для удобства реализации распределения частей полей на отдельные расчетные узлы

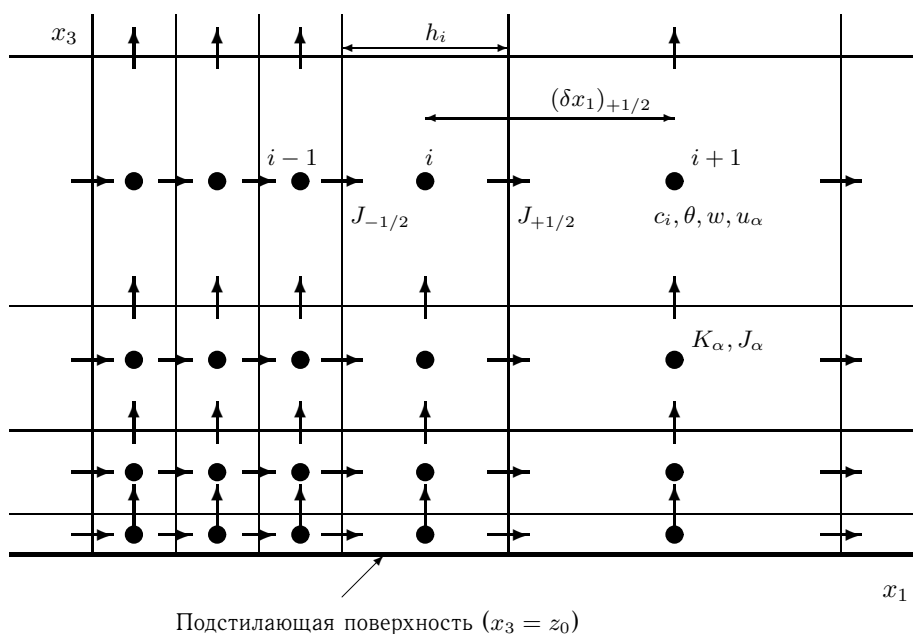


Рис. 5.6. Дискретизация расчетного пространства.

(алгоритм декомпозиции расчетной области, см. раздел. 5.4.4) служат объекты класса «Диапазон».

Наконец, абстракцией атмосферной среды является объект класса «Среда», характеризующийся дискретными «Полями» «Трасеров» и двумерной сетью «Вертикалей» метеорологических величин. В среде можно активизировать несколько «Источников» «Трасеров», организовать несколько «Проливов» или «Термиков» (см. раздел 3.2).

Представленная объектная модель достаточно интуитивно понятна. Сценарий расчета строится при помощи вышеуказанных классов: сначала создаются объекты нужных классов, затем они инициализируются и связываются. После связывания запускается эволюция «Среды» во времени. В определенные моменты времени состояние «Среды» сохраняется для последующего анализа.

5.4.3. Численный метод. При решении уравнения диффузии могут использоваться различные численные методы: методы конечных диффузий [90] или, например, метод конечных элементов [172]. Хотя большинство эйлеровых моделей рассеяния основано на методе конечных разностей (т. к. он более прост [46, 173]), в последнее время все чаще предпринимаются усилия по применению конечно-элементных методов [174, 175]. Последнее связано с тем, что ошибка аппроксимации при использовании равномерных разностных сеток значительна и часто даже качественно искажает точное решение [172].

Разностная сетка и метод расщепления. В настоящей работе при численном решении уравнение (4.4.4) аппроксимировалось неявной консервативной разностной схемой, заданной на неравномерной прямоугольной разностной сетке. При построении разностной схемы использовался метод расщепления по физическим процессам и пространственным направлениям в сочетании с методом контрольного объема [176, 177]. Структура разностной сетки проиллюстрирована на рис. 5.6. Большинство физических параметров относятся к центрам соответствующих ячеек сетки. Коэффициенты обмена и потоки относятся к граням ячеек. Граничные условия выставляются на соответствующих гранях ячеек. Такой подход обеспечивает консервативность схемы, что особенно важно при моделировании распространения аварийных воздействий. Использование прямоугольных контрольных объемов способствует простоте программной реализации, а неравномерность (сгущение в областях больших градиентов) сохраняет приемлемую точность.

Для перехода с дискретного временного слоя n на следующий временной слой используется следующая схема расщепления:

$$f^{n+1} = (T_1 D_1 S T_2 D_2 S T_3 D_3 S)^n \cdot f^n, \quad t = n\tau, \quad (5.4.1)$$

где $f = c_i, \theta, w$ — переносимая физическая величина, $T_\alpha D_\alpha$ — разностные операторы адвекции и диффузии, соответственно, S — источниковый оператор (локальные изменения концентрации за счет химических реакций, эмиссии и т.д.), τ — временной шаг интегрирования модели.

Дискретизация оператора адвекции-диффузии. Введем понятие суммарного потока (адвективного и диффузионного) через грань контрольного объема в направлении оси x_1 :

$$J = u_1 f - K_1 \frac{df}{dx_1}. \quad (5.4.2)$$

Рассмотрим контрольный объем i , грани контрольного объема обозначим индексами $-1/2$ и $+1/2$ для левой и правой грани, соответственно (см. рис. 5.6).

После интегрирования по контрольному объему уравнения диффузии материальный баланс для величины f в одномерном случае запишется в виде:

$$\frac{f_i^{n+1} - f_i^n}{\tau} h_i = J_{-1/2}^{n+1} - J_{+1/2}^{n+1}, \quad (5.4.3)$$

где h_i — длина грани i -го контрольного объема. Отсюда дискретный оператор адвекции-диффузии можно представить в виде:

$$(TD)^n \cdot f_i^n = f_i^n + \frac{\tau}{h_i} \left(J_{-1/2}^{n+1} - J_{+1/2}^{n+1} \right). \quad (5.4.4)$$

Исследование одномерной стационарной задачи показало, что точное решение обеспечивает экспоненциальная схема [169]:

$$J_{+1/2}^{n+1} = (u_1)_{+1/2} \left(f_i^{n+1} + \frac{f_i^{n+1} - f_{i+1}^{n+1}}{\exp(Pe_{+1/2}) - 1} \right), \quad (5.4.5)$$

где $Pe_{+1/2} = (u_1)_{+1/2}(\delta x_1)_{+1/2}/(K_1)_{+1/2}$ — число Пекле, $(\delta x_1)_{+1/2}$ — расстояние между центрами ячеек i и $i+1$.

Расчет экспонент, входящих в выражение (5.4.5), является весьма трудоемкой процедурой, поэтому в программной реализации имеет смысл использовать схему со степенным законом [169], обеспечивающую приемлемую аппроксимацию экспоненциальной схемы:

$$\frac{Pe}{\exp(Pe) - 1} = \begin{cases} -Pe, & Pe < -10, \\ (1 + 0.1Pe)^5 - Pe, & -10 \leq Pe < 0, \\ (1 - 0.1Pe)^5, & 0 \leq Pe \leq 10, \\ 0, & Pe > 10. \end{cases} \quad (5.4.6)$$

Представленная неявная схема абсолютно устойчива и имеет второй порядок точности по пространственным координатам.

5.4.4. Алгоритм параллельных вычислений. Естественным подходом для использования параллельных вычислений при решении упрощенного уравнения турбулентной диффузии (без учета поперечной диффузии) является декомпозиция расчетной области на вертикальные области (колонки), т. е. разбиение трехмерной сетки вдоль x и y осей и введение соответствия между физическими подобластями и узлами двумерной логической сети процессоров [93]. Такое разбиение удобно использовать при использовании явных численных транспортных схем [178–180].

Специфика задач по оценке краткосрочных (порядка нескольких часов) последствий аварий такова, что линейный масштаб переноса вдоль направления среднего ветра значительно больше, чем поперечный и вертикальный масштабы. В связи с последним обстоятельством, возможно ввести одномерное разбиение вдоль направления среднего (за рассматриваемый период времени) ветра [11]. Отметим, что алгоритм параллельных вычислений разрабатывался для сетевой вычислительной системы, т. е. для системы компьютеров, связанных относительно малопроизводительной локальной сетью. Для вычислительных систем другой архитектуры более эффективным может быть использование других алгоритмов.

Для распараллеливания вычислений в выражение для потока на грани ячейки (5.4.5) вводится «степень явности», определенная следующим образом:

$$J_{+1/2}^{n+1} = (u_1)_{+1/2} \left(f_i^{n+1} + \frac{f_i^{n+1} - f_{i+1}^n}{\exp(Pe_{+1/2}) - 1} \right). \quad (5.4.7)$$

$$J_{-1/2}^{n+1} = (u_1)_{-1/2} \left(f_{i-1}^{n+1} + \frac{f_{i-1}^{n+1} - f_i^n}{\exp(Pe_{-1/2}) - 1} \right).$$

Такая постановка обеспечивает, во-первых, возможность вычислять значения концентраций в слое $i + 1$ явным образом, не прибегая к методу прогонки. Во-вторых, схема остается абсолютно устойчивой и консервативной.

Введем следующие обозначения: P — число подчиненных процессоров (ПП), УП — управляющий процессор, n_p — число узлов разностной сетки вдоль оси x_1 , приходящихся на ПП $_p$, а $i_p \in [0, n_p - 1]$ — индекс, нумерующий узлы в ПП $_p$. Тогда параллельный алгоритм может быть представлен следующим образом (для каждой итерации по времени):

1. Каждый ПП $_p$ решает систему $f_{ijk}^{n+1/6} = (S)^n \cdot f_{ijk}^n$ в своей подобласти;

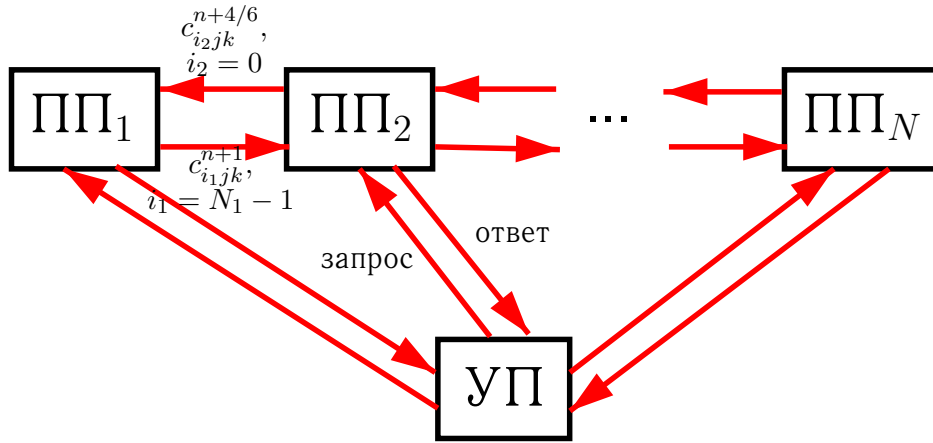


Рис. 5.7. Схема потоков данных при параллельном решении уравнения турбулентной диффузии

2. Каждый ПП_p решает систему алгебраических уравнений:

$$f_{ijk}^{n+2/6} = (T_3 D_3)^{n+1/6} \cdot f_{ijk}^{n+1/6}$$

в своей подобласти (трехточечная прогонка);

3. Каждый ПП_p решает систему $f_{ijk}^{n+3/6} = (S)^{n+2/6} \cdot f_{ijk}^{n+2/6}$ в своей подобласти;
 4. Каждый ПП_p решает систему алгебраических уравнений

$$f_{ijk}^{n+4/6} = (T_2 D_2)^{n+3/6} \cdot f_{ijk}^{n+3/6}$$

в своей подобласти (трехточечная прогонка);

5. Если $p \neq 0$, передать в ПП_{p-1} значения $f_{i_pjk}^{n+4/6}$ для слоя $i_p = 0$;
 6. Если $p \neq P - 1$, принять от ПП_{p+1} значения $f_{i_{p+1}jk}^{n+4/6}$ для слоя $i_{p+1} = 0$;
 7. Если $p \neq 0$, принять от ПП_{p-1} значения $f_{i_{p-1}jk}^{n+1}$ для слоя $i_{p-1} = N_{p-1} - 1$;
 8. Каждый ПП_p решает систему $f_{ijk}^{n+5/6} = (S)^{n+4/6} \cdot f_{ijk}^{n+4/6}$ в своей подобласти;
 9. В каждом ПП_p решить систему $f_{ijk}^{n+1} = (T_1 D_1)^{n+5/6} \cdot f_{ijk}^{n+5/6}$ (потоки на гранях ячеек определяются выражением (5.4.7), решение в каждом слое i получается явно из решения в слое $i - 1$);
 10. Если $p \neq P - 1$, передать в ПП_{p+1} значения $f_{i_pjk}^{n+1}$ для слоя $i_p = N_p - 1$.

Последовательность шагов 5-10 представляет собой схему конвейерного типа: решение в каждом слое i получается из решения в слое $i - 1$. Схема потоков данных, возникающих при параллельном решении, показана на рис. 5.7. В процессе решения осуществляется взаимодействие только между подчиненными процессорами. Потоки данных от управляющего процессора осуществляют передачу начальных данных и сбор результатов расчета.

Отметим, что выполнение шага 5 может быть начато сразу после того, как получены значения на временном слое $n + 4/6$ в слое $i_p = 0$, а шаг 6 осуществлен

путем неблокирующего приема данных, одновременно с проведением вычислений в слоях $i_p \in [0, N_p - 2]$, что значительно улучшает эффективность алгоритма.

Оценка параллельной эффективности. Мерой эффективности любого параллельного алгоритма является коэффициент повышения быстродействия σ , определяемый как [181]

$$\sigma = \frac{\tau_1}{\tau_P}, \quad (5.4.8)$$

где τ_i — время решения задачи на i процессорах и коэффициент эффективности

$$\mu = 100\sigma/P. \quad (5.4.9)$$

Пусть размеры разностной сетки составляют $n_1 \times n_2 \times n_3$ ячеек, пропускная способность передачи данных в локальной сети v (бит/с), l (бит) — размер машинного слова для хранения значений f , γ — время (с), затрачиваемое на вычисления, приходящиеся на один контрольный объем. Будем рассматривать топологию ЛВС в виде звезды, где все межпроцессорные коммуникации проходят через один узел (сетевой концентратор).

Тогда время, затрачиваемое на вычисления последовательной программой на одной итерации, определяется выражением:

$$\tau_s = n_1 n_2 n_3 \gamma. \quad (5.4.10)$$

Время, необходимое для расчета одного временного шага параллельной программой, можно представить в виде:

$$\tau_p = \tau_c + \tau_{cp}, \quad (5.4.11)$$

где τ_c — время синхронизации и обмена данными, τ_{cp} — среднее время, затрачиваемое на вычисления на одном процессоре.

В случае равномерного разбиения числа узлов сетки, приходящихся на один процессор, τ_{cp} будет определяться следующим выражением:

$$\tau_{cp} = n_1 n_2 n_3 \gamma / P. \quad (5.4.12)$$

В свою очередь, время синхронизации и передачи данных можно оценить как время, необходимое на передачу всего объема данных, используемых для обновления значений f на границах подобластей, через локальную сеть:

$$\tau_c = 2ln_2 n_3 (P - 1) / v. \quad (5.4.13)$$

Отсюда, коэффициент сокращения времени выполнения равен:

$$\rho = \frac{\tau_p}{\tau_s} = \frac{1}{P} + \frac{2l(P-1)}{\gamma v n_1}, \quad (5.4.14)$$

а коэффициент повышения быстродействия —

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{P}{1 + 2l(P-1)P/(\gamma v n_1)}. \quad (5.4.15)$$

Анализ выражения (5.4.14) показывает, что на увеличение параллельной эффективности (сокращение времени счета) влияют такие факторы, как увеличение

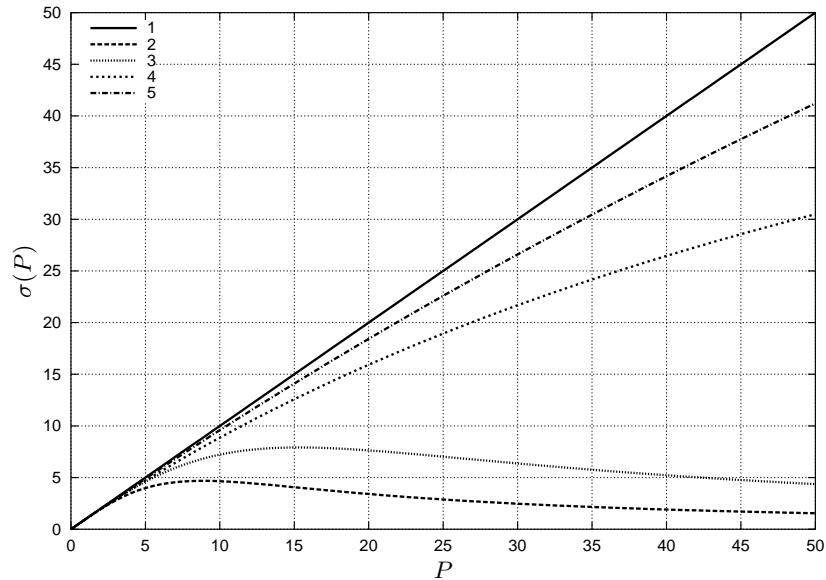


Рис. 5.8. Влияние топологии ЛВС ($v = 10^8$) и размерности задачи на масштабируемость алгоритма: 1 — идеальная масштабируемость; 2 — топология звезды, $n_1 = 50$; 3 — топология звезды, $n_1 = 150$; 4 — топология кольца, $n_1 = 50$; 5 — топология кольца, $n_1 = 150$

пропускной способности сети и увеличение разрешения сетки вдоль направления преобладающего потока.

Численные эксперименты по определению эффективности предложенного алгоритма были осуществлены на гетерогенном кластере, состоящем из персональных компьютеров под управлением ОС Linux, соединенных локальной сетью Fast Ethernet с пропускной способностью 100 Мбит/с ($v = 10^8$). В качестве узлов кластера использовались серийные одно- и двухпроцессорные персональные компьютеры с процессорами Intel Pentium III 500-800 МГц, AMD K7 500 МГц. Для хранения дискретных значений f_{ijk} использовали тип float языка C++ ($l = 64$).

Решалась тестовая задача определения концентрации от мгновенного точечного источника на разностной сетке $150 \times 50 \times 50$ узлов. Число итераций — 360. Отметим, что при измерении времени выполнения в полное время решения задачи входит время на инициализацию начальных данных. Выполненные оценки показали, что параметр γ может быть оценен значением $\approx 2 \cdot 10^{-6}$.

Влияние топологии локальной вычислительной сети на производительность алгоритма согласно теоретическим оценкам показана на рис. 5.8. Отметим, что на производительность негативное влияние оказывает звездообразная топология сети. В случае топологии в виде одномерной цепочки (или кольца), эффективность будет существенно повышена в силу исчезновения вклада $P - 1$ в выражениях (5.4.14) и (5.4.15).

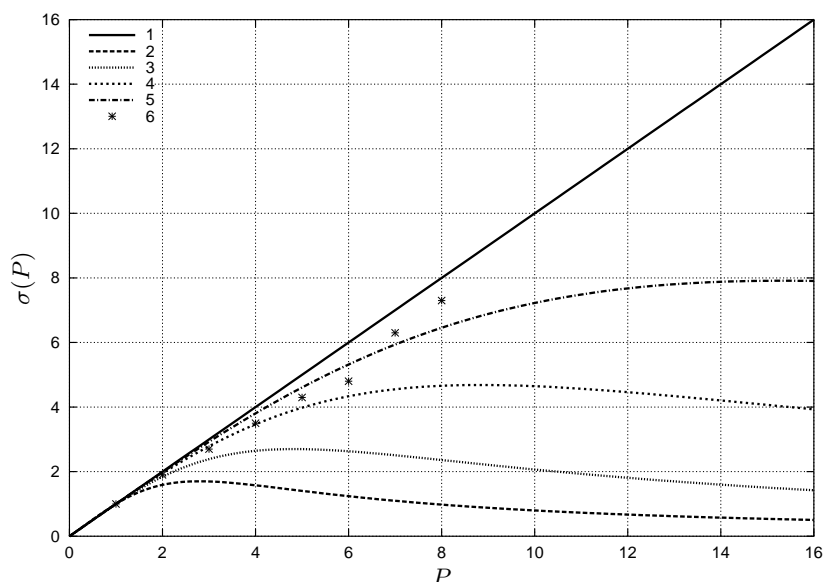


Рис. 5.9. Влияние размерности задачи и производительности ЛВС на масштабируемость алгоритма: 1 — идеальная масштабируемость; 2 — $v = 10^7$, $n_1 = 50$, расчет; 3 — $v = 10^7$, $n_1 = 150$, расчет; 4 — $v = 10^8$, $n_1 = 50$, расчет; 5 — $v = 10^8$, $n_1 = 150$, расчет; 6 — $v = 10^8$, $n_1 = 150$, измерение

В табл. 5.1 показаны время выполнения, коэффициент повышения быстродействия и коэффициент эффективности алгоритма в зависимости от числа процессоров в вычислительном кластере (звездообразная топология ЛВС). Отметим, что при увеличении числа процессоров с 1 до 8 время расчета понижается более чем в 7 раз, а параллельная эффективность порядка 90%, причем результаты получены при достаточно неоптимальной топологии сети.

На рис. 5.9 графически представлена зависимость коэффициента ускорения от числа процессоров, размерности разностной сетки и пропускной способности ЛВС (звездообразная топология). Некоторый разброс измеренных значений σ от рассчитанных объясняется, во-первых, тем обстоятельством, что задействованные в расчете процессоры несколько отличались по производительности. Во-вторых, при выводе зависимости (5.4.15) не учитывали возможность временного перекрытия между расчетом и обменом данными, реализованной в программе.

Таблица 5.1. Зависимость характеристик эффективности алгоритма от числа процессоров в вычислительном кластере.

P	1	2	3	4	5	6	7	8
τ_p , с	236.0	124.0	88.0	67.0	55.6	49.0	37.2	32.2
σ	—	1.9	2.7	3.5	4.3	4.8	6.3	7.3
μ , %	—	95	90	88	86	80	90	91

5.4.5. Тестирование численного алгоритма. Задача Сеттона. Численный алгоритм и его программная реализация тестировались путем сопоставления результатов расчетов с результатами, отвечающими аналитическому решению.

Задача Сеттона [182] представляет собой задачу расчета характеристик стационарного процесса испарения жидкости при определенных допущениях на состоянии атмосферы. Граница жидкости ограничена координатой $z = 0$. Расчетная область — полупространство $x \geq 0$. Граница жидкости обдувается потоком воздуха, направленным вдоль оси x . Скорость воздушного потока — $u(z)$. Положим, что в атмосфере установилось некоторое стационарное распределение пара. При этом у поверхности жидкости концентрация вещества равна некоторой равновесной концентрации c_s . Распределение концентрации пара в этом случае описывается стационарным уравнением диффузии:

$$u(z) \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} K_z(z) \frac{\partial c}{\partial z}, \quad (5.4.16)$$

в котором исключены горизонтальные турбулентные потоки в силу малости горизонтальных градиентов концентрации по сравнению с вертикальными. Граничные условия для этого уравнения имеют следующий вид:

$$c = \begin{cases} c_s, & \text{при } z = 0, x \geq 0, \\ c_a, & \text{при } z \rightarrow \infty, x \geq 0, \end{cases} \quad (5.4.17)$$

где c_a — концентрация в той части атмосферы, на которую граница жидкости не оказывает влияния. Данная задача имеет аналитическое решение, если K_z и u являются степенными функциями z : $u = az^m$, $K_z = bz^n$.

Введем безразмерную концентрацию $\chi = \frac{c-c_a}{c_s-c_a}$ и автомодельную переменную $\xi = \frac{a}{b(2+m-n)^2} \frac{z^{2+m-n}}{x}$. Тогда решение может быть найдено в классе автомодельных функций:

$$\chi = \int_{\xi}^{\infty} y^{-\frac{m+1}{2+m-n}} e^{-y} dy / \Gamma \left(1 - \frac{m+1}{2+m-n} \right), \quad (5.4.18)$$

где $\Gamma(x)$ — гамма-функция.

Определим константы a , b , n согласно [182]:

$$a = \frac{5,5u_*}{z_0^m}, \quad b = \frac{u_* z_0^n}{5,5m}, \quad n = 1 - m, \quad (5.4.19)$$

где динамическая скорость $u_* = u_2 z_0^m / (5,5 \cdot 2^m)$ определена через параметр шероховатости и скорость ветра u_2 на высоте 2 м.

На рис. 5.10 представлены графики, отвечающие аналитическому решению задачи Сеттона и решению с использованием представленной параллельной численной схемы по методу установления [176]. Результаты тестовых расчетов иллюстрируют хорошую сходимость численного решения к решению дифференциальной задачи. В расчетах использована неравномерная по z разностная сетка с экспоненциальным сгущением в области больших градиентов концентрации, т. е. вблизи подстилающей поверхности.

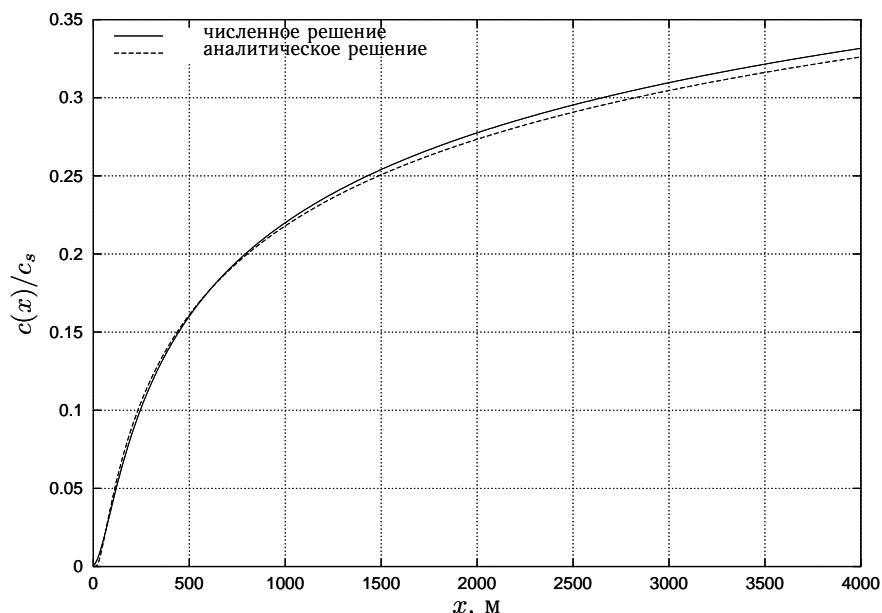


Рис. 5.10. Сопоставление аналитического и численного решения задачи Сеттона ($u_2 = 2$ м/с, $z_0 = 0,0213$ см, $m = 1/7$, $c_s = 1$, $c_a = 0$) на высоте 2 м

5.5. Подсистема «Риск»

Подсистема предназначена для расчета аварийного риска по методологии, представленной в главе 1, анализа его структуры и неопределенности. Реализация подсистемы допускает ее использование в виде самостоятельного продукта.

5.5.1. Архитектура. На рис. 5.11 проиллюстрирована архитектура подсистемы «Риск», выделены два варианта работы системы, обусловленные различной стратегией распараллеливания расчетов (см. раздел. 5.5.3).

В варианте 1 (архитектура «мастер»-«рабочий») на компьютере эксперта работает интерпретатор языка Python в качестве управляющей программы, который посредством динамически загружаемой библиотеки распределяет часть расчетов на расчетные узлы. Вычислительно-затратные части анализа риска проводятся только на расчетных узлах отдельной программой. Загружаемая библиотека и расчетная программа реализованы на языке C++, что обеспечивает достаточно высокую вычислительную эффективность. Обмен данными между базовой библиотекой и расчетной программой осуществляется при помощи интерфейса посылки сообщений MPI. Все операции ввода-вывода осуществляются на узле эксперта.

В варианте 2 узел эксперта служит лишь для распределения заданий по сети. На расчетных узлах работают интерпретаторы Python, однако все расчеты проводятся при помощи загружаемой в Python базовой библиотеки. Файловая база данных (с рассчитанными полями ущерба) распределяется на расчетные узлы при помощи любой файловой системы. Такая архитектура позволяет эффективно

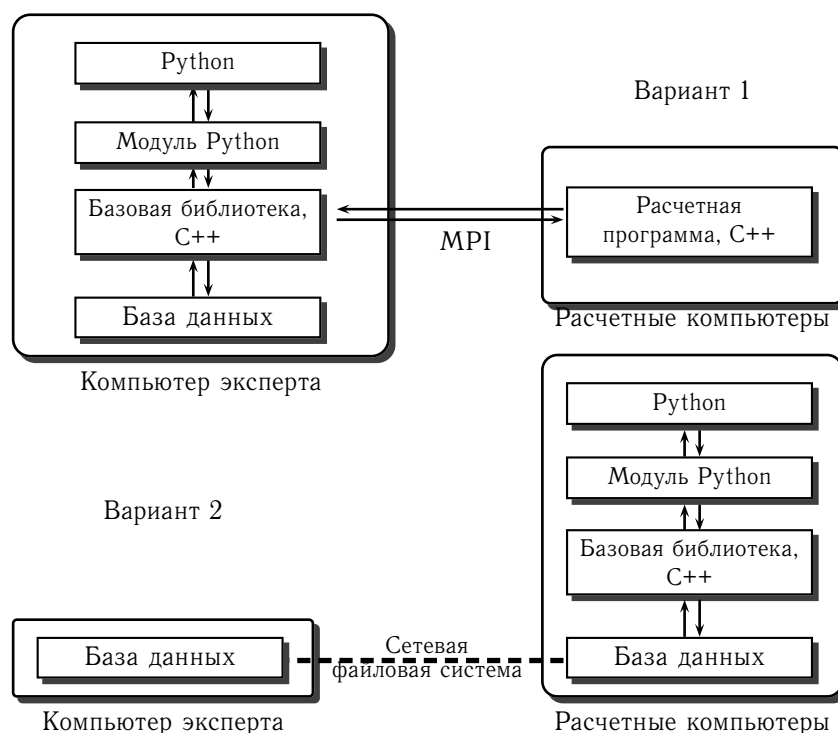


Рис. 5.11. Архитектура подсистемы «Риск»

распараллелить решение задачи системными средствами и возможностями интерпретируемого языка, не прибегая к дополнительному низкоуровневому программированию при помощи MPI.

5.5.2. Объектная модель. Модель подсистемы состоит из объектов двух семейств классов. Базовое семейство классов отражает прагматику оценок риска. Вспомогательное семейство позволяет представить аварийные ситуации в виде деревьев, упрощающих анализ риска. Такое разделение на семейства обусловлено их программной реализацией. Базовые операции при расчетах риска являются вычислительно сложными и, следовательно, должны реализовываться на компилируемом языке. Вспомогательное семейство, напротив, легче реализовать на бестиповом интерпретируемом языке, позволяющем легко работать с такими типами данных, как, например, деревья, словари и списки.

Базовое семейство классов. Анализ принятой методологии оценок аварийного риска (см. раздел 1.2) позволяет выделить три класса основных объектов, которые достаточно хорошо отражают суть прогноза риска (см. табл. 5.2).

Во-первых, при расчете условных оценок риска (1.2.4) используются различные распределения вероятностей: плотность распределения вероятности скорости и направления ветра, температуры, состояния устойчивости атмосферы, вероятности

выпадения или невыпадения осадков. В подсистеме «Риск» указанные распределения представлены в виде объектов класса «Распределение».

Во-вторых, в условную оценку риска входят двумерные поля ущерба. Причем, сами модели ущерба можно рассматривать как фильтр (функцию), заданный на двумерном поле поражающих факторов (токсических нагрузок, давления, теплового потока и др.). Для удобства расчетов непрерывные поля поражающих факторов аппроксимированы сеточной функцией, заданной в узлах неравномерной прямоугольной или полярной сетки. Абстракцией такой сеточной функции является класс «Сетка». Третий класс объектов — абстрактный класс «Модель ущерба», являющийся абстрактным интерфейсом для программного воплощения различных конкретных моделей ущерба (см. раздел 1.3), реализованных в виде дочерних классов класса «Модель ущерба». Методами класса «Сетка» являются двумерные трансляции и вращения, умножения на скаляр и поле, прибавление скаляра и поля, интегрирование, фильтрация при помощи выбранной функции ущерба и др.

Все характеристики риска можно получить при помощи операций с объектами трех вышеуказанных базовых классов. Очевидно, что такие операции являются вычислительно-затратными. В целях вычислительной эффективности базовое семейство классов было реализовано в виде библиотеки на языке C++ с организацией интерфейса с языком Python.

Вспомогательное семейство классов. Семейство предназначено для представления аварийных сценариев в виде логической упорядоченной структуры с целью автоматизации и упрощения оценок риска, автоматизации анализа его структуры.

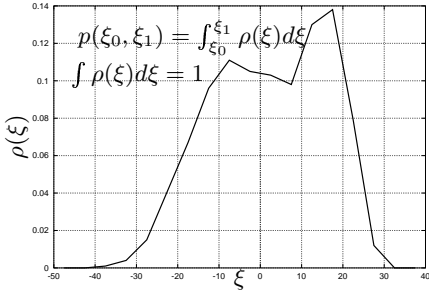
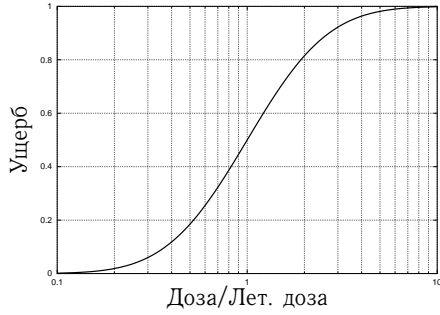
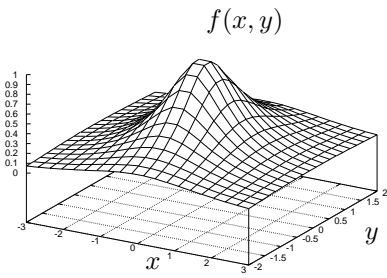
Основные классы, участвующие в построении объектной модели реализаций аварийной ситуации, показаны на рис. 5.12.

Для иллюстрации структуры риска рассмотрим условную аварию «диверсия» на гипотетическом объекте утилизации химического оружия, состоящего из нескольких производственных корпусов и подъездной железнодорожной ветки, расположенной на охраняемой территории объекта.

Диверсия может реализоваться с определенной интенсивностью. Абстракцией инцидента верхнего уровня — диверсии, является класс «Авария», имеющий такие атрибуты, как, например, интенсивность и описание. Последствия от диверсии будут зависеть от того, на каком технологическом участке она произошла, поскольку на различных участках боеприпасы находятся в различных количествах и условиях, а, следовательно, параметры источника опасности (и, естественно, последствия) будут различаться. Таким образом, аварию можно представить в виде нескольких локализованных аварий (класс «Локальная авария»), каждая из которых имеет свою вероятность возникновения (не образующую полную группу в общем случае). Предположим, что диверсия произойдет на участке железнодорожного полотна (линейный участок). В связи с этим, места реализации локальной аварии можно аппроксимировать несколькими точками с определенными весами (класс «Точка»).

Кроме того, локальная авария может «проявиться» несколькими способами (боеприпасы какого типа попадают в зону воздействия), абстракцией которых является

Таблица 5.2. Соответствие между прагматикой оценок риска и некоторыми программными абстракциями.

Прагматика	Абстракция
	<p style="text-align: center;">Распределение</p> <hr/> <p style="text-align: center;">тип: сплайн, линия $\xi_i, \rho_i, i = 0..N$</p> <hr/> <p style="text-align: center;">$\rho(\xi)$ $p(\xi_0, \xi_1)$</p>
	<p style="text-align: center;">Модель ущерба</p> <hr/> <p style="text-align: center;">ущерб(доза)=0</p> <p style="text-align: center;">↑ наследование</p> <p style="text-align: center;">Лог. нормальная модель</p> <hr/> <p style="text-align: center;">ущерб(доза)= $\frac{1}{2} \left(1 + erf \left[\frac{1}{\sigma\sqrt{2}} \cdot \ln \frac{\text{доза}}{\text{лет. доза}} \right] \right)$</p>
	<p style="text-align: center;">Сетка</p> <hr/> <p style="text-align: center;">тип: полярная, прямоугольная $x_i, y_j, f_{ij}, i = 0..N_0, j = 0..N_1$</p> <hr/> <p style="text-align: center;">$I(\Omega) = \int_{\Omega} f(x, y) dx dy$ доза2Ущерб(модель ущерба); operator + = (сетка) operator * = (сетка) сдвиг(x,y); поворот(угол)</p>

класс «Проявление». «Проявление» кроме атрибутов и методов, показанных на последнем рисунке, имеет такие атрибуты, как «Поражающие факторы» и «Климат».

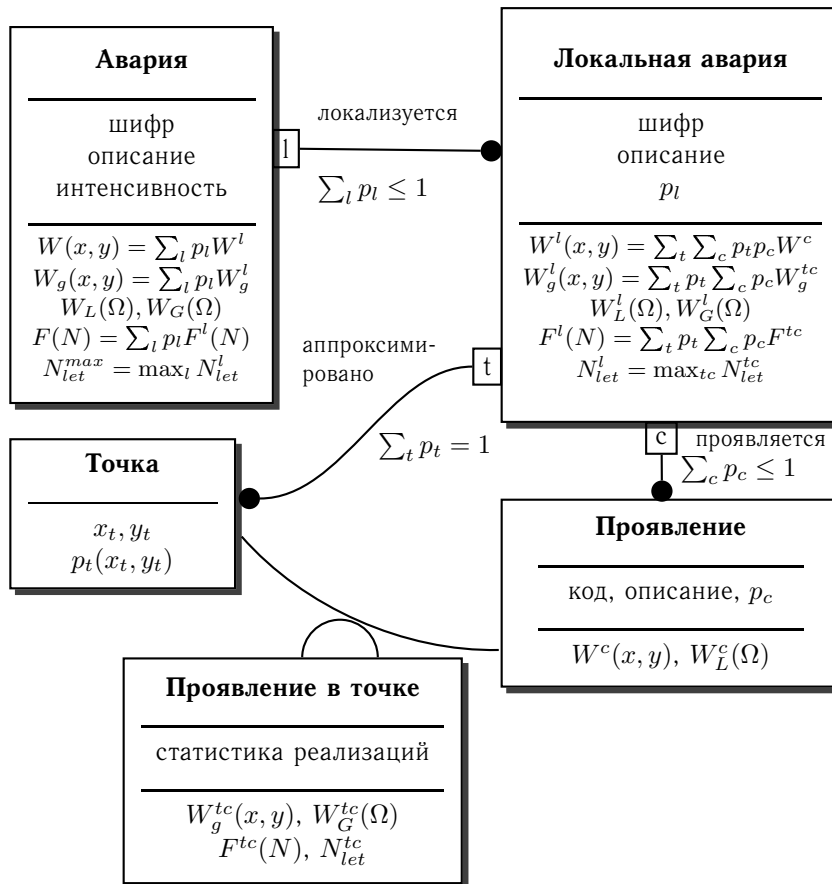


Рис. 5.12. Упрощенное представление реализаций аварийной ситуации в подсистеме «Риск»

Вся информация, касающаяся климатических характеристик района размещения исследуемого объекта, инкапсулируется в классе «Климат», атрибутами которого являются различные «Распределения» (см. табл. 5.2). В классе «Поражающий фактор» объединены «Модель ущерба», флаги зависимости от состояний атмосферы, температуры и др. и набор «Сеток», представляющих распределение поражающего фактора при определенных условиях реализации. Объекты класса «Проявление» инкапсулируют информацию о независимых от координат последствий аварии на определенной стадии и выделены для оптимизации расчетов риска.

Наконец, некоторые характеристики риска (групповой или популяционный риск, число потерь при определенной реализации) зависят как от проявления аварии, так и от ее координат: класс «Проявление в точке». Последний класс инкапсулирует также статистику последствий различных реализаций проявления аварии

в выделенной точке для каждого населенного пункта, расположенного в районе размещения объекта.

В рамках вышеописанного подхода удается единообразно представить структуру риска от довольно сложных техногенных объектов. На каждом уровне детализации рассчитываются различные характеристики «условной» опасности, т. е. от аварии при «условии, что ...».

То обстоятельство, что представленная в параграфе часть объектной модели риска реализована на интерпретируемом языке (Python), позволяет в случае необходимости легко дополнить модель новыми аспектами.

5.5.3. Алгоритм параллельных вычислений. Распараллеливание вычислений, проводимых в рамках анализа риска, является весьма актуальной задачей. Во-первых, в постановке задачи присутствует значительная доля внутреннего параллелизма: отдельные аварийные события или их реализации могут обрабатываться независимо. Во-вторых, как отмечалось ранее, требуется оперативно обработать большой объем информации. Для примера рассмотрим последствия пожара. Рассеяние в атмосфере перегретой примеси, выбрасываемой при пожаре, зависит от состояния атмосферы и температуры окружающего воздуха. Типовая матрица метеорологических условий, учитывающая характерные скорости ветра, классы устойчивости, периоды года (теплый, холодный) и температуру, составляет приблизительно 300 реализаций. К этому необходимо добавить как минимум 8 направлений ветра (при шаге в 45°) или 360 направлений для получения более гладкого решения (при угловом разрешении в 1°). Учет различных вариантов развития аварии (что выбрасывается при пожаре) и возможных локализаций (где произошла авария) увеличивает размерность задачи на два порядка, что дает около $300 \times 360 \times 10 \times 10 \approx 10^7$ вариантов для аварии одного типа. Если на расчет одного варианта будет затрачиваться 1 с машинного времени, то для анализа ситуации потребуется 2777 часов или 115 суток. При наличии десяти персональных однопроцессорных компьютеров, объединенных в одну виртуальную параллельную систему (отметим, что это достаточно реальные мощности, имеющиеся в наличии во многих организациях нашей страны), на расчет потребуется уже только 11,5 суток! Понижение размерности задачи (например, уменьшение углового разрешения), различные оптимизации расчетов позволяют снизить последнюю цифру до нескольких часов.

Наиболее вычислительно сложными частями при расчетах риска являются расчеты условных оценок локального риска (1.2.4) и накопление статистики по потерям для каждого населенного пункта по ряду метеословий. Именно эти части подлежат распараллеливанию.

Общепринятым методом вычисления многомерных интегралов вида (1.2.4) является метод Монте-Карло. Однако при расчете аварийного риска применение метода Монте-Карло встречает ряд трудностей. Во-первых, расчет функции ущерба для каждого набора аргументов является весьма трудоемкой задачей, поскольку требуется провести расчет динамики концентрационного поля и накопленных токсодоз. Во-вторых, точность предоставления исходной статистической информации

о климате района размещения исследуемого объекта, как правило, довольно низка и требуется нетривиальная процедура интерполяции. В связи с указанными обстоятельствами, используется следующий метод вычислений выражения (1.2.4).

Исходная непрерывная область изменения метеорологических параметров заменяется репрезентативной дискретной выборкой, учитывающей характерные скорости ветра, температуры и направления ветра. Тогда выражение (1.2.4) можно записать в дискретном виде:

$$W^z(x, y) = \sum_{i=1}^{N_\alpha} \sum_{j=1}^{N_u} \sum_{k=1}^{N_T} \mu(\Delta\alpha_i) \lambda(\Delta u_j) \chi(\Delta T_k) \times \left(\sum_{l=1}^7 p(\Delta u_j | d_l) U^z(x, y, \Delta\alpha_i, \Delta u_j, d_l, \Delta T_k) \right), \quad (5.5.1)$$

где выполняются следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{N_\alpha} \Delta\alpha_i &= 2\pi, & \sum_{i=1}^{N_\alpha} \mu(\Delta\alpha_i) &= 1, \\ \sum_{j=1}^{N_u} \Delta u_j &= u_{max}, & \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(\Delta u_j) &= 1, \\ \sum_{k=1}^{N_T} \Delta T_k &= T_{max} - T_{min}, & \sum_{k=1}^{N_T} \chi(\Delta T_k) &= 1. \end{aligned} \quad (5.5.2)$$

Для типовых метеорологических выборок характерно следующее неравенство:

$$N_\alpha \gg N_T > N_u > 7.$$

Следовательно, целесообразно выполнять цикл расчета по i (т. е. по направлению ветра) параллельно (система работает по варианту 1, см. рис. 5.11). Для параллельной вычислительной системы с одинаковыми процессорами можно ввести равномерное разбиение по индексу i , тогда $N_\alpha^p = N_\alpha / P$ — число направлений, приходящихся на ПП _{p} .

Тогда параллельный алгоритм вычислений условных оценок аварийного риска для z -ой аварии можно представить следующим образом:

```

1: for all  $i, j, k, l$  do
2:   решить систему уравнений (4.4.1) и (4.4.11)
3: end for
4:  $W^z(x, y) \leftarrow 0$ 
5: for all  $p$  do
6:    $W_p^z(x, y) \leftarrow 0$ 
7:   for all  $j$  do
8:     for all  $k$  do
9:       for all  $l$  do
10:        for  $i_p = 0$  to  $N_\alpha^p$  do
11:           $i \leftarrow i_p + p \cdot N_\alpha / P$ 
12:           $p \leftarrow \mu(\Delta\alpha_i) \lambda(\Delta u_j) \chi(\Delta T_k) p(\Delta u_j | d_l)$ 

```

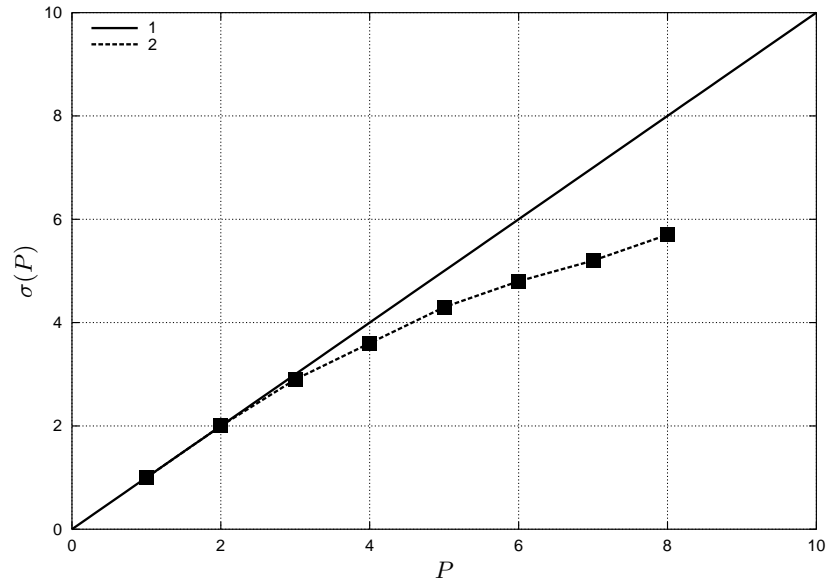


Рис. 5.13. Зависимость коэффициента ускорения от числа процессоров при расчете условных оценок риска (100 Мбит/с, топология звезды): 1 — идеальная масштабируемость; 2 — результат измерения

```

13:            $W_p^z(x, y) \leftarrow W_p^z(x, y) + p \cdot U^z(x, y, \Delta\alpha_i, \Delta u_j, d_l, \Delta T_k)$ 
14:       end for
15:   end for
16: end for
17: end for
18: end for
19: for all p do
20:      $W^z(x, y) \leftarrow W^z(x, y) + W_p^z(x, y)$ 
21: end for

```

Шаг 2 и последовательность шагов 6-18 выполняются параллельно. Расчет проводится для дискретных значений координат (x, y) .

Расчет потерь при реализации конкретной аварии проводится аналогично. Кроме того, поскольку в районе размещения объектов обычно находится несколько небольших населенных пунктов, то возможно использовать распараллеливание вычислений не по выборке метеоусловий, а по населенным пунктам. При этом подсистема работает в варианте 2 (см. рис. 5.11).

На рис. 5.13 представлена зависимость производительности параллельного алгоритма расчета условных оценок аварийного риска от числа процессоров в вычислительном кластере. Поле ущерба было аппроксимировано на прямоугольной сетке 120×100 узлов, выборка метеорологических величин включала 50 случаев. Для хранения дискретных значений функции ущерба использовали тип double языка

C++. Из рисунка видно, что алгоритм обеспечивает практически линейный рост коэффициента ускорения до 4 процессоров, затем происходит падение ускорения. По-всей видимости, последнее обстоятельство обусловлено как неоптимальной топологией вычислительной сети, так и наличием центрального хранилища данных.

5.6. Заключительные замечания

Представленная в настоящей главе компьютерная система прошла стадию опытной эксплуатации. При интенсивном использовании данной системы были получены все результаты по оценкам риска, представленные в настоящей работе. Использование выбранного решения (компилируемый язык для реализации вычислительно сложных частей, интерпретатор для организации высокоуровневых структур данных) позволило существенно автоматизировать и «однообразить» расчет и анализ аварийного риска. В свою очередь, использование параллельных вычислений позволило увеличить масштаб задачи и проанализировать реализации аварийных инцидентов с требуемой степенью детальности. Выполненные оценки производительности вычислительных алгоритмов, реализованных в рамках системы «ChemRisk» демонстрируют высокий коэффициент ускорения при выполнении вычислений в локальной сети.

Часть 2

Приложение теории аварийного риска

Оценка риска хранения и утилизации боевых отравляющих веществ

В данной главе представлены некоторые результаты, иллюстрирующие приложение теории аварийного риска к оценке уровня опасности, порождаемой объектами хранения и утилизации боевых отравляющих веществ. Прогноз уровня опасности для этих объектов выражен в оценках аварийного риска и базируется, в основном, на результатах компьютерного моделирования физико-химических процессов, имеющих место при теоретически возможных авариях.

Численные значения аварийного риска в значительной степени определяются имманентными характеристиками объектов. В данном случае, оценки риска определяются типом, массой, условиями содержания боевых отравляющих веществ и т. д. Область исследований ограничена анализом уровня опасности, порождаемой объектами хранения химических боеприпасов ствольной и реактивной артиллерии, начиненных фосфорорганическими отравляющими веществами, и объектами по их утилизации. Объекты хранения химических боеприпасов размещены, например, в Удмуртской Республике и в Курганской области. В некоторых районах в непосредственной близости от объектов хранения планируется размещение заводов по утилизации боевых отравляющих веществ.

В последнее время появился ряд работ, где уровень опасности, порождаемый объектами с наличием боевых отравляющих веществ, оценивается с использованием методик, не предназначенных для этих целей. При этом упускаются или неправильно оцениваются последствия пожаров, взрывов. Неточности расчетов возникают, в первую очередь, как следствие некорректного определения массы токсичных веществ, попавших в атмосферу в результате аварии. Это приводит к ошибкам в численных значениях риска и, следовательно, к некорректному определению границ зон защитных мероприятий и т. д.

Появились также работы (обычно это труднодоступные для научной общественности ведомственные отчеты), в которых характеристики источников химической опасности определяются на основе определенных допущений. В этом случае оценки риска зависят от принятых допущений. Например, полагается, что при пожаре нарушается герметичность всех химических боеприпасов, находящихся в помещении, и отравляющие вещества из боеприпасов попадают в приземный слой атмосферы. Допущение приводит к необоснованно завышенной «верхней» оценке массы источника химической опасности и к необоснованно завышенным «верхним» оценкам риска.

Прогнозирование оценок аварийного риска, связанных с уровнем опасности от конкретного объекта, требует учета его отличительных особенностей. То есть, численные значения риска связаны с местоположением объекта, с анализом всех значимых аварийных ситуаций и т. д. Так как в данной главе рассмотрение ограничено анализом определенного подмножества аварийных ситуаций, то результаты прогнозирования следует рассматривать исключительно как иллюстрацию приложения методологии прогнозирования. Кроме того, так как использована условная «привязка» объектов к местности, то и оценки риска также носят условный характер, то есть они справедливы в допущении данного размещения.

Принципиальное значение имеет временной интервал, в пределах которого рассчитываются оценки риска. Временной интервал прогнозирования можно ограничить временем до ликвидации аварии (последствий аварии) или временем, необходимым для завершения эвакуации населения. Для определенности полагаем, что временной интервал прогнозирования ограничен величиной один час, если авария может быть ликвидирована или население может быть эвакуировано за пределы опасной зоны. В случае, если население не подлежит эвакуации или авария не может быть ликвидирована, то временной интервал прогнозирования определяется временем, необходимым для достижения безопасной для жизнедеятельности человека концентрации токсичных веществ в воздушной среде населенных пунктов. Соответственно и оценки риска разделяются в зависимости от возможности и невозможности эвакуации населения.

6.1. Общие сведения

Объекты хранения химических боеприпасов размещены вблизи небольших населенных пунктов. На каждом объекте хранения боеприпасов ствольной и реактивной артиллерии хранится около двух миллионов химических боеприпасов. Для наглядного представления этого количества боеприпасов отметим, что для их перевозки необходимо более 10000 вагонов. Общая масса отравляющих веществ в боеприпасах составляет более пяти тысяч тонн. Как правило, химические боеприпасы хранятся отдельно от взрывчатых веществ. Каждый объект хранения включает несколько десятков складских помещений, которые различаются по своим характеристикам. Различия касаются, в первую очередь, материала, из которого изготовлены стены складских помещений: железобетон, кирпич, дерево. Химические боеприпасы в складских помещениях хранятся на стеллажах.

При прогнозировании последствий химических аварий, которые теоретически могут иметь место на объектах хранения, конкретизируются: количества боеприпасов каждого типа, условия хранения боеприпасов, размещение складских помещений относительно населенных пунктов.

При прогнозировании последствий аварий на объекте по утилизации также используется информация, идентифицирующая объект. Рассмотрим один из проектируемых заводов, предназначенный для утилизации фосфорорганических боевых отравляющих веществ (рис. 6.1). Проект предусматривает строительство нескольких корпусов, только в двух из которых планируется утилизация химических боеприпасов, начиненных отравляющими веществами: в корпусе 1 и в корпусе 1А. В остальных корпусах размещены вспомогательные производства. В корпусах

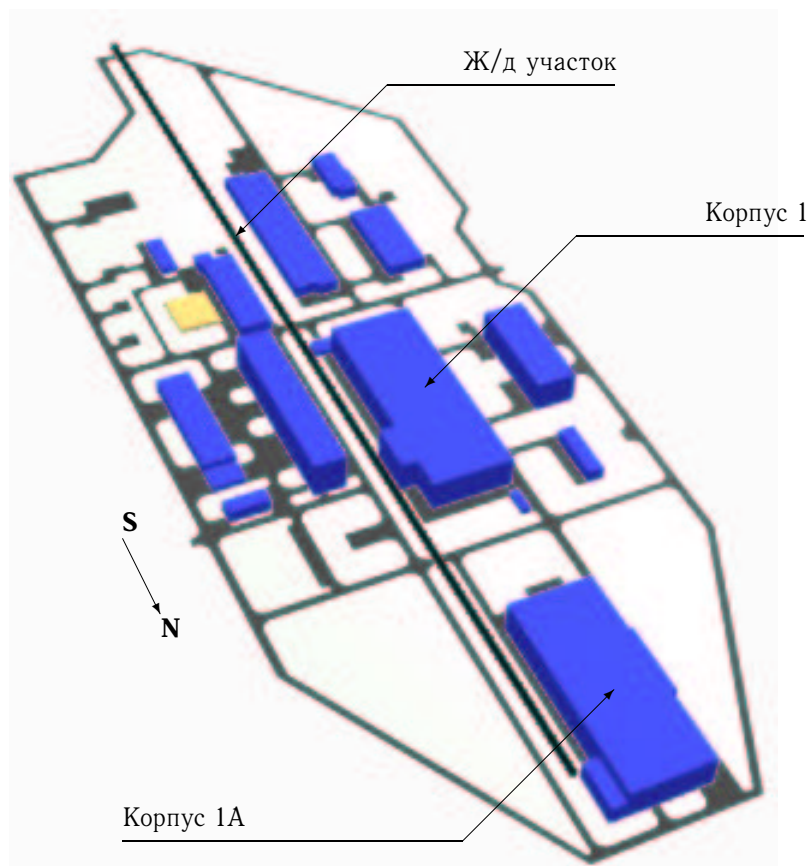


Рис. 6.1. Схема объекта по уничтожению химического оружия

1 и 1А выделяются отделения временного хранения и отделения расснаряжения боеприпасов. В каждом корпусе процесс расснаряжения химических боеприпасов предполагается проводить на двух производственных линиях одновременно.

Для удобства анализа технологический процесс расснаряжения химических боеприпасов на объекте по утилизации условно разбит на десять производственных стадий (участков), где возможно нахождение отравляющих веществ:

1. транспортировка химических боеприпасов железнодорожным транспортом;
2. разгрузка боеприпасов с железнодорожного транспорта;
3. складирование химических боеприпасов в отделении временного хранения;
4. транспортировка боеприпасов к линии расснаряжения;
5. подготовка химических боеприпасов к расснаряжению;
6. расснаряжение химических боеприпасов;
7. детоксикация отравляющих веществ;

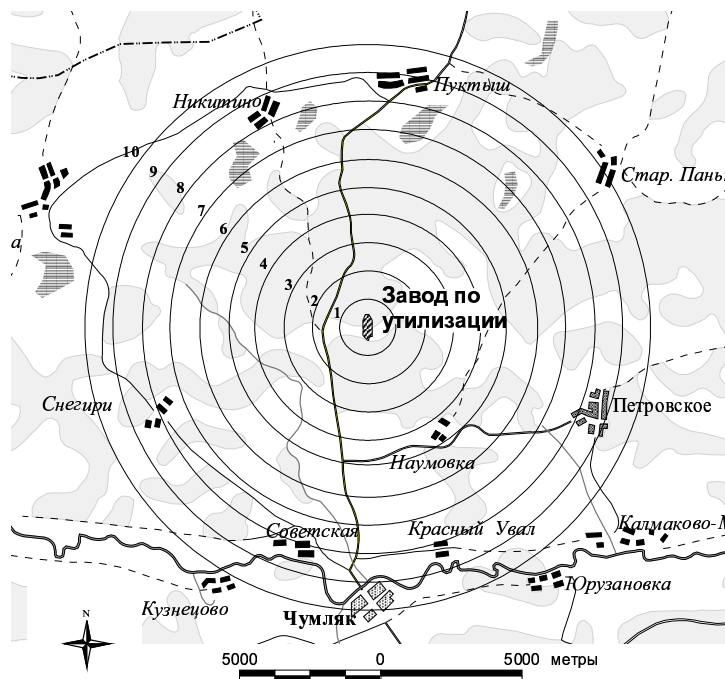


Рис. 6.2. Схема размещения объекта по уничтожению химического оружия

8. система очистки вентиляции;
9. термообработка корпусов химических боеприпасов;
10. обработка некондиционных химических боеприпасов.

Доставка химических боеприпасов на объект по утилизации будет осуществляться железнодорожным транспортом. Протяженность участка железной дороги на охраняемой территории объекта составляет около 900 метров. Предполагается, что за 4-5 лет работы на заводе будет утилизировано 5462 тонны отравляющих веществ (зарин – 53%, зоман – 34%, Ви-газ – 13%).

Величина уровня опасности, порождаемая объектом относительно населения, зависит от распределения населения. Для конкретизации расчетов аварийного риска положим, что расположения объектов хранения и утилизации химических боеприпасов отвечают схемам, представленным на рис. 6.2 и 6.3.

Таблица 6.1. Численность населения вблизи потенциально опасных объектов.

Зоны, км	0-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
арсенал	300	0	995	158	0	11735	309	206	1012
завод	0	0	0	95	0	0	964	653	1095

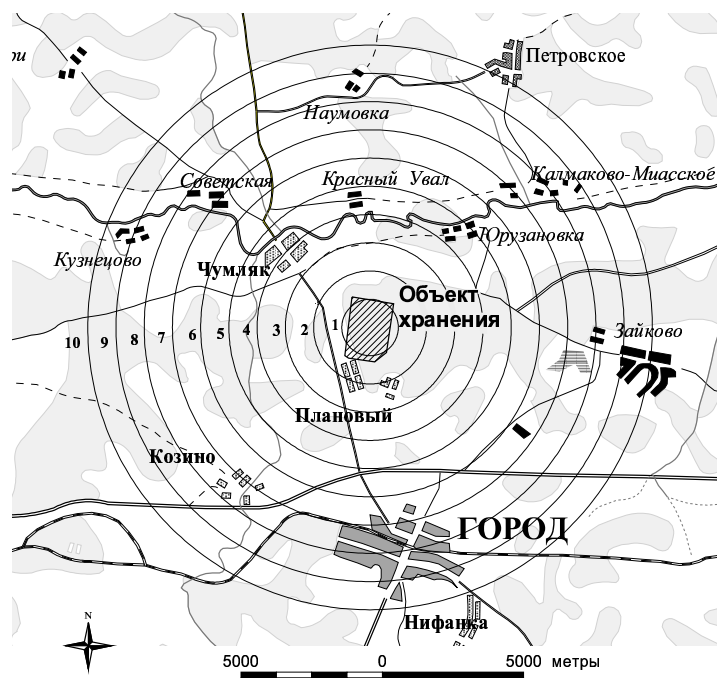


Рис. 6.3. Схема размещения арсенала

В таблице 6.1 представлены данные о распределении населения по территории, непосредственно прилегающей к объектам хранения (арсенал) и утилизации (завод) боевых отравляющих веществ.

6.2. Сценарии аварийных ситуаций и схема расчета

В общем случае существует большое разнообразие сценариев развития аварийных ситуаций. Однако большая часть аварийных ситуаций может быть сведена к совокупности элементарных событий.

Учитывая чрезвычайно высокую токсичность фосфорорганических отравляющих веществ, можно полагать, что главную опасность будет представлять попадание паров отравляющих веществ в атмосферу. Действительно, это подтверждается данными табл. 6.2, где EC_{T50} — средняя токсическая доза (внешняя), выводящая из строя при ингаляционном воздействии, LC_{T50} — средняя токсическая доза при ингаляционном воздействии, приводящая к летальному исходу, АПВ — аварийный предел воздействия в течение выделенного времени. Численные значения аварийного предела воздействия отвечают значениям концентрации в атмосфере, при которых воздействие на человека в течение выделенного временного интервала не приводит к изменениям в организме¹.

¹Значения аварийного предела воздействия предложены НИИГТП (г. Волгоград) и утверждены Минздравом РФ.

Таблица 6.2. Характеристики токсичности паров отравляющих веществ.

Вещество	ЕС _{т50} , мг·мин/м ³	LC _{т50} , мг·мин/м ³	АВП, мг/м ³		
			1 час	8 часов	24 часа
Зарин	55	75	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$7,0 \cdot 10^{-6}$
Зоман	25	35	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$
Ви-газ	5	10	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$

Применительно к условиям объекта по утилизации, можно выделить три группы причин, вызывающих аварийные ситуации: технические (например, повреждение поддона технологической кабины, сбой в работе системы аварийной вентиляции и т. д.), естественные (ураган, гроза, падение метеорита и т. д.), человеческий фактор (ошибки персонала, диверсия и т. д.).

Независимо от причин возникновения аварии будем рассматривать три элементарных аварийных события: взрыв, пожар и пролив отравляющего вещества. Выделение элементарных аварийных ситуаций обусловлено доминированием определенного физического механизма освобождения и поступления паров отравляющих веществ в окружающую среду. Конкретная авария, в общем случае, может состоять как из отдельного элементарного аварийного события, так и из их совокупности.

Для выполнения количественной оценки риска аварий (т. е. определения уровня опасности потенциальных аварий) используется следующая схема расчета.

Во-первых, любая аварийная ситуация (аварийный сценарий) включает последовательность событий, начинающуюся с инициирующего события и заканчивающуюся аварийным событием. Аварийному сценарию соответствует дерево событий, которое показывает последовательность событий и частоты (вероятности) развития сценария по определенному пути. Частоты (вероятности) событий, в основном, основаны на экспертных оценках, выполненных специалистами проектных организаций химико-технологического профиля. Нужно отметить, что прогнозирование значений частот носит предварительный характер. По мере уточнения характеристик технологического процесса, уточнения параметров оборудования и накопления статистического материала по надежности оборудования, частоты событий, возможно, будут пересматриваться.

Во-вторых, в соответствии со сценарием развития аварийной ситуации, определяется количество отравляющих веществ, попавших в результате аварии в атмосферу. Для расчета используются соответствующие математические модели, представленные в главах 2 и 3. Таким образом, выставляются начальные и граничные условия для модели рассеяния примеси в атмосфере.

В-третьих, производится расчет рассеяния ядовитой примеси в атмосфере (см. главу 4) для набора характерных сочетаний метеорологических элементов для каждого типа аварий. Значения накопленных токсических нагрузок позволяют по соответствующей модели рассчитать ущерб при конкретной реализации аварии.

Наконец, количественная оценка риска аварий рассчитывается из оцененных частот возникновения аварийных ситуаций и прогнозируемого ущерба при реализации аварии.

6.3. Прогноз последствий «взрыва»

6.3.1. Частота возникновения аварии.

Объект по утилизации боевых отравляющих веществ. Среди причин событий, приводящих к взрыву на заводе по утилизации и последующему возникновению источника химической опасности, целесообразно выделить, в первую очередь, причины, связанные с человеческим фактором. Из трех групп причин, упомянутых в разделе 6.2, лишь причины, связанные с человеческим фактором, приводят к значимым оценкам риска. Две другие группы — природные (естественные) и технические причины, могут быть опущены из рассмотрения.

Действительно, хотя частоты инициирующих событий, связанные с природным фактором, и могут достигать значительных величин, но возможность развития химической аварии, инициированной природным фактором была сведена к минимуму еще на стадии проектирования.

Последствия аварий, связанные с техническими аспектами, также сведены к минимуму еще на этапе проектирования завода, ибо обеспечение безопасности было основным критерием при проектировании. Это подтверждается данными табл. 6.3, где для объекта по утилизации представлены частоты наиболее значимых событий, связанных со взрывами, которые теоретически могут произойти по техническим причинам. События, помеченные номерами 1 и 2, согласно технической документации, могут привести к освобождению отравляющих веществ в количествах $3,96 \cdot 10^{-2}$ кг и $4,86 \cdot 10^{-1}$ кг, соответственно. Учитывая, что попадание всего этого вещества в атмосферу возможно только при нарушении системы очистки вытяжной вентиляции, вероятность выхода из строя которой оценивается проектировщиками объекта на уровне $1 \cdot 10^{-4}$, их вкладом в оценки аварийного риска можно пренебречь. Событие, помеченное номером 3, к возникновению источника токсической опасности не приводит и для населения опасности не представляет.

С точки зрения возможных последствий взрывов более опасными являются противоправные действия. Прогнозируемые значения частот противоправных действий определяются широким набором факторов в области политики, экономики, социальных отношений. В этой связи, оценки частоты изменяются во времени. В табл. 6.4 представлены спрогнозированные экспертами на основе данных за период 1994–1998 гг. частоты противоправных действий, которые могут привести к аварии на заводе утилизации.

В данном разделе нас интересует частота химической аварии, обусловленной взрывом на заводе. Очевидно, что частота химической аварии, связанной со взрывом на заводе, будет меньше частоты инициирующего события. Например, если в качестве инициирующего события рассматривается вооруженное нападение, то при

Таблица 6.3. Частоты аварий, связанные с взрывным превращением.

№	Аварийное событие	Частота, год ⁻¹
1	Разрушение камеры термообработки корпусов боеприпасов	$4,9 \cdot 10^{-12}$
2	Разрушение камеры печи сжигания твердых отходов	$1,8 \cdot 10^{-8}$
3	Взрыв паров газовой смеси изобутилового спирта	$1,0 \cdot 10^{-5}$

Таблица 6.4. Частоты противоправных действий.

Противоправное действие	Частота, год ⁻¹
Обстрел территории	$5,0 \cdot 10^{-6}$
Подрыв ВВ на ж/д при транспортировке	$4,5 \cdot 10^{-3}$
Вооруженное нападение	$5,0 \cdot 10^{-2}$

определении частоты необходимо принять во внимание, что, во-первых, на объекте утилизации будут приняты исчерпывающие меры по предотвращению несанкционированного доступа к химическим боеприпасам, во-вторых, вооруженное нападение на объект может преследовать иные цели, чем подрыв химических боеприпасов. Кроме того, характеристики химической аварии, в том числе и частота аварийного сценария, зависят от значения массы взрывчатого вещества. С учетом совокупности названных факторов для завода по утилизации полагалось: частота аварийного сценария, приводящего к попаданию отравляющих веществ в атмосферу в результате взрыва, может быть оценена на уровне $P_{blast} = 5 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹.

Последствия взрыва на заводе по утилизации зависят от двух факторов: стадии, на которой произошла авария, и места аварии на технологической линии. Так, на начальных стадиях технологического процесса химические боеприпасы размещены в защитных контейнерах, а на некоторых последующих участках — без какой-либо дополнительной защиты. Кроме того, технологическая линия — территория завода, где могут находиться химические боеприпасы, — растянута на сотни метров, что соизмеримо с расстоянием до ближайшего населенного пункта (около четырех километров). Следовательно, от места взрыва зависят последствия аварии для населения.

От места аварии или от стадии технологического процесса зависит и условная частота взрыва. Различия в условиях развития аварийных событий на той или иной стадии технологического процесса отражаются в величинах условных вероятностей химических аварий при взрыве — $P_{sn/blast}$. Величины условных вероятностей оценивались с учетом времени нахождения токсичных веществ на стадиях технологического процесса. При этом принимались во внимание условия доступа к химическим боеприпасам. В результате, при прогнозировании условных оценок аварийного риска для различных стадий технологического процесса утилизации принимались значения условных вероятностей $P_{sn/blast}$, представленные в табл. 6.5.

Таблица 6.5. Условные вероятности химических аварий при взрыве.

№	Стадия технологического процесса	$P_{sn/blast}$
1	Транспортировка химических боеприпасов ж/д транспортом	0,10
2	Разгрузка боеприпасов с ж/д транспорта	0,20
3	Складирование и хранение химических боеприпасов в отделениях временного хранения	0,50
4	Транспортировка боеприпасов к линии расснаряжения	0,05
5	Подготовка химических боеприпасов к расснаряжению	0,05
6	Расснаряжение боеприпасов	0,10

Объект хранения химических боеприпасов. Положим, что частоты химических аварий, связанные со взрывами на объектах хранения и утилизации, совпадают, то есть и для объекта хранения $P_{blast} = 5 \cdot 10^{-4}$. Положим, что вероятность химической аварии, инициируемой взрывом, не зависит от расположения и характеристик складских помещений на объекте хранения химических боеприпасов. Тогда для условной вероятности химической аварии, обусловленной взрывом, в одном из шестидесяти пяти складских помещений с химическими боеприпасами объекта хранения имеем $P_{0/blast} = (1/65)$.

6.3.2. Параметры источников химической опасности. Обратимся к оценке характеристик источников химической опасности, если взрыв произошел вблизи химических боеприпасов. Согласно разделу 2.2, источник химической опасности при взрыве может возникнуть вследствие нарушения сплошности в материале запального стакана химического боеприпаса. Нарушение сплошности может привести к нарушению герметичности внутренней полости боеприпаса и проникновению отравляющих веществ в окружающую среду. Таблицы упомянутого раздела иллюстрируют возможность возникновения источника химической опасности при воздействии ударной волны взрыва.

Аналізу подлежали последствия взрыва, когда нормаль к фронту ударной волны перпендикулярна оси химического боеприпаса. Если угол между нормалью к фронту ударной волны и осью химического боеприпаса (угол α) будет отклоняться от прямого угла, то условие разгерметизации будет выполняться при меньших расстояниях от эпицентра взрыва. Аналогичный эффект будет иметь место, если между боеприпасом и эпицентром взрыва будут находиться другие боеприпасы, выполняющие роль преграды для распространения ударной волны. В рамках рассматриваемой модели, при $\alpha = 0$ герметичность внутренних полостей сохраняется независимо от положения боеприпаса относительно эпицентра взрыва.

Учитывая неопределенность в расположении химических боеприпасов и тот факт, что препятствия на пути распространения ударной волны вызывают ее ослабление, в первом приближении положим: между эпицентром взрыва и химическими боеприпасами отсутствуют препятствия; боеприпасы расположены по линии окружности на расстоянии r от эпицентра взрыва. Расположение боеприпасов по линии окружности радиуса r отвечает условию максимального их количества в пределах расстояния r на плоскости.

Допустим, что положение боеприпаса по отношению к фронту ударной волны, то есть значение величины α , есть случайная величина с равномерной функцией распределения ($\alpha \in [0, \pi/2]$). Для каждого значения r существует минимальный угол α_{min} при котором условие разгерметизации выполняется, то есть разрушение химического боеприпаса можно ожидать, если $\alpha_{min} \leq \alpha \leq \pi/2$.

При уменьшении расстояния r условие разгерметизации будет достигаться для большей части боеприпасов, размещенных на окружности радиуса r , но количество боеприпасов будет уменьшаться. При увеличении расстояния $r \rightarrow r_{max}$ уменьшается доля боеприпасов, для которых достигается условие разгерметизации, но растет общее количество боеприпасов. Следовательно, существует такое расстояние R , при котором условие разгерметизации выполняется для максимального количества

Таблица 6.6. Математические ожидания масс отравляющих веществ (m , кг) в химических боеприпасах, поврежденных при взрыве.

Калибр боеприпаса, мм	Энергия взрыва в тротиловом эквиваленте, кг						
	0,5	1,0	5,0	10	20	50	100
Незащищенные химические боеприпасы							
122	4,6	6,6	13,3	17,5	22,7	31,7	40,5
130	2,2	3,3	7,1	9,3	12,2	17,1	22,0
152	3,7	6,1	13,5	18,1	23,7	33,6	43,3
540	0,0	0,0	117,8	155,4	175,5	198,6	204,3
880	0,0	0,0	0,0	160,0	305,8	437,1	483,9
Химические боеприпасы в контейнерах							
К-р 122	0,0	0,0	0,0	6,7	25,2	57,1	73,0
К-р 130	0,0	0,0	0,0	0,0	10,7	31,3	42,4
К-р 152	0,0	0,0	0,0	0,0	19,9	46,9	63,6
К-р 540	0,0	0,0	65,3	131,8	166,2	184,4	198,8
К-р 880	0,0	0,0	0,0	0,0	216,3	409,0	461,7

химических боеприпасов определенного калибра. В случае расположения химических боеприпасов на расстоянии R от эпицентра взрыва освобождается максимальное количество отравляющих веществ. Расстояние R и масса отравляющих веществ, зависят от энергии взрыва, имманентных характеристик химических боеприпасов.

Значения максимальных расстояний $r_{max} = r(\alpha = \pi/2)$ представлены в табл. 2.4 раздела 2.2. С учетом значений r_{max} и гипотезы равномерного распределения величины α , для каждого вида химических боеприпасов рассчитывались расстояния R и соответствующие значения математического ожидания массы отравляющих веществ, находящихся в разрушенных боеприпасах. Связь между энергией взрыва, выраженной в тротиловом эквиваленте, и математическим ожиданием массы отравляющих веществ в разрушенных в результате взрыва химических боеприпасах, отражена в верхней части табл. 6.6. В расчетах учитывались некоторые ограничения на количества химических боеприпасов. В частности, предполагалось, что в зоне воздействия ударной волны может находиться не более одной боевой части химической ракеты, что связано с особенностями технологического процесса утилизации.

Все сказанное в полной мере относится и к контейнерам с химическими боеприпасами. В этом случае также существенно расположение контейнеров относительно фронта ударной волны. Для контейнеров с химическими боеприпасами подлежит расчету расстояние r_{max} , в пределах которого возможна разгерметизация химических боеприпасов, защищенных контейнером, и расстояние R , на котором достигается условие максимума математического ожидания массы отравляющих веществ при разрушении боеприпасов в случае взрыва. Очевидно, что $R < r_{max}$. Связь между энергией взрыва и последствиями взрыва вблизи контейнеров с химическими боеприпасами отражена данными нижней части табл. 6.6. Мощность взрыва характеризуется величиной тротилового эквивалента. Предполагалось, что в зоне воздействия ударной волны может находиться не более одного контейнера

с боевыми частями химических ракет и не более двух контейнеров с химическими боеприпасами ствольной и реактивной артиллерии.

В рамках модельных представлений о разрушении химических боеприпасов можно оценить минимальную энергию взрыва (M_{min}^{BB} , кг), при которой происходит разрушение химических боеприпасов и математическое ожидание величины массы отравляющих веществ (M_{min}^{OB} , кг) в разрушенных боеприпасах. Эти оценки представлены в табл. 6.7.

Данные табл. 6.7 показывают, что существует минимальная энергия взрыва, при которой возможна разгерметизация внутренней полости химического боеприпаса. В частности, минимальная масса заряда тринитротолуола (тротила), взрыв которого вблизи контейнеров с боеприпасами приводит к возникновению источника токсической опасности ≈ 4 кг. Таблица показывает, что использование контейнеров для химических боеприпасов является достаточно эффективной защитой целостности боеприпасов при воздействии ударной волны взрыва.

Таблицы 6.6 и 6.7 отражают зависимость массы отравляющих веществ от энергии взрыва. Частота попадания в окружающую среду конкретного вида отравляющего вещества определяется количеством химических боеприпасов с веществом данного вида.

При оценке последствий химических аварий, связанных со взрывом, будем полагать, что лишь пять процентов общей массы отравляющих веществ, находящихся в разрушенных при взрыве химических боеприпасах, рассеивается в атмосфере. Эту часть отравляющего вещества будем считать пассивной примесью к окружающему воздуху. Напомним, что механизм, посредством которого отравляющие вещества оказываются в атмосфере, связан с разрушением внутреннего запального стакана. Предполагается, что вся жидкость, находящаяся в разрушенных боеприпасах, вытекает из снаряда и распыляется взрывной волной в воздухе. Указанная ситуация промоделирована точечным одномоментным источником. Значение пять процентов, как отмечалось ранее, является «верхней» оценкой массовой доли воды, остающейся при взрыве в атмосфере в виде мельчайших капель и паров. Предполагается, что значение оценки пять процентов будет справедливо и для отравляющих веществ. Оставшаяся часть жидкости (оседающая из первичного облака после взрыва на поверхность) образует источник вторичного заражения за счет испарения токсичных веществ в атмосферу.

Объект по утилизации. Исходя из значений масс отравляющих веществ в химических боеприпасах и из количеств боеприпасов каждого вида, подлежащих утилизации на заводе, определялись прогнозируемые вероятности P_{ij}^0 типов ОВ. Эти вероятности представлены в табл. 6.8. Численное значение P_{ij}^0 отвечает вероятности того, что химический боеприпас калибра j (или боеприпасы калибра j ,

Калибр боеприпаса	M_{min}^{BB} , кг	M_{min}^{OB} , кг
122	0,06	0,47
130	0,09	0,29
152	0,10	0,57
540	2,47	39,80
880	8,68	92,53
К-р 122	8,95	6,73
К-р 130	12,11	4,19
К-р 152	11,58	6,27
К-р 540	3,95	39,85
К-р 880	12,63	93,45

Таблица 6.7. Минимальные массы ВВ и ОВ при взрыве.

Таблица 6.8. Вероятность нахождения отравляющего вещества определенного типа в разрушенных при взрыве химических боеприпасах.

Тип ОВ	Калибр химического боеприпаса, мм				
	122	130	152	540	880
Незащищенные химические боеприпасы					
Зарин	0,4480	—	0,0870	—	—
Зоман	0,3086	—	0,0283	—	—
Ви-газ	0,0075	0,0720	—	0,0158	0,0329
Химические боеприпасы в контейнерах					
Зарин	0,5256	—	0,0927	—	—
Зоман	0,2251	—	0,0301	—	—
Ви-газ	0,0058	0,1149	—	0,0033	0,0026

защищенные контейнером) начинены i -тым отравляющим веществом. Вероятности типов отравляющих веществ P_{ij}^0 для химических боеприпасов, защищенных контейнером, рассчитывались с учетом количества боеприпасов определенного калибра в контейнере. Вероятность P_{ij}^0 отвечает парциальному вкладу в условные оценки аварийного риска от последствий химических аварий, обусловленных воздействием на реципиента риска определенного типа отравляющего вещества (зарин, зоман, Ви-газ) в количествах, определяемых калибром боеприпаса и наличием контейнера. Предполагается, что в месте аварии все химические боеприпасы имеют одинаковую степень защиты от ударной волны (наличие или отсутствие контейнера).

Например, в случае взрыва 20 килограмм тринитротолуола вблизи контейнеров с боевыми частями химических ракет калибра 540 мм в окружающую среду с вероятностью 0,0033 (табл. 6.8) ожидается поступление ≈ 166 кг Ви-газа (табл. 6.6), причем $\approx 8,3$ кг из них рассеется в атмосфере в виде мелкодисперсного аэрозоля и паров. Напомним, что речь идет о математических ожиданиях масс.

Объект хранения. При хранении химические боеприпасы размещены на стеллажах, элементы которых препятствуют распространению ударной волны. Положим, что ударная волна может беспрепятственно распространяться в пределах горизонтального слоя стеллажа, воздействуя на лежащие рядами боеприпасы. При наиболее неблагоприятном расположении боеприпасов относительно эпицентра взрыва математическое ожидание массы отравляющих веществ в разрушенных при взрыве боеприпасах отвечает данным табл. 6.6.

Химические боеприпасы хранятся без контейнеров. Исключение составляют боевые части химических ракет, которые на объекте хранения содержатся в технологических контейнерах. Поэтому, источник токсической опасности, связанный с разрушением химических снарядов при взрыве, характеризуется данными верхней части табл. 6.6, а источник опасности, связанный с разрушением боевых частей химических ракет, — данными нижней части этой же таблицы.

Предельные характеристики источников химической опасности. Последствия химической аварии при взрыве наиболее неблагоприятны для населения, если вся масса отравляющих веществ из разрушенных взрывом боеприпасов, достигнет атмосферы и будет участвовать в процессах атмосферного переноса.

Можно указать условия, при которых почти вся масса отравляющих веществ, попавших в атмосферу, будет переноситься с потоками воздуха. Эти условия отвечают «штатным условиям применения» химических боеприпасов. То есть взрывчатое вещество закладывается в запальный стакан химического боеприпаса. При разрыве снаряда над поверхностью земли основная масса вещества будет сосредоточена в атмосфере в виде мельчайших капель с размерами от 5 до 50 мкм [183]. Смесь паров и мельчайших капель жидкости будет переноситься воздушными потоками. Предельные значения масс отравляющих веществ ограничены массами веществ в отдельных боеприпасах. Однако сценарий аварийной ситуации, связанной со «штатным применением» химических боеприпасов, оценивается как весьма маловероятный. Поэтому на данном этапе исследований последствия «штатного применения» химических боеприпасов не подлежали детальному анализу.

Рассмотрим гипотетический сценарий аварии, согласно которому в приземный слой атмосферы при взрыве попадает вся масса отравляющих веществ из разрушенных химических боеприпасов. Причем вся масса отравляющих веществ переносится воздушными потоками. Для конкретизации расчетов положим, что энергия взрыва отвечает энергии, выделяющейся при взрыве 20 килограммов тринитротолуола. Именно это значение энергии предполагалось при определении частот химических аварий, связанных со взрывом. Для данного гипотетического сценария численные значения предельных масс отравляющих веществ в атмосфере \bar{m} соответствуют данным табл. 6.6. Предельные значения масс отравляющих веществ в атмосфере соответствуют 100% вещества, находившегося в разрушенных при взрыве химических боеприпасах.

Отметим, что в настоящее время не установлен физический механизм, посредством которого при взрыве могут быть достигнуты предельные значения масс отравляющих веществ в атмосфере. Вместе с тем, в некоторых работах именно эти значения масс рассматриваются в качестве характеристик источников опасности при гипотетическом взрыве.

6.3.3. Характеристики уровня опасности. Представленные характеристики источника токсической опасности при взрыве позволяют прогнозировать уровень последствий относительно населения, проживающего в населенных пунктах вблизи техногенного объекта.

Действительно, моделируя распространение токсичных веществ в атмосфере при взрыве, можно рассчитать значения накопленных концентраций в каждой точке объема загрязненной атмосферы — поле накопленных концентраций. Сечение поля накопленных концентраций на уровне полутора метров (как это принято для реципиента риска — человека) позволяет рассчитать значения токсических доз и значения функции ущерба в зоне токсического воздействия. С учетом значений частот проявления климатических характеристик (температуры, скорости ветра и т. д.) районов размещения объектов, осуществляется расчет условных оценок аварийного риска.

При расчете рассеяния примеси в атмосфере не учитывались процессы, отвечающие за снижение концентрации опасных веществ, такие, как «вымывание» примеси осадками, осаждение примеси на подстилающую поверхность, убыль за

Таблица 6.9. Условная вероятность химической аварии при взрыве на объекте по утилизации химического оружия.

Место	Стадия	n	$P_{s_n/blast}$	Объект воздействия
Ж/д	1	1	0,100	Контейнеры всех типов
Корпус 1	2	2	0,100	Контейнеры: 122; 130; 152
	3	3	0,250	Контейнеры: 122; 130; 152
	4	4	0,025	Контейнеры: 122; 130; 152
	5	5	0,025	Хим. боеприпасы: 122; 130; 152
	6	6	0,050	Хим. боеприпасы: 122; 130; 152
Корпус 1А	2	7	0,100	Контейнеры: 122; 152; 540; 880
	3	8	0,250	Контейнеры: 122; 152; 540; 880
	4	9	0,025	Контейнеры: 122; 152; 540; 880
	5	10	0,025	Хим. боеприпасы: 122; 152; 540; 880
	6	11	0,050	Хим. боеприпасы: 122; 152; 540; 880

счет химических реакций. Допущение приводит к верхней оценке риска, что отвечает общей идеологии прогнозирования последствий аварий.

Объект по утилизации. Для целей прогнозирования последствий химических аварий при взрыве на заводе целесообразно выделить территориально разнесенные объекты: корпус 1 и корпус 1А (точечные источники потенциальной опасности); линия железной дороги в пределах охраняемого периметра завода утилизации, по которой осуществляется доставка химических боеприпасов (линейный источник потенциальной опасности). Необходимо учесть, что на стадиях 1-4 технологического процесса химические боеприпасы защищены от воздействия ударной волны контейнером. Считая, что аварийные события в пределах каждой стадии технологического процесса независимы, по данным табл. 6.5 оценивались значения условных вероятностей химических аварий для каждого территориально выделенного объекта. Эти вероятности, а также объекты, на которые может воздействовать ударная волна, представлены в табл. 6.9. Совокупность объектов воздействия определяется на основании описания технологического процесса.

Значения условных вероятностей $P_{s_n/blast}$ непосредственно используются в расчетах риска. Исключение составляет значение условной вероятности для участка железной дороги (линейный источник потенциальной опасности). В расчетах используется плотность условной вероятности μ^{blast} , определяемая выражением:

$$\int_L \mu^{blast}(\xi) d\xi = 1, \quad (6.3.1)$$

где L — длина участка железной дороги в пределах периметра завода. Предполагается, что величина μ^{blast} постоянна для всего участка железной дороги.

Так как на разных стадиях технологического процесса номенклатура и степень защиты химических боеприпасов различаются, различаются и массы отравляющих веществ, находящиеся в разрушенных химических боеприпасах. Численные значения масс отравляющих веществ в зависимости от энергии взрывного превращения, были представлены в табл. 6.6. В дальнейшем были определены вероятности попадания в атмосферу веществ определенного типа P_{ij}^0 (данные табл. 6.8). Объединяя

Таблица 6.10. Масса M_{ij} и вероятность P_{ij} типа отравляющего вещества, поступившего в атмосферу при гипотетическом взрыве.

Место аварии	Стадия	Калибр, мм	M_{ij} , кг	$\overline{M_{ij}}$, кг	Вероятность типа ОВ — P_{ij}		
					Зарин	Зоман	Ви-газ
Ж/д	1	К-р 122	1,26	25,2	0,5256	0,2251	0,0058
		К-р 130	0,54	10,7	—	—	0,1149
		К-р 152	1,00	19,9	0,0927	0,0301	—
		К-р 540	8,31	166,2	—	—	0,0033
		К-р 880	10,81	216,3	—	—	0,0026
Корпус 1	2,3,4	К-р 122	1,26	25,2	0,5287	0,2264	0,0058
		К-р 130	0,54	10,7	—	—	0,1155
		К-р 152	1,00	19,9	0,0932	0,0303	—
	5,6	122	1,14	22,7	0,4711	0,3244	0,0079
		130	0,61	12,2	—	—	0,0755
		152	1,19	23,7	0,0914	0,0297	—
		—	—	—	—	—	—
Корпус 1А	2,3,4	К-р 122	1,26	25,2	0,5938	0,2543	0,0066
		К-р 152	1,00	19,9	0,1047	0,0340	—
		К-р 540	8,31	166,2	—	—	0,0037
		К-р 880	10,81	216,3	—	—	0,0030
	5,6	122	1,14	22,7	0,4829	0,3325	0,0081
		152	1,19	23,7	0,0937	0,0304	—
		540	8,77	175,48	—	—	0,0170
880	15,29	305,82	—	—	0,0354		
Складское помещение объекта хранения		122	1,14	22,7	0,4482	0,3086	0,0075
		130	0,61	12,2	—	—	0,0719
		152	1,19	23,7	0,0870	0,0282	—
		К-р 540	8,31	166,2	—	—	0,0158
		К-р 880	10,81	216,3	—	—	0,0329

данные таблиц 6.6 и 6.8 с учетом конкретного значения энергии взрывного превращения, приходим к совокупности значений вероятностей типа отравляющих веществ P_{ij} , которые представлены в верхней части таблицы 6.10.

Точное соответствие данных по вероятностям типа ОВ ($P_{ij} = P_{ij}^0$) имеет место только для первой стадии технологического процесса утилизации. В этом случае вероятности отвечают общей номенклатуре химических боеприпасов, с учетом распределения боеприпасов по контейнерам. В остальных случаях учитывалось, что на территориально выделенном объекте на данной стадии технологического процесса могут находиться химические боеприпасы, определенные данными табл. 6.9.

В табл. 6.10 также представлены значения масс отравляющих веществ, которые могут поступить в атмосферу при химических авариях на территориально выделенных объектах, — M_{ij} . Предполагалось, что в атмосферу поступает пять процентов массы отравляющего вещества, которое первоначально находилось в разрушенных при взрыве боеприпасах. Отдельным столбцом представлены предельные значения масс отравляющих веществ $\overline{M_{ij}}$, которые гипотетически могут

попасть в окружающую среду при взрыве (математические ожидания предельных значений).

Отметим, что более детальный анализ последствий взрыва на объекте утилизации требует учета возможности присутствия на шестой стадии технологического процесса химических боеприпасов с нарушенной герметичностью внутренней полости с отравляющими веществами. При взрыве масса отравляющих веществ, попадающих в атмосферу, может несколько отличаться от данных, представленных в табл. 6.10. Однако, в целом, эти изменения незначительны и в рамках данной работы не рассматриваются.

Согласно определениям главы 1, для оценок условного аварийного риска при взрыве — $W^{blast}(r, \varphi)$ — имеем

$$W^{blast}(r, \varphi) = \sum_{n=1}^m P_{s_n/blast} \cdot W_n^{blast}(r, \varphi), \quad (6.3.2)$$

где оценки условного аварийного риска, связанные со взрывом на n -ом территориально выделенном объекте, определяются выражениями:

$$W_n^{blast}(r, \varphi) = \sum_{i,j} P_{ij} \cdot \sum_k v_k \cdot U_k^{blast}(r, \varphi, M_{ij}^n), \quad (6.3.3)$$

$$W_n^{blast}(r, \varphi) = \int_L \mu^{blast}(\xi) \cdot \sum_{i,j} P_{ij} \cdot \sum_k v_k \cdot U_k^{blast}(r, \varphi, M_{ij}^n) d\xi. \quad (6.3.4)$$

Выражение (6.3.3) отвечает последствиям взрыва на различных стадиях в корпусах 1 и 1А (точечные источники опасности), выражение (6.3.4) — последствиям взрыва на железной дороге (линейный источник опасности). В данном случае $m = 11$. Используются обозначения: $P_{s_n/blast}$ — вероятность аварии на s_n -ой стадии технологического процесса утилизации отравляющих веществ при условии, что взрыв имел место, $\mu^{blast}(\xi)$ — плотность вероятности взрыва на железной дороге в точке ξ , P_{ij} — вероятность, что при взрыве в химических боеприпасах калибра j окажется вещество i -го типа (зарин, зоман, Ви-газ), количество вещества отвечает массе M_{ij} .

Интегральная по зоне поражения оценка условного аварийного риска при взрыве на территориально выделенном объекте:

$$W_L^{blast} = \int_{\Omega} W_n^{blast}(r, \varphi) d\Omega, \quad (6.3.5)$$

где $W_n^{blast}(r, \varphi)$ отвечает выражению (6.3.3), если оцениваются последствия взрыва в производственных корпусах и выражению (6.3.4) — на участке железной дороги.

Объект хранения. Данные по массам и типам отравляющих веществ, попадающих в атмосферу при взрыве на одном из складских помещений объекта хранения, представлены в нижней части табл. 6.10. Полагалось, что вероятность P_{ij} попадания в атмосферу отравляющего вещества типа i при взрыве в складском помещении объекта хранения пропорциональна массе отравляющего вещества типа i в боеприпасах калибра j . Учитывая, что химические боеприпасы хранятся отсортированными по номенклатуре, предполагалось, что в зоне воздействия ударной волны при взрыве могут находиться боеприпасы только одного типа.

Для оценок условного аварийного риска при взрыве на объекте хранения — $W^{blast}(r, \varphi)$ — имеем выражение (6.3.2), где $m = 65$. Оценка условного аварийного риска, связанная со взрывом на n -ом территориально выделенном объекте (складском помещении), определяется выражением (6.3.2), которое применительно к данному случаю редуцируется к виду:

$$W^{blast}(r, \varphi) = P_{0/blast} \sum_{n=1}^{65} \sum_{ij} P_{ij} \cdot \sum_k v_k \cdot U_k^{blast}(r, \varphi, M_{ij}^n). \quad (6.3.6)$$

Согласно соотношению (6.3.6), в точке (r, φ) будут учитываться последствия от возможного взрыва в любом складском помещении объекта хранения. В данном приближении не учитываются различия складских помещений. Единственный фактор, идентифицирующий складское помещение, — это его расположение относительно точки (r, φ) — точки размещения реципиента риска. Как было определено в разделе 6.3.1, $P_{0/blast} = 1/65$.

6.3.4. Количественная оценка уровня опасности. Численные оценки условного риска при взрыве на заводе по утилизации представлены в табл. 6.11, где W_L^{blast} , W_G^{blast} — интегральные по зоне поражения оценки условного аварийного и условного аварийного группового риска, соответственно. Оценки представлены по каждому территориально выделенному объекту и в целом по заводу утилизации. Учитывая, что численные значения риска зависят от возможности эвакуации населения (предполагается, что эвакуация заканчивается в течение часа с момента попадания токсичных веществ в приземный слой атмосферы), оценки риска представлены для случая, когда население эвакуировано из зоны поражения и для случая отсутствия эвакуации. Также представлены так называемые предельные оценки условного риска, которые отвечают случаю попадания в атмосферу предельных значений масс токсичных веществ. Подчеркнем, что в настоящее время не представляется возможным указать аварийный сценарий, связанный со взрывом на заводе утилизации, посредством которого могут быть достигнуты предельные оценки условного риска. Поэтому предельные оценки можно рассматривать в качестве верхней границы риска.

Как следует из приведенных данных, химическая опасность развивается в наибольшей степени, если взрыв происходит в корпусе 1А на стадии раснаряжения боевых частей химических ракет. На этой стадии технологического процесса боевые части химических ракет не защищены контейнером. Интегральные оценки условного аварийного риска при взрыве в корпусе 1А (стадия 5-6) без учета возможности эвакуации населения достигают значений $\approx 2 \cdot 10^4$, что соответствует эффективному радиусу зоны «достоверного» поражения реципиента риска $R^{эфф} \approx 80$ метров. Хотя химическая опасность развивается в наибольшей степени при взрыве в корпусе 1А, максимальный вклад в интегральную оценку условного аварийного риска вносят последствия взрыва в корпусе 1 в отделении временного хранения химических боеприпасов. Этот вклад при отсутствии эвакуации составляет величину $\approx 27\%$. Численное значение вклада связано с учетом вероятности взрыва при работе с химическими боеприпасами на конкретной стадии технологического процесса.

Таблица 6.11. Условные оценки аварийного риска при взрыве на объекте уничтожения химического оружия.

	Ж/д		Корпус 1		Корпус 1А			Всего
	1	2	3,4	5,6	2	3,4	5,6	
Оценки риска при эвакуации в течение 1 часа								
W_G^{blast}	$9 \cdot 10^{-11}$	0,0	0,0	0,0	$1 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-11}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-9}$
Вклад, %	3,3	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	96,5	
W_L^{blast}	$4 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$
Вклад, %	12,1	9,4	26,4	5,8	7,4	18,0	20,9	
Оценки риска при отсутствии эвакуации								
W_G^{blast}	$1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-20}$	$3 \cdot 10^{-20}$	$2 \cdot 10^{-21}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$
Вклад, %	3,2	0,0	0,0	0,0	1,5	4,0	91,3	
W_L^{blast}	$8 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^3$
Вклад, %	13,1	9,8	27,1	5,4	6,3	16,2	22,1	
Предельные оценки риска								
W_G^{blast}	$4 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-2}$
Вклад, %	7,3	0,4	1,0	0,1	6,7	18,5	66,0	
W_L^{blast}	$2 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$
Вклад, %	11,2	9,3	25,5	6,6	8,7	23,7	15,0	

Интегральная оценка условного аварийного риска при взрыве $6 \cdot 10^3$. Значение риска уменьшается до $3 \cdot 10^3$, если последствия взрыва удастся ликвидировать через один час (эвакуация населения в течении часа с момента химической аварии). Предельное значение условного аварийного риска при взрыве составляет величину $2 \cdot 10^5$, что соответствует максимальному эффективному радиусу зоны «достоверного» поражения реципиента риска при токсическом воздействии — $R^{эфф} \approx 360$ метров.

Указанные выше обстоятельства проиллюстрированы на рис. 6.4, где приведены уровни условного локального риска и соответствующие им эффективные радиусы.

Согласно результатам прогнозирования, представленным в табл. 6.11, наибольшую опасность, с точки зрения последствий для населения, представляет взрыв в корпусе 1А на стадиях 5,6. Анализ структуры группового риска при взрыве в корпусе 1А показывает, что значение группового риска формируется за счет учета последствий разрушения боевых частей химических ракет, наполненных Ви-газом. На стадиях 5,6 боевые части химических ракет находятся вне защитных контейнеров.

Интегральная оценка условного аварийного группового риска без учета возможности эвакуации населения в этом случае $W_G^{blast} \approx 4 \cdot 10^{-4}$, что соответствует максимальному вкладу ($\approx 91\%$) в оценку группового риска при взрыве на заводе. Таким образом, основной вклад в значение условного группового риска вносят последствия взрыва в корпусе 1А на стадии раснаряжения, а основной вклад в значение условного локального риска вносят последствия взрыва в корпусе 1

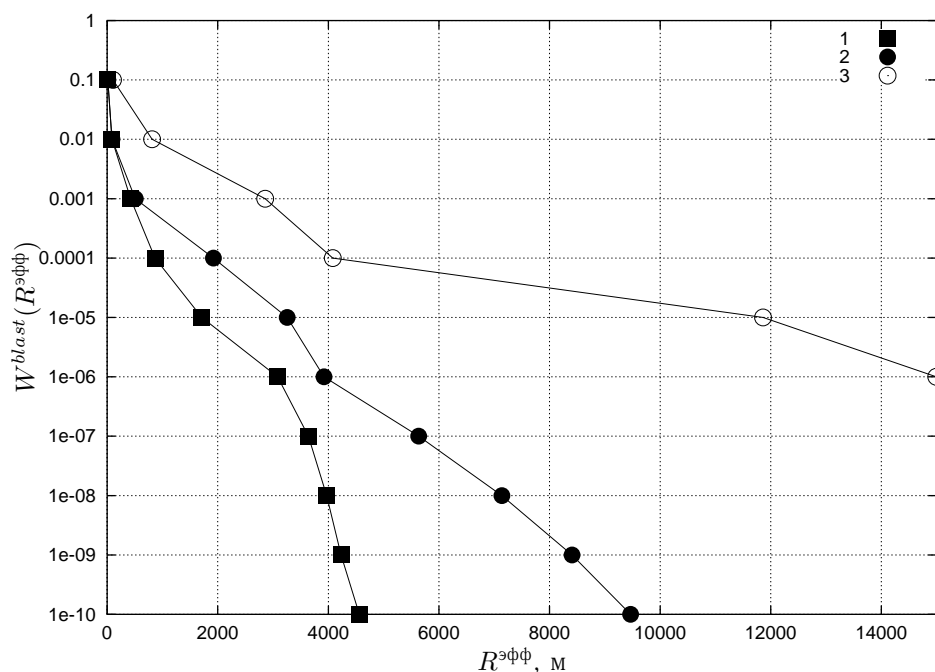


Рис. 6.4. Зависимость уровня условного локального риска от эффективного радиуса при взрыве на заводе: 1 — эвакуация населения в течении 1 часа; 2 — при отсутствии эвакуации; 3 — предельная оценка

в отделении временного хранения химических боеприпасов. Несоответствие мест аварий, отвечающих максимальным вкладам в значения локального и группового риска, характерно для случая, когда населенные пункты расположены на больших расстояниях от потенциально опасного объекта и имеется несколько веществ с различной токсичностью.

Численные значения аварийного группового риска при взрыве на заводе зависят от времени ликвидации последствий аварий: $W_G^{blast} \approx 3 \cdot 10^{-9}$ при эвакуации населения в течении часа, $W_G^{blast} \approx 4 \cdot 10^{-5}$ при отсутствии эвакуации населения. Оценка группового риска при взрыве на заводе по утилизации уменьшается на четыре порядка, если эвакуация населения заканчивается в течении часа с момента аварии. Предельное значение условного группового риска при взрыве на заводе составляет величину $\approx 6 \cdot 10^{-2}$. Численные значения интегрального аварийного группового риска соотносятся со средним количеством жертв при условии взрыва на территории завода.

Последствия взрыва для жителей населенных пунктов могут характеризоваться максимальным количеством жертв при аварии N_{let}^{max} и вероятностью P , что сложились условия, отвечающие максимальному ущербу. Результаты прогнозирования N_{let}^{max} для близлежащих населенных пунктов при взрыве в корпусе 1А на

Таблица 6.12. Максимальное количество жертв N_{let}^{max} в населенных пунктах при взрыве на территории завода по утилизации.

Населенный пункт	Корпус 1А		Железная дорога			
	(стадии 5, 6)		Северный участок		Южный участок	
	N_{let}^{max}	P	N_{let}^{max}	P	N_{let}^{max}	P
Оценки риска при эвакуации в течение 1 часа						
Пуктыш	$4,5 \cdot 10^{-8}$	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-11}$	$3,3 \cdot 10^{-9}$	$6,5 \cdot 10^{-15}$	$3,3 \cdot 10^{-9}$
Никитино	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-11}$	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$1,1 \cdot 10^{-13}$	$2,6 \cdot 10^{-9}$
Петровское	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$4,9 \cdot 10^{-7}$	$3,0 \cdot 10^{-12}$	$5,5 \cdot 10^{-9}$	$3,7 \cdot 10^{-11}$	$5,6 \cdot 10^{-9}$
Наумовка	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-7}$	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-9}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$
Снегири	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-11}$	$2,3 \cdot 10^{-9}$	$2,4 \cdot 10^{-10}$	$2,2 \cdot 10^{-9}$
Советская	$2,2 \cdot 10^{-9}$	$2,9 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-13}$	$3,2 \cdot 10^{-9}$	$5,9 \cdot 10^{-11}$	$3,2 \cdot 10^{-9}$
Чумляк	$2,3 \cdot 10^{-13}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	—	—	$2,4 \cdot 10^{-14}$	$3,6 \cdot 10^{-9}$
Оценки риска при отсутствии эвакуации						
Пуктыш	$7,2 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \cdot 10^{-7}$	$8,1 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-9}$
Никитино	$5,0 \cdot 10^{-1}$	$7,0 \cdot 10^{-8}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-10}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$
Петровское	$6,0 \cdot 10^{-1}$	$2,3 \cdot 10^{-7}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-9}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-9}$
Наумовка	27,2	$1,4 \cdot 10^{-7}$	4,5	$1,6 \cdot 10^{-9}$	12,1	$1,7 \cdot 10^{-9}$
Снегири	$5,1 \cdot 10^{-1}$	$6,9 \cdot 10^{-8}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-10}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$7,4 \cdot 10^{-10}$
Советская	$3,6 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$
Чумляк	$7,9 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-9}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-9}$
Предельные оценки риска						
Пуктыш	448	$2,6 \cdot 10^{-7}$	447	$3,0 \cdot 10^{-9}$	447	$2,9 \cdot 10^{-9}$
Никитино	125	$1,4 \cdot 10^{-7}$	125	$1,6 \cdot 10^{-9}$	125	$1,6 \cdot 10^{-9}$
Петровское	575	$2,4 \cdot 10^{-7}$	575	$2,6 \cdot 10^{-9}$	575	$2,8 \cdot 10^{-9}$
Наумовка	95	$1,6 \cdot 10^{-7}$	95	$1,6 \cdot 10^{-9}$	95	$1,9 \cdot 10^{-9}$
Снегири	110	$7,7 \cdot 10^{-8}$	110	$8,7 \cdot 10^{-10}$	110	$8,7 \cdot 10^{-10}$
Советская	279	$1,0 \cdot 10^{-7}$	279	$1,2 \cdot 10^{-9}$	279	$1,2 \cdot 10^{-9}$
Чумляк	995	$1,3 \cdot 10^{-7}$	995	$1,4 \cdot 10^{-9}$	994	$1,4 \cdot 10^{-9}$

стадиях 5,6 представлены в табл. 6.12. Прогнозируемое количество жертв зависит от расположения населенного пункта относительно завода и от численности жителей в нем и соответствуют наиболее неблагоприятным, с точки зрения последствий взрыва, метеорологическим условиям: скорости и направления ветра, состоянию устойчивости атмосферы.

Максимальное значение $N_{let}^{max} \approx 27$ относится к населенному пункту Наумовка, расположенному на минимальном расстоянии от завода (4,5 километра). Вероятность того, что сложатся условия, отвечающие максимальному количеству жертв (при условии, что взрыв на заводе имеет место), оценивается величиной $1,4 \cdot 10^{-7}$. В случае эвакуации населения при взрыве в корпусе 1А максимально возможное количество жертв сокращается до значения $\approx 4 \cdot 10^{-2}$.

Следующее по значимости для жителей населенного пункта Наумовка аварийное событие на территории завода по утилизации относится к взрыву на участке железной дороги. Прогнозируемое количество жертв в этом случае будет различаться в зависимости от места аварии на участке железной дороги. В

табл. 6.12 представлены значения максимального количества жертв N_{let}^{max} в населенных пунктах при взрыве в двух крайних точках участка железной дороги: северной и южной.

Из представленных в табл. 6.12 данных следует, что наибольшее число жертв может иметь место в населенном пункте Наумовка — ≈ 12 . В предположении, что взрыв произошел, условная вероятность этого события — $1,7 \cdot 10^{-9}$. Причем, при смещении места аварии с юга на север по железной дороге, в населенном пункте Наумовка ожидается уменьшение числа жертв.

Предельные значения максимально возможного количества жертв при аварии N_{let}^{max} в ближайших к заводу по утилизации населенных пунктах совпадают с числом жителей в населенных пунктах: гипотетическая авария со взрывом, характеризующая предельными значениями масс токсичных веществ в атмосфере, приводит к поражению всего населения в ближайших населенных пунктах. При условии, что гипотетическая авария «взрыв» имела место, вероятности событий, приводящих к максимально возможному количеству жертв, представлены в табл. 6.12.

Таким образом, результаты прогнозирования последствий взрыва на объекте по уничтожению химического оружия можно представить в виде следующих количественных характеристик уровня опасности:

- Интегральная по зоне поражения оценка условного аварийного риска — $W_L^{blast} \approx 6 \cdot 10^3$. При условии эвакуации населения в течение часа — $W_L^{blast} \approx 3 \cdot 10^3$. Предельное значение — $W_L^{blast} \approx 2 \cdot 10^5$.
- Математическое ожидание числа жертв среди населения — $W_G^{blast} \approx 4 \cdot 10^{-5}$. При условии эвакуации населения в течение часа — $W_G^{blast} \approx 3 \cdot 10^{-9}$. Предельное значение — $W_G^{blast} \approx 6 \cdot 10^{-2}$.
- Максимальное число жертв среди населения — $N_{let}^{max} \approx 27$ (вероятность наиболее неблагоприятных условий $\approx 1 \cdot 10^{-7}$). При условии эвакуации населения в течение часа — $N_{let}^{max} \approx 4 \cdot 10^{-2}$ (вероятность — $\approx 4 \cdot 10^{-7}$).

Объект хранения. При взрыве в одном из помещений арсенала, где хранятся химические боеприпасы, численные характеристики уровня опасности имеют значения:

- Интегральная оценка условного аварийного риска — $W_L^{blast} \approx 1,4 \cdot 10^4$. При условии эвакуации населения в течение часа — $W_L^{blast} \approx 5,7 \cdot 10^3$. Предельное значение — $W_L^{blast} \approx 2,3 \cdot 10^5$.
- Математическое ожидание числа жертв среди населения — $W_G^{blast} \approx 1,1 \cdot 10^{-1}$. При условии эвакуации населения в течение часа — $W_G^{blast} \approx 1,7 \cdot 10^{-2}$. Предельное значение — $W_G^{blast} \approx 3,1$.
- Максимальное число жертв среди населения — $N_{let}^{max} \approx 495$ (вероятность, что сложатся условия, приводящие к указанному числу жертв $\approx 6,7 \cdot 10^{-9}$). При условии эвакуации населения в течение часа — $N_{let}^{max} \approx 115$ (вероятность $\approx 1,6 \cdot 10^{-9}$).

Таблица 6.13. Максимальное количество жертв N_{let}^{max} при взрыве в одном из помещений хранения арсенала.

Населенный пункт	Эвакуация в течение 1 часа		При отсутствии эвакуации		Предельный случай	
	N_{let}^{max}	P	N_{let}^{max}	P	N_{let}^{max}	P
Плановый	114	$2,5 \cdot 10^{-8}$	210	$2,3 \cdot 10^{-8}$	292	$2,8 \cdot 10^{-8}$
Чумляк	86	$1,4 \cdot 10^{-8}$	495	$6,7 \cdot 10^{-9}$	995	$2,8 \cdot 10^{-8}$
Юрузановка	1	$3,4 \cdot 10^{-8}$	21	$2,4 \cdot 10^{-9}$	78	$2,2 \cdot 10^{-9}$
Кр. Увал	2	$2,0 \cdot 10^{-8}$	30	$1,4 \cdot 10^{-9}$	80	$1,4 \cdot 10^{-9}$
Город	0		6	$1,8 \cdot 10^{-9}$	7230	$2,2 \cdot 10^{-9}$
Советская	0		2	$9,4 \cdot 10^{-10}$	279	$1,6 \cdot 10^{-9}$

Количество жертв в ближайших к арсеналу населенных пунктах N_{let}^{max} в случае взрыва в одном из хранилищ при наиболее неблагоприятных условиях представлено в табл. 6.13. В таблице так же указана вероятность P , что сложатся условия, отвечающие наиболее неблагоприятному случаю. Как следует из результатов прогнозирования последствий взрыва на арсенале, представленных в табл. 6.13, в ближайших к арсеналу населенных пунктах возможны большие человеческие жертвы. Однако вероятности, что сложатся условия, отвечающие данным потерям, — крайне незначительны. Это величины порядка 10^{-8} — 10^{-10} .

6.4. Прогноз последствий «пожара»

В случае пожара на объекте, где находятся химические боеприпасы, могут сложиться условия, благоприятные для несанкционированного освобождения отравляющих веществ из боеприпасов и попадания их в атмосферу. Теоретическая возможность нарушения герметичности внутренних полостей боеприпасов в условиях пожара была показана в разделах 2.3 и 2.4. В частности, было показано, что воздействие теплового потока при пожаре на химический боеприпас может привести к повышению давления во внутренней полости, нарушению герметичности и впрыскиванию парогазовой смеси фосфорорганических отравляющих веществ в окружающее пространство.

Положим, что вся масса токсичного вещества, освободившегося из разрушенного при пожаре химического боеприпаса, осталась в воздухе. Значение массы равно разности между значениями массы отравляющих веществ в химическом боеприпасе до пожара и массы разложившихся веществ. Продукты реакции деструкции также попадают в воздух. Но они не влияют на характеристики источника химической опасности, так как токсичность продуктов реакции разложения фосфорорганических отравляющих веществ незначительна.

В разделе 3.4 было показано, что при пожаре в технологическом помещении возможно создание условий, при которых часть отравляющих веществ может покинуть горящее помещение и оказаться в приземном слое атмосферы. В этом случае может возникнуть источник токсической опасности для населения, проживающего в районе размещения потенциально опасного объекта.

Таблица 6.14. Характеристики аварийных сценариев «пожара» на объекте по уничтожению химического оружия.

Место аварии	Масса ОБ, кг	Частота, год ⁻¹
Железнодорожный транспорт	5000	$4,5 \cdot 10^{-3}$
Корпус 1, 1А. Разгрузочная площадка	5000	$5,0 \cdot 10^{-4}$
Корпус 1. Отделение временного хранения	30000	$8,3 \cdot 10^{-6}$
Корпус 1. Отделение расснаряжения	56	$8,3 \cdot 10^{-6}$
Корпус 1А. Отделение временного хранения	11000	$8,8 \cdot 10^{-6}$
Корпус 1А. Отделение расснаряжения	555	$8,8 \cdot 10^{-6}$
Корпус 1Б. Отделение битумирования	–	$1,8 \cdot 10^{-3}$
Корпус 3. Пункт слива цистерн	–	$5,6 \cdot 10^{-6}$
Корпус 3А. Пункт слива цистерн	–	$5,6 \cdot 10^{-6}$

Количество токсичного вещества, попадающего в атмосферу при пожаре на объекте зависит от динамики температурного поля и динамики воздушных потоков в помещении. Источник химической опасности при пожаре возникает только в случае, когда отравляющие вещества за время нахождения в горящем помещении не успевают полностью разложиться до поступления в атмосферу. Химическая опасность может возникнуть, если при своем движении пары отравляющих веществ не попадут в области, где температура выше порога воспламенения.

Перенос токсичной примеси воздушными потоками в пограничном слое атмосферы может привести к токсическому воздействию на людей, проживающих в районе размещения объекта. Этот перенос описывается в рамках модельных представлений, изложенных в разделе 4.4. Отметим, что согласно рассуждениям разделов 2.3 и 2.4, теоретическая возможность возникновения химической опасности при пожаре на объектах, где находятся химические боеприпасы, связана с определенными типами боеприпасов и с определенными режимами нагрева и охлаждения боеприпасов.

В общем случае, последствия пожара для реципиента риска — человека — проявляются посредством различных видов воздействий. Однако если анализу подлежат последствия пожаров относительно населения, проживающего на некотором расстоянии от техногенных объектов, то все виды аварийных воздействий, кроме токсического, не оказывают существенного влияния. Это связано с тем, что химическая опасность обычно имеет больший радиус воздействия, чем другие виды воздействий при пожаре.

6.4.1. Частота возникновения аварии.

Объект по утилизации. Некоторые характеристики наиболее значимых аварийных сценариев пожара в пределах завода по утилизации представлены в табл. 6.14. В частности, представлены прогнозируемые частоты аварийных ситуаций, связанных с пожаром. В таблице так же представлены ориентировочные значения масс отравляющих веществ, которые могут оказаться в месте аварии. Частоты и массы отравляющих веществ отвечают данным технической документации по проекту завода по утилизации.

Таблица 6.15. Условные вероятности возникновения химической аварии на различных технологических стадиях при пожаре на объекте по уничтожению химического оружия.

№	Стадия технологического процесса	$P_{s_n/fire}$	$P_{p_n/fire}$
1	Транспортировка боеприпасов ж/д транспортом	0,100	0,01
2	Разгрузка боеприпасов с ж/д транспорта	0,200	0,05
3	Складирование и хранение химических боеприпасов в отделениях временного хранения	0,500	0,01
4	Транспортировка боеприпасов к линии расснаряжения	0,050	0,05
5	Подготовка боеприпасов к расснаряжению	0,075	1,00
6	Расснаряжение боеприпасов	0,075	1,00

Частоты аварийных ситуаций, представленные в табл. 6.14, необходимо дополнить частотами противоправных действий (табл. 6.4), которые также могут инициировать пожар на заводе.

Характеристики токсического поражения населения при возможном пожаре на заводе по утилизации зависят от места аварии. В свою очередь, на территории завода существуют такие области, где технологией не предусмотрено наличие химических боеприпасов. Поэтому анализ последствий аварий целесообразно ограничить анализом только тех тех сценариев, в которых пожар происходит в местах возможного размещения химических боеприпасов.

Значения масс отравляющих веществ, представленные в таблице 6.14, являются условными и соответствуют максимально возможной массе отравляющих веществ, присутствующих в зоне возможного пожара. Массы могут изменяться в широких пределах. Например, при транспортировке химических боеприпасов железнодорожным транспортом нормируется количество контейнеров с химическими боеприпасами на платформе. При этом масса отравляющих веществ в перевозимых на платформе боеприпасах может изменяться от одной до семнадцати тонн в зависимости от вида химических боеприпасов.

Анализ частотных характеристик аварийных сценариев пожара, позволяет прогнозировать, что, как и в случае химических аварий, инициированных взрывом, основными событиями, инициирующими пожар, следует признать противоправные действия. Частота противоправных действий отвечает данным табл. 6.4. Тогда для частоты пожара на заводе, который теоретически может привести к химической аварии, следует положить $P_{fire} = 5 \cdot 10^{-4}$. Здесь уместны все рассуждения, приведенные в разделе 6.3.1, при обосновании частоты химической аварии, инициированной взрывом на объекте уничтожения химического оружия.

По аналогии с аварийным сценарием «взрыва», где были введены условные вероятности химических аварий при взрыве $P_{s_n/blast}$ (табл. 6.5), для условных вероятностей химических аварий при пожаре имеем прогнозируемые значения $P_{s_n/fire}$, представленные в табл. 6.15. Значения условных вероятностей отвечают условиям, при которых возможно возникновение источника химической опасности при пожаре.

Переход от частот возникновения пожара, к частотам химических аварий при пожаре связан с учетом степени защиты химических боеприпасов. Действительно, если химические боеприпасы защищены контейнером, то, как показано в разделе 2.3, вероятность возникновения источника химической опасности весьма незначительна. Вероятность возникновения источника химической опасности может быть значимой, если химические боеприпасы не защищены от воздействия теплового излучения, возникающего при пожаре. Поэтому в табл. 6.15 также представлены значения условных вероятностей $P_{p_n/fire}$, которые отвечают состоянию защиты химических боеприпасов на n -й стадии технологического процесса. Значение $P_{p_n/fire}$ интерпретируется как вероятность того, что до или во время пожара в пределах территории n -й стадии технологического процесса произошли события, в результате которых химические боеприпасы оказались под воздействием теплового излучения. На пятой и шестой стадиях технологического процесса утилизации химические боеприпасы не защищены контейнером, что соответствует $P_{p_n/fire} = 1$ при $n = 5, 6$.

Объект хранения. Предполагая, что основной вклад в частоту пожара как на объекте хранения, так и на заводе по утилизации химических боеприпасов, вносят противоположные действия, можно положить, что и частоты химических аварий при пожаре на объектах хранения и утилизации совпадают. Следовательно, для объекта хранения $P_{fire} = 5 \cdot 10^{-4}$. Предполагая, что вероятность химической аварии, инициируемой пожаром, не зависит от расположения и характеристик складских помещений на объекте хранения, для условной вероятности химической аварии при пожаре на одном из складских сооружений с химическими боеприпасами имеем $P_{0/fire} = (1/65)$.

Значения условных вероятностей $P_{p_0/fire}$ для химических боеприпасов на объекте хранения определяют степень защиты боеприпасов от воздействия тепловых потоков. Учитывая защищенность боеприпасов положим, что $P_{p_0/fire} = 10^{-2}$ для боевых частей химических ракет, хранящихся в технологических контейнерах, и $P_{p_0/fire} = 1$ для остальных типов химических боеприпасов, которые хранятся на стеллажах без дополнительной защиты.

6.4.2. Характеристики источников химической опасности. Характеристики источников химической опасности², обусловленной разрушением боеприпасов в зоне пожара, представлены в табл. 6.16. К этим характеристикам относятся: масса отравляющего вещества в разрушенном химическом боеприпасе — m_0 , значение условной вероятности возникновения источника химической опасности при разрушении боеприпаса в условиях пожара — $P_m(t_d)$, где t_d — временной интервал нагрева химического боеприпаса до разрушения.

Введение вероятности P_m обусловлено тем, что нарушение герметичности внутренней полости химического боеприпаса и, соответственно, попадание отравляющих веществ в окружающую среду, происходит за различные временные интервалы — t_d . Действительно, для некоторых видов боеприпасов разрушение снарядов имеет место лишь при условии теплового воздействия на боеприпас в течение нескольких минут. В то время как для других видов боеприпасов этот

²Компьютерные программы прогнозирования и расчеты выполнены А. В. Аксаковым

Таблица 6.16. Характеристики источников опасности при разгерметизации химических боеприпасов в условиях пожара.

	Зоман		Ви-газ			
	122	152	122	130	540	880
m_0 , кг	0,44	0,90	2,12	1,03	134	373
$P_m(t_d)$	1,00	1,00	1,00	1,00	0,23	0,02

временной интервал может достигать часа. За время нагрева боеприпаса до его разрушения, пожар в здании может перейти в стадию объемного горения. Если разрушение боеприпаса происходит в условиях развитого пожара, на стадии объемного горения, то весьма вероятно воспламенение паров отравляющих веществ. Изменение режима пожара в здании от возгорания до объемного горения происходит в течение некоторого времени t_0 . Для производственных помещений, размеры которых сопоставимы с помещениями цеха, корпуса, временной интервал t_0 составляет величину около пятнадцати минут. Различия во временных интервалах нарушения герметичности химических боеприпасов учитываются численным значением P_m . Предполагалось, что зависимость вероятности P_m от времени t_d может быть аппроксимирована выражением:

$$P_m(t_d) = \begin{cases} 1, & \text{при } t_d < t_0, \\ \exp\left(-\frac{(t_d-t_0)}{t_0}\right), & \text{при } t_d \geq t_0, \end{cases} \quad (6.4.1)$$

где t_0 — временной интервал перехода к объемному режиму горения в помещении. В свою очередь, временные интервалы сохранения герметичности химических боеприпасов t_d зависят от характеристик пожара.

Массы отравляющих веществ m_0 в табл. 6.16 отвечают массам, представленным в разделе 2.3 для случая нагрева химического боеприпаса «стенкой» пламени, температура которого $T_p = 1800$ К.

По сравнению с боеприпасами, начиненными зоманом и ви-газом, для химических боеприпасов, начиненных заринном, вероятностью нарушения герметичности при пожаре можно пренебречь (см. раздел 2.3), что нашло отражение в табл. 6.16.

Как указывалось в разделе 3.4, процесс пожара в помещении имитируется горением совокупности отдельных «очагов горения», случайным образом расположенных в помещении. Переход от массы отравляющего вещества в разрушенном боеприпасе m_0 к характеристике источника химической опасности, порождаемой «очагом горения», связан с оценкой числа боеприпасов, оказавшихся в поле воздействия очага горения. Математическое ожидание значения этого числа N_m может быть оценено как $N_m \approx 2 \cdot \sqrt{\pi S}/l$, где S — площадь «очага горения», l — длина химического боеприпаса. Оценка числа N_m также должна учитывать возможное количество химических боеприпасов в месте аварии N_n^{max} . Если на n -ом участке технологического процесса утилизации максимальное количество химических боеприпасов, одновременно присутствующих на участке, ограничено числом N_n^{max} , то для n -го участка $(N_m)_n \leq N_n^{max}$. Математическое ожидание значения массы

отравляющих веществ, попавших в окружающую среду от «очага горения», представляется как $m \simeq P_m \cdot N_m \cdot m_0$, где P_m — условная вероятность возникновения источника химической опасности при разрушении боеприпаса в условиях пожара.

В соответствии с идеологией компьютерного моделирования пожара в помещении полагаем, что расположение «очага горения» равновероятно в любой точке помещения. В общем случае частоту, отвечающую нахождению химического боеприпаса в зоне воздействия «очага горения», можно оценить как Ω_m/Ω_t , где Ω_m — площадь, занятая химическими боеприпасами, Ω_t — общая площадь технологического помещения, охваченного пожаром. В данной работе поправка на частоту размещения химических боеприпасов в зоне теплового влияния очагов горения введена в условную вероятность химических аварий при пожаре $P_{s_n/fire}$. Поэтому в расчетах полагается, что химические боеприпасы находятся в зоне, где существенно тепловое влияние от «очага горения».

Для моделирования условий пожара на техногенном объекте положим, что пожар эквивалентен некоторому количеству «очагов горения» — L_f , случайным образом расположенных в пределах территории горящего сооружения. Число L_f определяется характеристиками пожара. Например, величина $L_f \cdot (S/\Omega_t)$ может трактоваться как относительная площадь горения в помещении (S — площадь «очага горения», Ω_t — общая площадь помещения). Прогнозируемое значение L_f может быть связано с площадью потенциальных источников горения.

В общем случае, значение L_f характеризует условия пожара, но не источник химической опасности. В частности, увеличение количества боеприпасов с нарушением герметичности внутренней полости ограничено количеством боеприпасов в месте аварии. Поэтому масса отравляющих веществ в разрушенных при пожаре химических боеприпасах (характеристика источника химической опасности) может оставаться неизменной при увеличении параметра L_f .

Полагая, что последствия пожара в помещении эквивалентны последствиям горения нескольких очагов горения, случайным образом расположенных по территории горящего сооружения, определялась доля токсичных веществ, достигших приземного слоя атмосферы. Относительное количество токсичных веществ, достигшее атмосферы, усреднялось по совокупности результатов вычислительных экспериментов, в каждом из которых моделировался процесс пожара в помещении. При моделировании пожара расположения «очагов горения» задавались с использованием монте-карловской процедуры. По представленному алгоритму определялась величина Ξ — среднее значение доли отравляющих веществ, достигших приземного слоя атмосферы, при пожаре в помещении.

Объект по утилизации. На территории завода по утилизации выделяются территориально разнесенные объекты, которые в случае пожара могут представлять химическую опасность. По аналогии с разделом 6.3.3 выделяются корпуса 1 и 1А (точечные источники) и участок железной дороги в пределах периметра завода (линейный источник).

Моделирование движения носителей химической опасности приводит к следующим значениям характеристик газовоздушного потока при выходе из горящего помещения в приземный слой атмосферы (Ξ — усредненная доля отравляющих

веществ, достигающих атмосферы; δT_{out} — усредненный перегрев газовой смеси на выходе из помещения):

- для корпусов 1 и 1А — $\Xi \approx 0,05$, $\delta T_{out} \approx 52$ К;
- для участка ж/д — $\Xi \approx 0,07$, $\delta T_{out} \approx 73$ К.

Некоторые результирующие характеристики источника химической опасности при пожаре представлены в верхней части табл. 6.17. В частности, представлены математические ожидания значений масс отравляющих веществ, попавших в атмосферу при пожаре M_{ij} , значение вероятности P_{ij} , что в разрушенных при пожаре химических боеприпасах калибра j окажется вещество i -го типа.

Отдельным столбцом в таблице представлены значения M_{ij} , которые отвечают предельным характеристикам источника химической опасности при пожаре. Численные значения предельных характеристик соответствуют гипотетическому предположению, что все количество отравляющих веществ, которое находилось в химических боеприпасах в момент их разрушения, достигает приземного слоя атмосферы. То есть во время движения газовой смеси с парами отравляющих веществ по объему горящего помещения подавлены реакции деструкции и окисления отравляющих веществ. Отметим, что в настоящее время не представляется возможным указать условия, при которых возможно подавление реакций деструкции и окисления в условиях пожара.

Объект хранения. При пожаре на одном из складских помещений объекта хранения в атмосферу могут поступить отравляющие вещества, характеристики которых, представлены в нижней части табл. 6.17. При оценке массы отравляющих веществ был учтен коэффициент $\Xi = 0,01$, соответствующий доле отравляющих веществ, которые могут достичь атмосферы. Численное значение коэффициента Ξ было оценено по результатам серии компьютерных экспериментов моделирования пожара в складском помещении объекта хранения. В этой же серии экспериментов определялся средний перегрев газовой смеси при выходе потока в атмосферу $\delta T_{out} = 61$ К.

Предполагалось, что пожар в складском помещении объекта хранения эквивалентен по своим последствиям горению $L_f \approx 10$ «условных очагов горения». Предполагалось, что химические боеприпасы распределены равномерно по складским помещениям и в зону теплового воздействия пожара попадают боеприпасы одного типа.

6.4.3. Количественная оценка уровня опасности. Оценка условного аварийного риска при пожаре — $W^{fire}(r, \varphi)$ — определяется выражением:

$$W^{fire}(r, \varphi) = \sum_{n=1}^m P_{s_n/fire} \cdot P_{p_n/fire} \cdot W_n^{fire}(r, \varphi), \quad (6.4.2)$$

где $W_n^{fire}(r, \varphi)$ в случае пожара в корпусах 1, 1А и в случае пожара при транспортировке по железной дороге имеют вид (6.4.3) и (6.4.4), соответственно:

$$W_n^{fire}(r, \varphi) = \sum_{i,j} P_{ij} \cdot \sum_k v_k \cdot U_k^{fire}(r, \varphi, M_{ij}^n), \quad (6.4.3)$$

Таблица 6.17. Результирующие характеристики источников химической опасности при гипотетическом пожаре.

Место	Стадия	Объект	M_{ij}	\overline{M}_{ij}	P_{ij}		
Ж/д	1	К-р 122, зоман	0,38	5,4	0,2251		
		К-р 122, ви-газ	1,82	26,0	0,0058		
		К-р 130, ви-газ	0,89	12,6	0,1149		
		К-р 152 зоман	0,77	11,1	0,0301		
		К-р 540 ви-газ	4,32	61,7	0,0033		
		К-р 880 ви-газ	1,14	16,3	0,0026		
Корпус 1	2,3,4	К-р 122, зоман	0,83	16,2	0,2264		
		К-р 122, ви-газ	3,98	78,1	0,0058		
		К-р 130, ви-газ	1,94	37,9	0,1155		
		К-р 152 зоман	1,69	33,2	0,0303		
	5,6	122, зоман	0,49	9,8	0,3244		
		122, ви-газ	2,38	46,6	0,0079		
		130, ви-газ	1,16	22,7	0,0755		
		152 зоман	1,01	19,8	0,0297		
		Корпус 1А	2,4	К-р 122, зоман	0,83	16,2	0,2543
				К-р 122, ви-газ	3,98	78,1	0,0066
К-р 152 зоман	1,69			33,2	0,0340		
К-р 540 ви-газ	3,15			61,7	0,0037		
К-р 880 ви-газ	0,83			16,3	0,0030		
3	К-р 122, зоман		0,83	16,2	0,2543		
	К-р 122, ви-газ		3,98	78,1	0,0066		
	К-р 152 зоман		1,69	33,2	0,0340		
	К-р 540 ви-газ		9,44	185,1	0,0037		
	К-р 880 ви-газ		2,49	48,9	0,0030		
5,6	122, зоман	0,20	4,0	0,3325			
	122, ви-газ	0,97	19,1	0,0081			
	152 зоман	0,41	8,1	0,0304			
	540 ви-газ	1,57	30,8	0,0170			
	880 ви-газ	0,42	8,2	0,0354			
Складское помещение объекта хранения		122, зоман	0,83	16,2	0,3086		
		122, ви-газ	3,98	78,1	0,0075		
		130, ви-газ	1,94	37,9	0,0719		
		152 зоман	1,69	33,2	0,0282		
		К-р 540 ви-газ	9,44	185,1	0,0158		
		К-р 880 ви-газ	2,49	48,9	0,0329		

$$W_n^{fire}(r, \varphi) = \int_L \mu^{fire}(\xi) \cdot \sum_{i,j} P_{ij} \cdot \sum_k v_k \cdot U_k^{fire}(r, \varphi, M_{ij}^n) d\xi. \quad (6.4.4)$$

Значение $\mu^{fire}(\xi)$ определяется аналогично аварийной ситуации «взрыв».

Таблица 6.18. Условные оценки аварийного риска при «пожаре» на объекте по уничтожению химического оружия.

	Ж/д		Корпус 1		Корпус 1А			Всего
	1	2	3,4	5,6	2	3,4	5,6	
Оценки риска при эвакуации в течение 1 часа								
W_G^{fire}	$1 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-21}$	$3 \cdot 10^{-21}$	0	$2 \cdot 10^{-23}$	$7 \cdot 10^{-10}$	0	$3 \cdot 10^{-12}$
Вклад, %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	
W_L^{fire}	$2 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^2$
Вклад, %	0,7	6,4	4,8	48,6	2,3	2,5	34,7	
Оценки риска при отсутствии эвакуации								
W_G^{fire}	$6 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{-5}$	0	$1 \cdot 10^{-7}$
Вклад, %	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	99,5	0,0	
W_L^{fire}	$8 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$
Вклад, %	0,8	7,0	5,2	49,7	2,3	2,2	32,8	
Предельные оценки риска								
W_G^{fire}	$6 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Вклад, %	0,3	20,7	15,5	46,1	1,7	5,2	10,5	
W_L^{fire}	$8 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$
Вклад, %	0,7	7,4	5,6	47,8	3,2	2,7	32,6	

Для объекта хранения оценка условного аварийного риска определяется выражением (6.4.2) при $m = 65$, где $W_n^{fire}(r, \varphi)$ в случае пожара на l -ом территориально выделенном объекте (складском помещении) представляется в виде:

$$W_n^{fire}(r, \varphi) = P_{0/fire} \cdot \sum_{i,j} P_{ij} \cdot P_{p0/fire} \cdot \sum_k v_k \cdot U_k^{fire}(r, \varphi, M_{ij}^n). \quad (6.4.5)$$

Значение условной вероятности возникновения химической опасности при пожаре в l -ом складском помещении $P_{0/fire} = (1/65)$.

Численные значения условного риска при пожаре на заводе по утилизации представлены в табл. 6.18, где W_L^{fire} , W_G^{fire} — интегральные по зоне поражения оценки условного аварийного и условного аварийного группового риска, соответственно.

Анализ структуры аварийного риска показывает, что химическая опасность наиболее существенна при пожаре в корпусах 1 и 1А на стадиях технологического процесса, когда химические боеприпасы не защищены от теплового воздействия стенками контейнера. Последствия пожара на стадиях 5,6 технологического процесса дают основной вклад в интегральные оценки условного аварийного риска. Оценки достигают значений порядка 10^3 , что соответствует радиусу зоны «достоверного» поражения человека при пожаре на заводе порядка 10 метров. Оценки

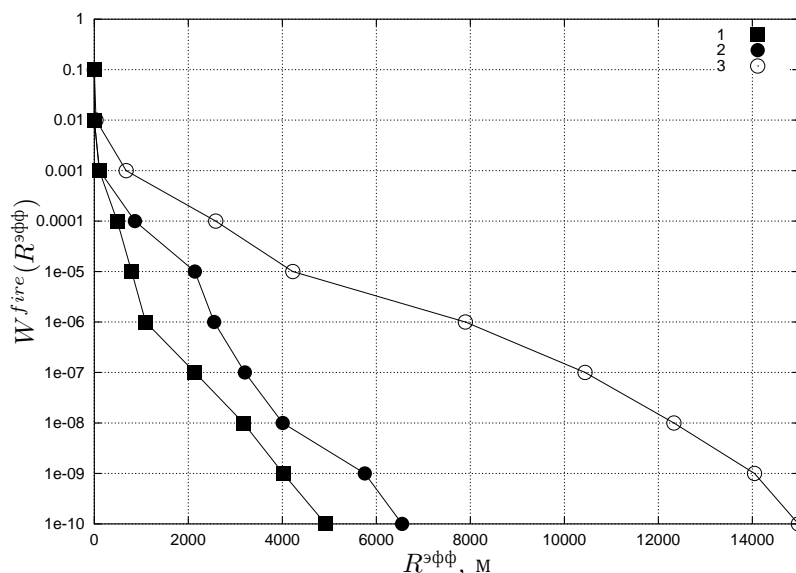


Рис. 6.5. Зависимость уровня условного локального риска от эффективного радиуса при пожаре на заводе: 1 — эвакуация населения в течении 1 часа; 2 — при отсутствии эвакуации; 3 — предельная оценка

условного аварийного риска, отвечающие последствиям пожара на 5,6 стадиях технологического процесса, незначительно изменяются, если была произведена эвакуация населения. В то же время численные значения предельного аварийного риска при пожаре на 5,6 стадиях отличаются на порядок в большую сторону.

Указанные обстоятельства обусловлены тем, что при пожаре в атмосферу выбрасывается перегретая примесь. За счет архимедовой силы отравляющие вещества, содержащиеся в перегретом выбросе, вовлекаются на большие высоты со значительными скоростями ветра. Как следствие, отравляющие вещества значительно быстрее достигают удаленных населенных пунктов. С другой стороны, перегрев примеси обуславливает более низкие значения приземных концентраций, и, следовательно, меньшие значения (чем при взрыве) интегрального локального риска. На рис. 6.5 приведены уровни условного локального риска и соответствующие им эффективные радиусы. Из рисунка видно, что максимальный уровень опасности вблизи источника значительно ниже, чем при «взрыве» (см. рис. 6.4).

Для населения химическая опасность при пожаре существенна при аварии в корпусе 1А (3,4 стадии) и на участке железной дороги. Численное значение условного группового риска при пожаре на 3,4 стадиях технологического процесса в корпусе 1А — $W_G^{\text{fire}} = 3 \cdot 10^{-5}$. Уровень опасности для населения, связанный с пожаром на заводе по утилизации, характеризуется величиной $W_G^{\text{fire}} = 1 \cdot 10^{-7}$. При эвакуации населения интегральная оценка условного группового риска при пожаре уменьшается до величины $W_G^{\text{fire}} = 3 \cdot 10^{-12}$. Предельная оценка достигает величины $W_G^{\text{fire}} = 2 \cdot 10^{-3}$.

Последствия пожара на заводе для жителей населенных пунктов, выраженные в значениях максимального количества жертв при аварии N_{let}^{max} , показывают, что максимальное значение $N_{let}^{max} \approx 26$ относится к населенному пункту Наумовка. Вероятность, что сложатся условия, отвечающие максимальному числу жертв при пожаре, $P = 3 \cdot 10^{-9}$. В случае эвакуации населения при пожаре на заводе максимально возможное количество жертв сокращается до значения $\approx 3 \cdot 10^{-3}$ ($P = 2 \cdot 10^{-8}$). Предельное значение максимального количества жертв при аварии относится к населенному пункту Петровское — $N_{let}^{max} \approx 100$ ($P = 4 \cdot 10^{-9}$).

Объект хранения. При пожаре на объекте хранения химических боеприпасов уровень химической опасности характеризуется следующими оценками:

- Интегральная оценка условного аварийного риска — $W_L^{fire} \approx 7,1 \cdot 10^3$. При эвакуации населения в течение часа — $W_L^{fire} \approx 2,2 \cdot 10^3$. Предельное значение — $W_L^{fire} \approx 1,8 \cdot 10^5$.
- Интегральная оценка условного группового риска — $W_G^{fire} = 5,1 \cdot 10^{-2}$. В случае эвакуации населения — $W_G^{fire} = 2,3 \cdot 10^{-3}$. Предельное значение — $W_G^{fire} = 2,3$.
- Максимальное число жертв среди населения — $N_{let}^{max} \approx 203$ (вероятность, что сложатся условия, приводящие к указанному числу жертв, $\approx 6,5 \cdot 10^{-9}$). При условии эвакуации населения в течение часа — $N_{let}^{max} \approx 73$ (вероятность $\approx 3,0 \cdot 10^{-10}$).

6.5. Прогноз последствий «пролива»

В данном разделе рассмотрены последствия пролива отравляющих веществ при несанкционированной разгерметизации химических боеприпасов.

6.5.1. Частота возникновения аварии. Частота пролива отравляющих веществ в процессе утилизации химических боеприпасов варьируется в широких пределах. Так, согласно технической документации, частота несанкционированного нарушения герметичности полости с ОВ вследствие технических неисправностей, ошибок обслуживающего персонала изменяется в пределах от $1,9 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹ на четвертой стадии технологического процесса до $1,6 \cdot 10^{-9}$ год⁻¹ на первой стадии. Если учесть частоту нарушения системы очистки вытяжного вентиляционного воздуха, которая по оценкам проектировщиков объекта составляет величину $\approx 10^{-4}$ год⁻¹, для частоты попадания отравляющих веществ в приземный слой атмосферы при аварийном проливе в производственном помещении приходим к оценке $\approx 10^{-10}$ год⁻¹. Здесь учтено, что система принудительной вентиляции дублирована, частота отказа переключения системы на резервную систему очистки воздуха $\approx 10^{-2}$ год⁻¹.

Масса отравляющих веществ в проливе ограничена массой вещества, вовлеченного в аварийный процесс. В данном случае это масса вещества в отдельном боеприпасе или в боеприпасах отдельного контейнера. Площадь зеркала разлива ограничена площадью поддона или поддонов. Для единицы оборудования, для отдельного боеприпаса или контейнера с боеприпасами площадь поддона величина ≈ 1 м².

Учитывая представленные данные по частотам аварийных процессов, приводящих к проливу отравляющих веществ, учитывая величины площадей проливов, можно полагать, что вклады в оценки аварийного риска от проливов при так называемых «проектных» авариях — незначительны. Действительно, выполненные оценки по модели, представленной в разделе 3.3, показали, что при проливе ОВ внутри производственных помещений объекта уничтожения химического оружия внутри ожидаемых значений значений массовых потоков на выходе из замкнутого пространства: зарин — 0,1-1,6 г/с, зоман — 0,2-1,0 г/с, ви-газ — 10^{-5} - 10^{-4} г/с.

Более значимы «запроектные» аварии. К запроектным авариям относятся аварии, связанные со значительными разрушениями. Обычно запроектные аварии случаются достаточно редко, однако защита от последствий запроектных аварий, особенно на этапе проектирования объекта, весьма затруднительна. Хотя граница между проектными и запроектными авариями точно не определена, принято считать (по крайней мере, для аварий, связанных с проливом токсичных веществ), что к запроектным авариям относятся аварии, приводящие к образованию больших площадей открытых поверхностей пролива. Именно запроектные аварии могут привести к попаданию в атмосферу больших объемов отравляющих веществ. Иницирующими событиями запроектных аварий являются такие события, как падение на производственный корпус метеорита или летательного аппарата, ураган, смерч, противоправные действия и т. д.

Среди списка иницирующих запроектную аварию событий значимыми с точки зрения последствий, являются лишь два события: противоправные действия и падение летательного аппарата. Остальные иницирующие события либо происходят с весьма малыми частотами, либо приводят к проливам, последствия которых незначительны. Например, при падении метеорита на завод по утилизации возможны весьма значительные разрушения, но частота такого события оценивается на уровне $\approx 1,84 \cdot 10^{-10}$ год⁻¹. Частота урагана в средней полосе России хотя и оценивается на уровне $\approx 5,0 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹, но для данного завода ураган не может привести к существенным последствиям: возможно разрушение трубопроводов и коммуникаций, но не помещений основного производства.

На этапе предварительного анализа целесообразно опустить из рассмотрения и последствия противоправных действий, если они не приводят к взрывам или пожарам. Действительно, хотя противоправное действие может привести к химической аварии, связанной с разгерметизацией боеприпасов, но в настоящее время не представляется возможным указать физический механизм несанкционированной разгерметизации химических боеприпасов (исключая ранее рассмотренные), который гипотетически приводил бы к образованию больших площадей разлива отравляющих веществ. Таким образом, в рамках предварительного анализа можно ограничиться прогнозом последствий пролива, инициированного падением летательного аппарата.

Частота падения летательного аппарата варьируется по разным оценкам в диапазоне 10^{-9} - $2,5 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹. В частности, первое значение частоты относится к средней по России частоте падения летательного аппарата на площадь в один гектар. Последнее значение отвечает верхней оценке частоты падения летательного аппарата на площадь, равную площади производственного корпуса. Данное

значение представлено в технической документации на завод по утилизации. Из сопоставления частот можно сделать вывод, что в районе размещения завода по утилизации предполагается более высокая интенсивность полетов летательных аппаратов, чем средняя интенсивность полетов над территорией России.

Событие падения летательного аппарата на железнодорожный состав, перевозящий химические боеприпасы, на этапе предварительного анализа можно опустить из рассмотрения, так как это событие характеризуется меньшей частотой и меньшей массой токсичного вещества, освободившейся при аварии. Следовательно, значимым, с точки зрения последствий, является событие падения летательного аппарата на производственный корпус завода. Значение частоты $P_{spill} \approx 5 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹ может быть использовано при прогнозировании последствий пролива в корпусах завода.

6.5.2. Параметры источника опасности. Оценка последствий падения летательного аппарата основана на сопоставлении энергий, выделяющихся при падении и при взрыве. Однако характер разрушения при падении, возможно, будет отличаться от характера разрушений при взрыве. Это связано с предположением о разрушении и падении железобетонного перекрытия, которое будет препятствовать разлету химических боеприпасов.

Энергия, которой обладает летательный аппарат (самолет), при падении на земную поверхность эквивалентна энергии, выделяющейся при взрыве, $\approx 100 - 200$ кг тринитротолуола. При соударении с бетонными перекрытиями производственных корпусов крылья и фюзеляж самолета поглотят большую часть энергии за счёт собственной деформации. Двигатель, благодаря своей компактности и большей плотности, подвергнется меньшему деформированию. Оценка энергии двигателя подающего самолета приводит к величине эквивалентной энергии взрыва ≈ 5 кг тринитротолуола.

Положим, что ≈ 60 % энергии двигателя и ≈ 90 % энергии падающего самолета будет затрачено на разрушение железобетонного перекрытия, на деформацию, нагрев и т. д.³ В этом случае, при падении четырехмоторного самолета на производственное помещение, энергия внесенная в помещение с химическими боеприпасами эквивалентна энергии, выделяющейся при взрыве $\approx 8 - 20$ кг тринитротолуола. При прогнозировании последствий пролива исходили из среднего значения энергетического эквивалента $E_0 = 14$ кг тринитротолуола. Предельное значение энергии падающего самолета эквивалентно взрыву $\bar{E}_0 \approx 200$ кг тринитротолуола.

Если допустить, что разрушения при падении летательного аппарата соответствуют разрушениям при взрыве, то для оценки массы отравляющих веществ, находящихся в разрушенных химических боеприпасах, можно воспользоваться алгоритмом, аналогичным алгоритму раздела 6.3.

³При оценке последствий падения самолета на объект по уничтожению ОВ в г. Аннистоне, шт. Алабама (США), было установлено, что 60-80% первоначальной кинетической энергии двигателя будет затрачено на разрушение железобетонного перекрытия. Причем только двигатель способен пробить железобетонное перекрытие и привести к разрушению боеприпасов [184].

Таблица 6.19. Характеристики источника опасности при проливе отравляющих веществ в результате падения летательного аппарата.

Место аварии	Калибр, мм	S_{ij} , м ²	$\overline{S_{ij}}$, м ²	Вероятность типа ОБ — P_{ij}		
				Зарин	Зоман	Ви-газ
Корпус 1	К-р 122	24	143	0,5287	0,2264	0,0058
	К-р 130	12	73	—	—	0,1155
	К-р 152	20	115	0,0932	0,0303	—
Корпус 1А	К-р 122	24	143	0,5938	0,2543	0,0066
	К-р 152	20	115	0,1047	0,0340	—
	К-р 540	111	654	—	—	0,0037
	К-р 880	150	880	—	—	0,0030
Складское помещение объекта хранения	122	24	144	0,4482	0,3086	0,0075
	130	11	66	—	—	0,0719
	152	19	110	0,0870	0,0282	—
	К-р 540	111	654	—	—	0,0158
	К-р 880	150	880	—	—	0,0329

Примем, что количество разрушенных при падении летательного аппарата химических боеприпасов пропорционально площади полусферы. Радиус полусферы отвечает расстоянию от эпицентра взрыва до точки, в которой выполняется условие разрушения боеприпаса за счет перепада давления на фронте ударной волны. Очевидно, что математическое ожидание значения массы отравляющих веществ, вытекающих из разрушенных при аварии химических боеприпасов, будет зависеть от типов боеприпасов.

Для оценки последствий пролива, образующегося при падении летательного аппарата на производственный корпус, положим, что вся жидкость из разрушенных боеприпасов будет растекаться по поверхности. Толщина слоя жидкости может быть оценена значением $5 \cdot 10^{-3}$ м в соответствии с таблицей 2.2. Это значение соответствует среднему значению толщины слоя при проливе на бетонную и гравийную поверхности. В результате, для площадей пролива S_{ij} в зависимости от типа боеприпаса приходим к данным, представленным в верхней части таблицы 6.19.

В таблице 6.19 также представлены площади пролива $\overline{S_{ij}}$, отвечающие предельным значениям энергии летательного аппарата при падении (энергетический эквивалент $\overline{E_0} \approx 200$ кг тринитротолуола).

Предполагалось, что боеприпасы защищены контейнером. Случай, когда химические боеприпасы в производственном корпусе находятся вне контейнеров приводит к более низким значениям риска, так как при этом уменьшается значение частоты и площади пролива за счет ограничения времени и количества боеприпасов при их нахождении вне контейнеров.

В этой же таблице собраны данные по вероятностям P_{ij} , отвечающих калибру боеприпаса и виду отравляющего вещества в разрушенных боеприпасах. Значения вероятностей оценивались по аналогии с оценкой, представленной в разделе 6.3.2. Они соответствуют данным таблицы 6.10 для случая контейнеров с боеприпасами, находящихся в корпусах завода по утилизации.

В соответствии с методологией прогнозирования последствий пролива отравляющих веществ, в области пролива выставляются граничные условия для уравнения переноса инертной примеси в приземном слое атмосферы — концентрация насыщенного пара.

6.5.3. Оценка уровня опасности.

Объект по утилизации. Условная оценка риска, связанная с проливом на заводе — $W^{spill}(r, \varphi)$, определяется выражением:

$$W^{spill}(r, \varphi) = \sum_{n=1}^2 0,5 \cdot W_n^{spill}(r, \varphi), \quad (6.5.1)$$

где оценки условного аварийного риска, связанные со проливом на n -ом территориально выделенном объекте (корпус 1 и корпус 1А), определяются выражениями:

$$W_n^{spill}(r, \varphi) = \sum_{i,j} P_{ij} \cdot \sum_k v_k \cdot U_k^{spill}(r, \varphi, S_{ij}^n). \quad (6.5.2)$$

В выражении (6.5.1) предполагалось, что падение летательного аппарата на каждый из корпусов объекта утилизации равновероятно.

На рис. 6.6 приведены уровни условного локального риска и соответствующие им эффективные радиусы. Уровень опасности для населения, связанный с аварийным проливом отравляющих веществ на заводе по утилизации, характеризуется данными, частично представленными в таблице 6.20.

Характеристики уровня опасности:

- Интегральная по зоне поражения оценка условного аварийного риска — $W_L^{spill} \approx 7 \cdot 10^4$. При условии эвакуации населения в течение часа значение

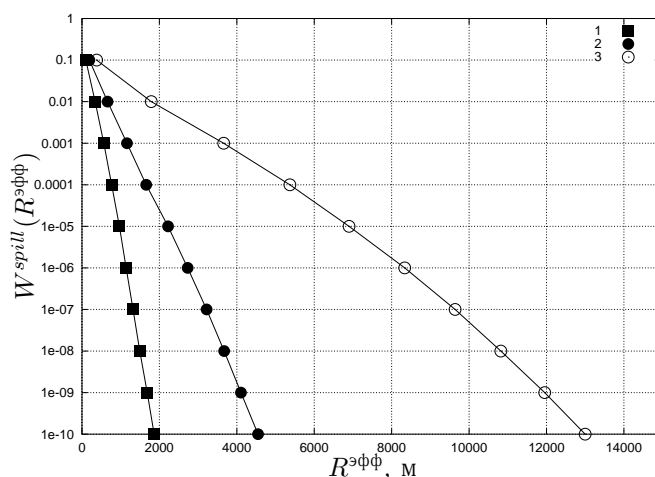


Рис. 6.6. Зависимость уровня условного локального риска от эффективного радиуса при проливе на заводе: 1 — эвакуация населения в течение 1 часа; 2 — при отсутствии эвакуации; 3 — предельная оценка

Таблица 6.20. Условные оценки аварийного риска при проливе на объекте по уничтожению химического оружия.

	Корпус 1	Корпус 1А	Всего
Оценки риска при эвакуации в течение 1 часа			
W_G^{spill}	0	0	0
W_L^{spill}	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$
Вклад, %	43	57	
Оценки риска при отсутствии эвакуации			
W_G^{spill}	$9 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-9}$
Вклад, %	17	83	
W_L^{spill}	$6 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^4$
Вклад, %	43	57	
Предельные оценки риска			
W_G^{spill}	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
Вклад, %	55	45	
W_L^{spill}	$4 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$
Вклад, %	47	53	

оценки уменьшается — $W_L^{spill} \approx 2 \cdot 10^4$. Предельное значение — $W_L^{spill} \approx 5 \cdot 10^5$.

- Интегральная оценка группового риска — $W_G^{spill} \approx 3 \cdot 10^{-9}$. При условии эвакуации населения оценка группового риска при проливе уменьшается до нуля. Предельное значение — $W_G^{spill} \approx 3 \cdot 10^{-2}$.

Объект хранения. Уровень опасности при аварийном проливе на объекте хранения может характеризоваться выражением (6.5.1) при $m = 65$. Характеристики источника химической опасности при аварии — площадь пролива S_{ij} , предельное значение площади пролива \bar{S}_{ij} , а также значения вероятностей P_{ij} , отвечающие калибру химического боеприпаса и виду отравляющего вещества в разрушенном боеприпасе, — представлены в нижней части таблицы 6.19. При расчете вероятностей использованы те же алгоритмы, что и в разделе 6.3.3.

Численные характеристики уровня опасности при проливе отравляющих веществ в одном из хранилищ арсенала имеют значения:

- Интегральная оценка условного аварийного риска — $W_L^{spill} \approx 7 \cdot 10^4$. При условии эвакуации населения в течение часа — $W_L^{spill} \approx 2 \cdot 10^4$. Предельное значение — $W_L^{spill} \approx 4 \cdot 10^5$.
- Интегральная оценка условного группового риска — $W_G^{spill} \approx 1,3 \cdot 10^{-1}$. При условии эвакуации населения в течение часа — $W_G^{spill} \approx 3,4 \cdot 10^{-3}$. Предельное значение — $W_G^{spill} \approx 3,15$.
- Максимальное число жертв среди населения — $N_{let}^{max} \approx 91$ (вероятность, что сложатся условия, приводящие к указанному числу жертв, $\approx 7,9 \cdot 10^{-9}$). При условии эвакуации населения в течение часа — $N_{let}^{max} \approx 25$ (вероятность $\approx 6,9 \cdot 10^{-9}$).

6.6. Оценки аварийного риска

Характеристики уровня потенциальной опасности, порождаемого авариями на объектах по утилизации и хранению боевых отравляющих веществ, представлены в таблицах 6.21 и 6.22. В таблице 6.21 для завода по утилизации выделены вклады в общий уровень опасности от аварий различных типов: «взрыв» «пожар» и «пролив». Более детально соотношения между последствиями аварий различных типов представлены в виде $F-N$ -кривых на рисунке 6.7. $F-N$ -кривые представлены для случая с отсутствием эвакуации населения для объектов уничтожения и хранения. Напомним, что $F-N$ -кривая есть зависимость кумулятивной частоты $F(N)$ превышения определенного числа жертв (N) в результате потенциальной аварии.

Как следует из представленных данных, определяющий вклад в оценки риска аварий на заводе по утилизации вносят последствия взрыва: вклад последствий взрыва в локальный риск составляет $\approx 80\%$; в групповой риск — более 95% . Указанное обстоятельство иллюстрирует рис. 6.7 а), на котором кривая для взрыва практически сливается с итоговой кривой.

Последнее связано с распределением численности населения относительно места аварии. Так как ближайший от завода по утилизации населенный пункт расположен на расстоянии более четырех километров, то токсичные вещества, попадающие в атмосферу при авариях на заводе, рассеиваются в атмосфере, не достигая мест проживания людей. Рассеяние в атмосфере особенно существенно для относительно небольших количеств токсичных веществ, которые характерны для выбросов при химических авариях, связанных с пожаром и проливом.

На рис. 6.8 приведена схема местности с нанесенными на нее контурами локального риска на объектах по уничтожению и хранению химического оружия.

Таблица 6.21. Характеристики уровня опасности, связанной с заводом по утилизации боевых отравляющих веществ.

z	P_z	Групповой риск			Локальный риск		
		W_G^z	$P_z \cdot W_G^z$	Вклад, %	W_L^z	$P_z \cdot W_L^z$	Вклад, %
Эвакуация населения в течение 1 часа							
«Взрыв»	$5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-12}$	99,9	$3 \cdot 10^3$	1,44	85
«Пожар»	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-15}$	0,1	$3 \cdot 10^2$	0,17	10
«Пролив»	$5 \cdot 10^{-6}$	0	0	0,0	$2 \cdot 10^4$	0,09	5
Всего		$R_G = 1 \cdot 10^{-12}$			$R_L = 1,7$		
Без эвакуации населения							
«Взрыв»	$5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-8}$	99,7	$6 \cdot 10^3$	3,11	78
«Пожар»	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-11}$	0,3	$1 \cdot 10^3$	0,53	14
«Пролив»	$5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-14}$	0,0	$6 \cdot 10^4$	0,33	8
Всего		$R_G = 2 \cdot 10^{-8}$			$R_L = 4,0$		
Предельные оценки							
«Взрыв»	$5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-5}$	96,2	$2 \cdot 10^5$	77,76	91
«Пожар»	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$	3,3	$1 \cdot 10^4$	5,45	6
«Пролив»	$5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-7}$	0,5	$5 \cdot 10^5$	2,30	3
Всего		$R_G = 3 \cdot 10^{-5}$			$R_L = 85,5$		

Таблица 6.22. Характеристики уровня опасности объектов по утилизации и хранению отравляющих веществ (X — без эвакуации, $X_{t=1}$ — при условии эвакуации населения в течение часа, \bar{X} — предельные значения).

	Объект утилизации			Объект хранения		
	$X_{t=1}$	X	\bar{X}	$X_{t=1}$	X	\bar{X}
W_G^{blast}	$3 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	3
W_L^{blast}	$3 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^5$
N_{let}^{blast}	0	27	995	114	495	7227
P_{let}^{blast}		$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-9}$
W_G^{fire}	$3 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$	2
W_L^{fire}	$3 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^5$
N_{let}^{fire}	0	26	100	73	203	6012
P_{let}^{fire}		$3 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$7 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-10}$
W_G^{spill}	0	$3 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-1}$	3
W_L^{spill}	$2 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^5$
N_{let}^{spill}	0	$2 \cdot 10^{-4}$	38	25	91	427
P_{let}^{spill}		$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-9}$	$8 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-9}$
R_G	$1 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-3}$
R_L	2	4	86	4	11	207

Интегральная оценка аварийного группового риска от завода по утилизации составляет $R_G \approx 2 \cdot 10^{-8}$. С учетом эвакуации населения численное значение группового риска понижается до величины $R_G \approx 1 \cdot 10^{-12}$. Предельное значение риска — $R_G \approx 3 \cdot 10^{-5}$. Если учесть, что общество обычно не возражает против опасности, характеризуемой значением риска на уровне порядка 10^{-5} — 10^{-7} , то можно сделать вывод о приемлемости уровня опасности, порождаемой заводом для населения, так как оценки группового риска укладываются в заданный диапазон. Даже предельное значение группового риска по порядку величины не выходит за допустимый интервал значений.

Напомним, что все расчеты характеристик уровня опасности велись относительно населения, но не персонала, работающего на заводе. Уровень опасности для персонала может быть охарактеризован интегральными оценками аварийного риска. Интегральная оценка аварийного риска, связанного с заводом по утилизации — $R_L \approx 4$. Предельное значение — $R_L \approx 86$.

Результаты прогнозирования позволяют сопоставить по уровню потенциальной опасности объекты по утилизации и хранению химического оружия (табл. 6.22, рис. 6.7 и 6.8).

Итоги сопоставления не в пользу объекта хранения. Действительно, интегральная оценка аварийного группового риска, связанная с объектом хранения, $R_G \approx 8 \cdot 10^{-5}$. Эвакуация населения незначительно уменьшает значение оценки до величины $R_G \approx 1 \cdot 10^{-5}$. Предельное значение группового риска — $R_G \approx 3 \cdot 10^{-3}$. Интегральные оценки аварийного группового риска по порядку величины укладываются в интервал приемлемых значений. Исключение составляет предельная

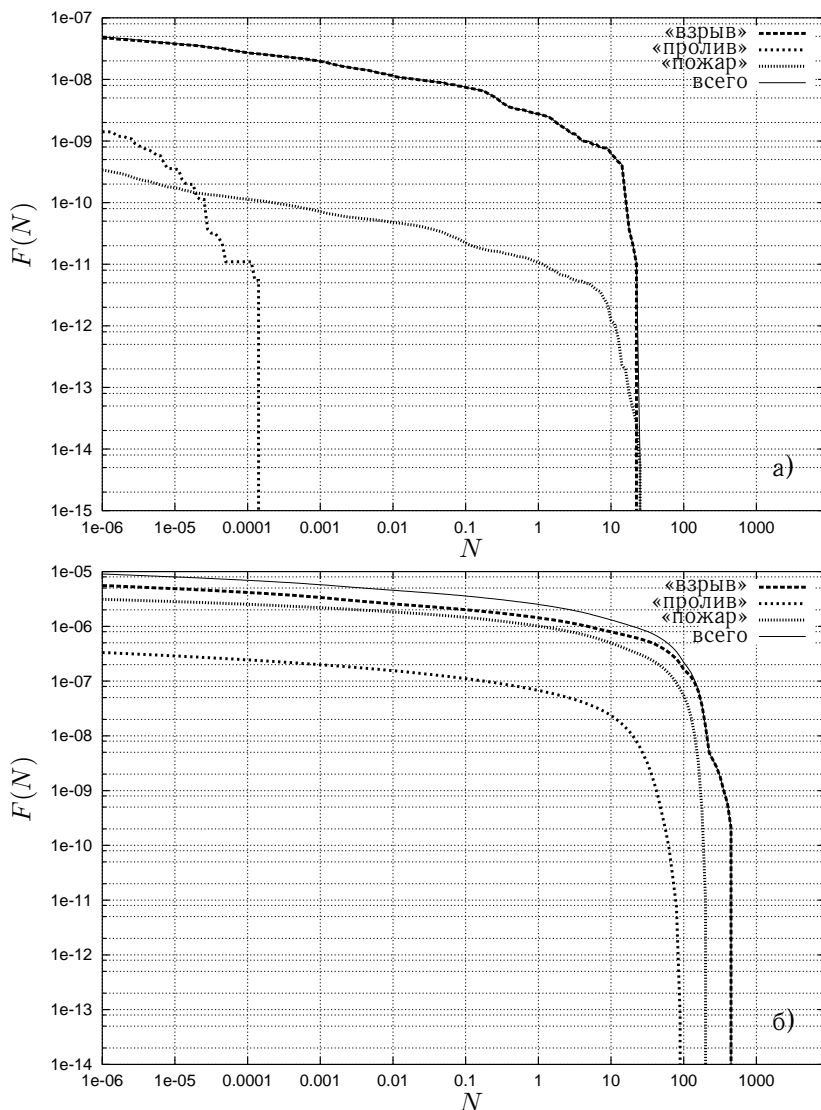


Рис. 6.7. F - N -кривые для случая без эвакуации населения: а) завод; б) арсенал

оценка риска. Но, как указывалось ранее, значения предельного риска можно рассматривать как верхний предел. Причем в настоящее время не установлены физические механизмы аварий, при которых этот предел может быть достигнут.

Незначительное уменьшение интегральных оценок группового риска при эвакуации населения иллюстрирует недостаточную эффективность эвакуации в течение одного часа. Это объясняется близким расположением объекта хранения к населенным пунктам.

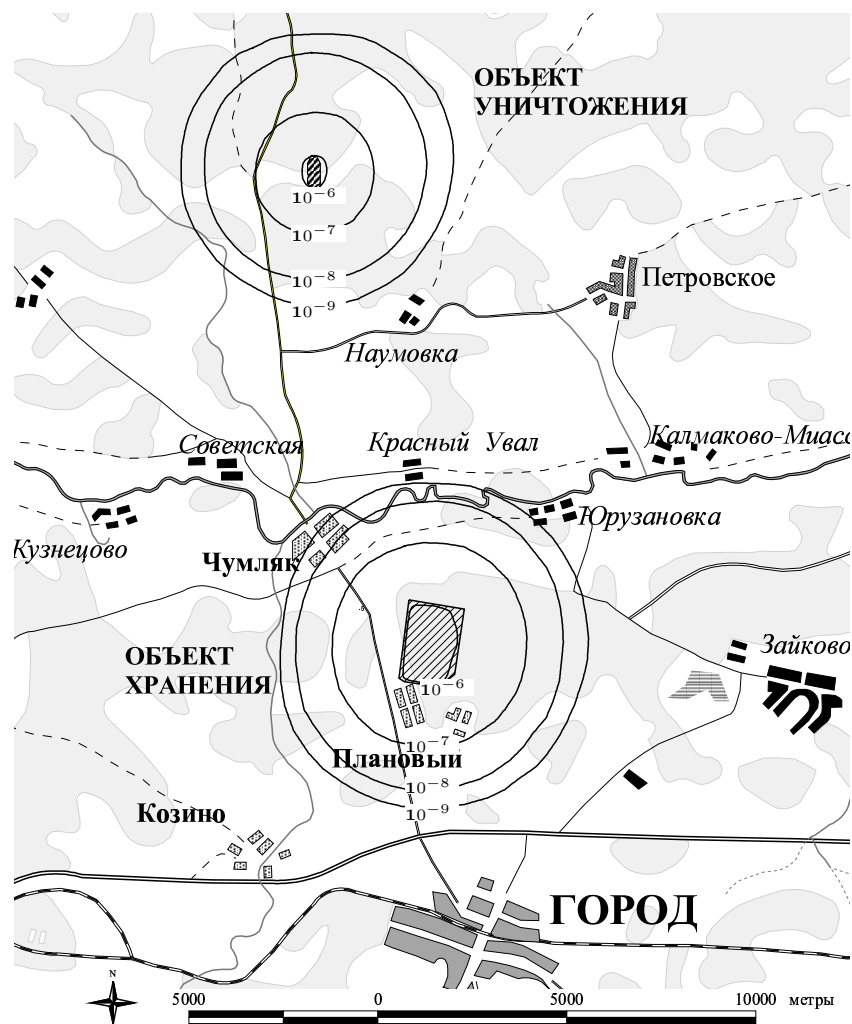


Рис. 6.8. Уровни локального риска от объектов по уничтожению и хранению химического оружия

Относительно высокие числа максимального количества потерь среди населения при аварии на заводе по утилизации ($N_{let}^{max} \approx 27$) и на объекте хранения ($N_{let}^{max} \approx 500$), если химическая авария все-таки будет иметь место, показывают важность принятия мер, направленных на обеспечение безопасности функционирования объектов. Определенный запас «прочности» заложен в технологиях хранения и утилизации боевых отравляющих веществ. Об этом свидетельствуют значения вероятностей достижения максимальных количеств потерь при аварии, порядок величин которых $10^{-7} - 10^{-9}$.

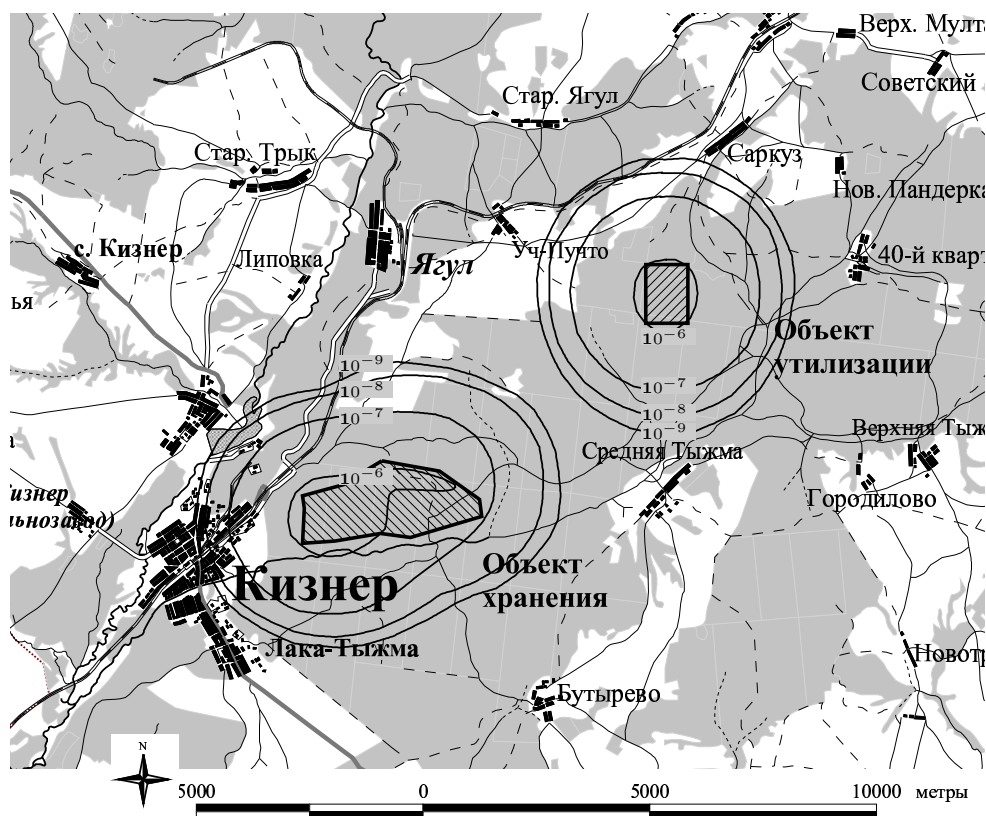


Рис. 6.9. Схема расположения объектов по хранению и уничтожению химического оружия в Кизнерском районе Удмуртии. Уровни локального риска

6.7. Влияние места размещения объекта

На территории Удмуртской Республики, в непосредственной близости от поселка Кизнер (население 10,4 тысяч человек), хранится около двух миллионов химических боеприпасов ствольной и реактивной артиллерии. Общий объем отравляющих веществ в химических боеприпасах составляет 5880 тонн (зарин — 70%, зоман — 23%, ви-газ — 5%). Один из вариантов уничтожения химического оружия, размещенного в Кизнерском районе Удмуртии, предусматривает строительство завода по утилизации боевых отравляющих веществ вблизи арсенала.

В данном разделе представлены результаты прогноза уровня опасности, порождаемой объектами с наличием боевых отравляющих веществ, при следующих допущениях: завод по утилизации фосфорорганических боевых отравляющих веществ размещен вблизи объекта хранения (рис. 6.9), номенклатура химических боеприпасов, подлежащих утилизации, отвечает номенклатуре боеприпасов Кизнерского арсенала.

Таблица 6.23. Масса M_{ij} и вероятность P_{ij} типа отравляющего вещества, поступившего в атмосферу при гипотетическом взрыве на объектах Удмуртии.

Место аварии	Стадия	Калибр, мм	M_{ij} , кг	$\overline{M_{ij}}$, кг	Вероятность типа ОВ — P_{ij}			
					Зарин	Зоман	Ви-газ	
Ж/д	1	К-р 122	1,26	25,2	0,1009	0,3566	0,1122	
		К-р 130	0,54	10,7	0,0645	—	0,0177	
		К-р 140	1,19	23,8	0,0375	—	—	
		К-р 152	1,00	19,9	0,0492	0,1747	—	
		К-р 220	5,66	113,1	—	0,0533	—	
		К-р 240	1,81	36,3	0,0334	—	—	
Корпус 1	2,3,4	К-р 122	1,26	25,2	0,1105	0,3904	0,1229	
		К-р 130	0,54	10,7	0,0707	—	0,0194	
		К-р 140	1,19	23,8	0,0411	—	—	
		К-р 152	1,00	19,9	0,0538	0,1912	—	
	5,6	122	1,13	22,7	0,0944	0,3679	0,1769	
		130	0,61	12,2	0,0581	—	0,0139	
		140	1,24	24,9	0,0465	—	—	
		152	1,19	23,7	0,0581	0,1843	—	
	Корпус 1А	2,3,4	К-р 122	1,26	25,2	0,1146	0,4051	0,1275
			К-р 152	1,00	19,9	0,0559	0,1984	—
			К-р 220	5,66	113,1	—	0,0605	—
			К-р 240	1,81	36,3	0,0379	—	—
5,6		122	1,13	22,7	0,0853	0,3325	0,1598	
		152	1,19	23,7	0,0525	0,1666	—	
		220	6,10	122,0	—	0,1626	—	
		240	2,40	47,9	0,0407	—	—	
Складское помещение объекта хранения		122	1,13	22,7	0,1142	0,4037	0,1271	
		130	0,61	12,2	0,0730	—	0,0200	
		140	1,24	24,9	0,0425	—	—	
		152	1,19	23,7	0,0417	0,1483	—	
		220	6,10	122,0	—	0,0181	—	
		240	2,40	47,9	0,0113	—	—	

Характеристики источников химической опасности. Результирующие характеристики источников химической опасности при гипотетических авариях на объектах с химическим оружием в Кизнерском районе Удмуртии представлены в таблицах 6.23 - 6.25.

Как и в предшествующих разделах, анализу подлежали наиболее значимые по последствиям аварийные ситуации, связанные с «взрывом», «пожаром», «проливом». Источник химической опасности при аварии характеризуется: массой токсичного вещества, попавшего в атмосферу — M_{ij} , или площадью разлива — S_{ij} , с которой происходит испарение токсичного вещества; соответствующими предельными значениями — $\overline{M_{ij}}$ и $\overline{S_{ij}}$; вероятностями типов отравляющих веществ — P_{ij} .

Таблица 6.24. Результирующие характеристики источников химической опасности при пожаре на объектах Удмуртии.

Место	Стадия	Калибр, мм	m_{ij}	\overline{m}_{ij}	P_{ij}	
Ж/д	1	К-р 122, зоман	0,38	5,40	0,3566	
		К-р 122, ви-газ	1,82	26,03	0,1122	
		К-р 130, ви-газ	0,89	12,65	0,0177	
		К-р 152 зоман	0,77	11,05	0,1747	
		К-р 220 зоман	2,63	37,54	0,0533	
Корпус 1	2,3,4	К-р 122, зоман	0,83	16,2	0,3904	
		К-р 122, ви-газ	3,98	78,1	0,1229	
		К-р 130, ви-газ	1,94	37,9	0,0194	
		К-р 152 зоман	1,69	33,2	0,1912	
	5,6	122, зоман	0,49	9,8	0,3679	
		122, ви-газ	2,38	46,6	0,1769	
		130, ви-газ	1,16	22,7	0,0139	
		152 зоман	1,01	19,8	0,1843	
	Корпус 1А	2,4	К-р 122, зоман	0,83	16,2	0,4051
			К-р 122, ви-газ	3,98	78,1	0,1275
			К-р 152 зоман	1,69	33,2	0,1984
			К-р 220 зоман	3,74	73,4	0,0605
3		К-р 122, зоман	0,83	16,2	0,4051	
		К-р 122, ви-газ	3,98	78,1	0,1275	
		К-р 152 зоман	1,69	33,2	0,1984	
		К-р 220 зоман	5,74	112,6	0,0605	
5,6		122, зоман	0,20	4,0	0,3325	
		122, ви-газ	0,97	19,1	0,1598	
		152 зоман	0,41	8,1	0,1666	
		220 зоман	2,81	55,0	0,1626	
Складское помещение объекта хранения		122, зоман	0,83	16,2	0,4037	
		122, ви-газ	3,98	78,1	0,1271	
		130, ви-газ	1,94	37,9	0,0200	
		152 зоман	1,69	33,2	0,1483	
		220 зоман	5,74	112,6	0,0181	

Вероятность типа отравляющего вещества в химическом боеприпасе определяется с учетом количества боеприпасов каждого вида, которые гипотетически могут находиться в месте аварии.

Данные, представленные в таблицах 6.23 — 6.25, отвечают результатам расчетов по алгоритмам, описанным в соответствующих разделах 6.3, 6.4 и 6.5. При этом была использована информация по химическим боеприпасам (калибр, наполнение, количество), отвечающая Кизнерскому арсеналу. Предполагалось сохранение технологии утилизации и основных технических решений, принятых по заводу уничтожения химического оружия.

Таблица 6.25. Площади проливов — S_{ij} и вероятности P_{ij} типов отравляющих веществ при проливе на объектах Удмуртии.

Место аварии	Калибр, мм	S_{ij} , м ²	$\overline{S_{ij}}$, м ²	Вероятность типа ОБ — P_{ij}		
				Зарин	Зоман	Ви-газ
Корпус 1	К-р 122	24	143	0,1105	0,3904	0,1229
	К-р 130	12	73	0,0707	—	0,0194
	К-р 140	21	122	0,0411	—	—
	К-р 152	20	115	0,0538	0,1912	—
Корпус 1А	К-р 122	24	143	0,1146	0,4051	0,1275
	К-р 152	20	115	0,0559	0,1984	—
	К-р 220	83	488	—	0,0605	—
	К-р 240	32	188	0,0379	—	—
Складское помещение объекта хранения	122	24	144	0,1142	0,4037	0,1271
	130	11	66	0,0730	—	0,0200
	140	26	155	0,0425	—	—
	152	19	110	0,0417	0,1483	—
	220	99	584	—	0,0181	—
	240	36	212	0,0113	—	—

Сопоставление результатов прогнозирования. Итоговые результаты расчетов риска от объектов на территории Удмуртии представлены в таблицах 6.26 - 6.27. Соответствующие уровни локального риска представлены на рис. 6.9, на рис 6.10 приведены итоговые $F-N$ -кривые для случая без эвакуации населения.

Таблица 6.26. Характеристики уровня опасности от объекта уничтожения химического оружия на территории Удмуртии.

z	P_z	Групповой риск			Локальный риск		
		W_G^z	$P_z \cdot W_G^z$	Вклад, %	W_L^z	$P_z \cdot W_L^z$	Вклад, %
Эвакуация населения в течение 1 часа							
«Взрыв»	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$7 \cdot 10^{-17}$	0,0	$6 \cdot 10^3$	2,81	85
«Пожар»	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-9}$	100,0	$9 \cdot 10^2$	0,44	13
«Пролив»	$5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-15}$	0,0	$2 \cdot 10^4$	0,08	2
Всего				$R_G = 6 \cdot 10^{-9}$			$R_L = 3,34$
Без эвакуации населения							
«Взрыв»	$5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-10}$	4,6	$1 \cdot 10^4$	7,41	79
«Пожар»	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-9}$	93,6	$3 \cdot 10^3$	1,68	18
«Пролив»	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-10}$	1,8	$6 \cdot 10^4$	0,27	3
Всего				$R_G = 6 \cdot 10^{-9}$			$R_L = 9,37$
Предельные оценки							
«Взрыв»	$5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-5}$	73,4	$2 \cdot 10^5$	118,5	86
«Пожар»	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-5}$	24,4	$4 \cdot 10^4$	18,28	13
«Пролив»	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$9 \cdot 10^{-7}$	2,3	$3 \cdot 10^5$	1,71	1
Всего				$R_G = 4 \cdot 10^{-5}$			$R_L = 138,5$

Таблица 6.27. Характеристики уровня опасности от объектов по утилизации и хранению отравляющих веществ на территории Удмуртии (X — без эвакуации, $X|_{t=1}$ — при условии эвакуации населения в течение часа, \bar{X} — предельные значения).

	Объект утилизации			Объект хранения		
	$X _{t=1}$	X	\bar{X}	$X _{t=1}$	X	\bar{X}
W_G^{blast}	$1 \cdot 10^{-13}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-1}$	9,84
W_L^{blast}	$6 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^5$
N_{let}^{blast}	0	0	337	15	1030	5210
P_{let}^{blast}			$2 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$7 \cdot 10^{-9}$	$8 \cdot 10^{-9}$
W_G^{fire}	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-1}$	17,83
W_L^{fire}	$9 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^5$
N_{let}^{fire}	41	41	339	111	1120	5540
P_{let}^{fire}	$5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-9}$
W_G^{spill}	$3 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-2}$	10,61
W_L^{spill}	$2 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^5$
N_{let}^{spill}	0	1	181	88	1480	3360
P_{let}^{spill}		$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$
R_G	$6 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-2}$
R_L	3	9	139	5	14	309

Из сопоставления характеристик источников химической опасности на объектах с боевыми отравляющими веществами (см. таблицы 6.10, 6.17, 6.19 и 6.23 - 6.25) следует, что изменение номенклатуры химических боеприпасов не вносит принципиальных изменений в результаты прогнозирования характеристик источников. Утверждение справедливо для химических боеприпасов, хранящихся на арсеналах ствольной и реактивной артиллерии, размещенных в Курганской области и в Удмуртской Республике. Поэтому и оценки локального риска, независимо от мест размещения объектов, не имеют существенных различий.

Действительно, интегральные оценки условного риска при авариях на объектах Удмуртии, представленные в таблицах 6.26 — 6.27, незначительно отличаются от соответствующих значений при авариях на объектах Курганской области (таблицы 6.21 — 6.22).

Здесь необходимо подчеркнуть, что хотя итоговые оценки локального риска и не имеют существенных различий, структура риска для этих объектов различна. Основной вклад в групповой риск от объектов Курганской области вносит условная авария «взрыв» с участием боевых частей химических ракет, начиненных чрезвычайно токсичным ви-газом, что обусловлено довольно значительной массой отравляющего вещества, содержащегося в указанных боеприпасах. На объектах в Кизнерском районе основной вклад в групповой риск приходится на долю «пожара» с участием снарядов реактивной артиллерии, начиненных зоманом. Указанные обстоятельства требуют пояснения.

Таблица 6.28. Значения характеристик аварийной опасности от объектов с боевыми отравляющими веществами, размещенных в двух районах России (X — без эвакуации населения, $X|_{t=1}$ — при условии эвакуации населения в течение часа, \bar{X} — предельные значения).

Характеристика	Объект по утилизации		Объект хранения	
	Курганская область	Удмурская Республика	Курганская область	Удмурская Республика
$R_G _{t=1}$	$1 \cdot 10^{-12}$	$6 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-7}$
R_G	$2 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-9}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$
\bar{R}_G	$3 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
$R_L _{t=1}$	2	3	4	5
R_L	4	9	10	14
\bar{R}_L	90	100	200	300
$N_{let} _{t=1}$	0	41	114	111
N_{let}	27	41	495	1480
\bar{N}_{let}	995	574	7227	5540

Анализ таблиц 6.23 и 6.24 с характеристиками источников токсической опасности показывает, что массы отравляющих веществ, выбрасываемых в атмосферу при взрыве на стадиях 3,4 и при пожаре на стадиях 5,6 в корпусе 1А (именно эти ситуации вносят доминирующий вклад в условные оценки группового риска) сопоставимы. Однако, как указывалось ранее (см. раздел 6.4.3), при пожаре механизм дисперсии примеси в атмосфере таков, что аварийное воздействие передается удаленным реципиентам быстрее, чем, например, при взрыве или проливе (приземные источники). Именно это и обуславливает значительный вклад «пожара» в групповой риск от Кизнерского объекта по уничтожению химического оружия.

Результаты сопоставления уровней аварийной опасности, связанных с объектами по хранению и утилизации химических боеприпасов ствольной и реактивной артиллерии, размещенных в двух регионах России (табл. 6.28), показывают что потенциальная опасность, обусловленная имманентными характеристиками техногенных объектов совпадает. Вывод следует из сопоставления значений интегральных оценок аварийного риска R_L для объектов по хранению и утилизации, представленных в таблице 6.28, которые совпадают с точностью до порядка. Это означает, что персонал, обслуживающий технологический процесс хранения и утилизации боевых отравляющих веществ независимо от местоположения объекта подвергается примерно одинаковой опасности.

Сопоставление значений интегральных оценок группового риска R_G при авариях на объектах по хранению и утилизации боевых отравляющих веществ, размещенных в разных регионах, показывает некоторое различие в уровнях опасности для населения. Так, уровень аварийной опасности, связанный с арсеналом хранения, размещенным в Удмуртии выше, чем уровень опасности, порождаемый арсеналом в Курганской области. Но можно заметить, что эвакуация населения при аварии более эффективна в Удмуртии. Это связано как с различиями в плотностях распределения населения, так и с различиями в структуре аварийного риска.

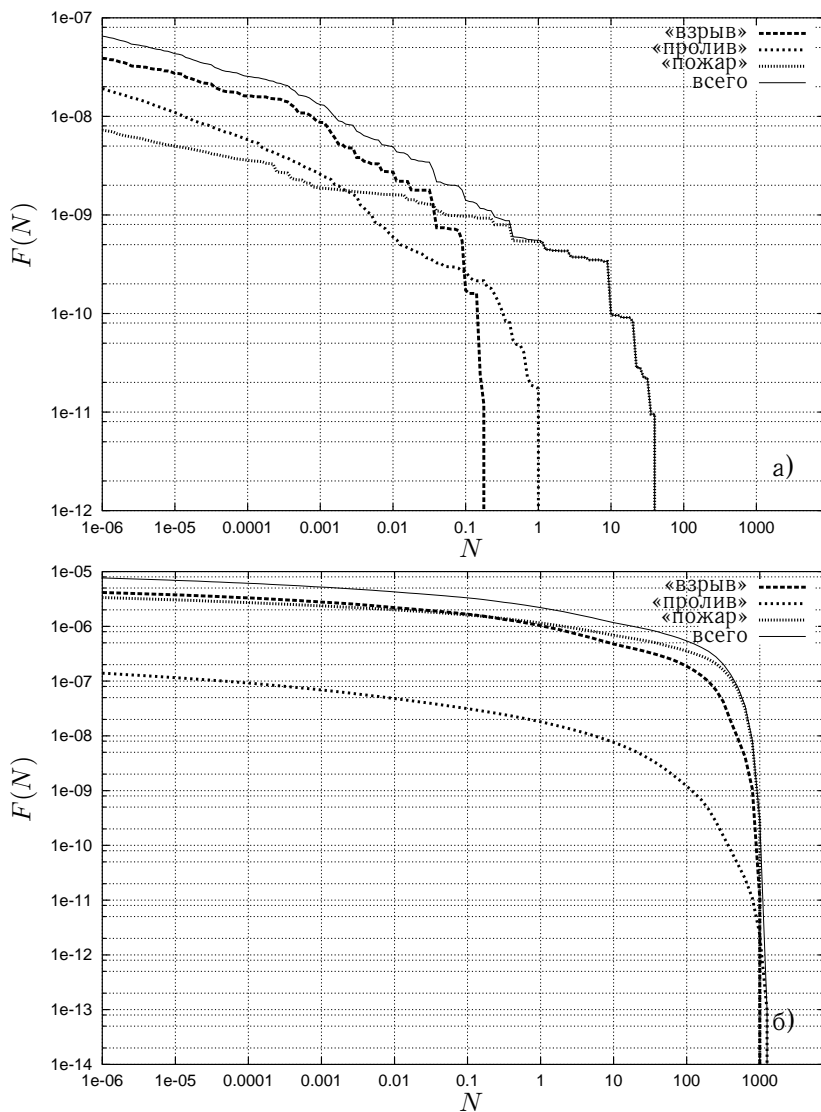


Рис. 6.10. F - N -кривые для случая без эвакуации населения для объектов на территории Удмуртии: а) завод; б) арсенал

Для объекта уничтожения химического оружия, с точки зрения уровня опасности для населения, некоторое предпочтение может быть отдано Курганской области. Кроме того, для объекта по утилизации в Удмуртии понижается эффективность эвакуации населения. Указанные тенденции отмечаются и при анализе максимального количества потерь среди населения N_{let} , если авария и условия, отвечающие максимальному ущербу имели место.

6.8. Заключительные замечания

При количественном анализе аварийного риска, связанного с объектами по хранению и утилизации боевых отравляющих веществ, возникают следующие два вопроса. Как будут меняться оценки риска с течением времени? Какова точность прогноза численных значений риска?

По первому вопросу. Химическая авария возникает при условии, что в материале, из которого изготовлены емкости для хранения отравляющих веществ, с течением времени накопилось столько дефектов (микротрещин), что материал не выдерживает нагрузок, воздействующих на химический боеприпас. Причины возникновения дефектов в материале боеприпаса могут быть самые различные, например, изменение температуры окружающей среды. Это так называемое старение материала с течением времени увеличивается, что приводит к увеличению риска. Но, по крайней мере, до настоящего времени динамика роста значений риска, вследствие старения материала, была незначительна. В будущем фактор старения материала может стать определяющим.

Действительно, если со временем материал химических боеприпасов будет «ослаблен», то уже малые воздействия на химические боеприпасы могут привести к их разрушению и, как следствие, к химической аварии. Таким образом, оценки риска, отвечающие последствиям аварий с химическими боеприпасами, имеют тенденцию к возрастанию. Незначительное увеличение значений риска в настоящее время в будущем может перерасти в катастрофическое.

Далее относительно точности прогнозирования. Первый, определяющий точность прогнозирования фактор, — степень адекватности физико-математических моделей возникновения и распространения химической опасности реальным процессам при аварии. Разработка моделей опирается на экспериментальные данные: поведение химических боеприпасов при тепловом воздействии; поведение под нагрузкой и т. д. Степень адекватности определяется по результатам тестирования моделей. Второй фактор — степень полноты информации о номенклатуре химических боеприпасов, об условиях хранения и утилизации, об использованном оборудовании и т. д. Третий фактор — степень достоверности существующей статистической информации по инициирующим аварию событиям в прошлом. И, конечно, определенную погрешность вносит сам процесс расчета риска. Точность прогнозирования уровня опасности не превышает точности каждой из компонент, входящих в расчет. Поэтому достоверность прогноза, достигнутая в данной работе, не может превышать степени достоверности исходной информации. По мере уточнения каждого фактора, степень достоверности прогноза может быть увеличена.

В заключение отметим, что прогноз оценок аварийного риска базируется на существующем уровне знаний. Поэтому допускается гипотетическая возможность существования аварийных сценариев, которые на данном этапе научных знаний остались не рассмотренными. В принципе, эта возможность может привести к проявлению новых, ранее не рассмотренных, механизмов возникновения источников аварийной опасности. Такая возможность в случае химических аварий значима для высокотоксичных мало изученных веществ. Существующему уровню знаний отвечают и характеристики источников аварийной опасности. Цепочки химических

реакций, идущие в окружающей среде с участием веществ, освобождаемых при аварии, могут привести к возникновению новых высокотоксичных веществ.

Не преувеличивая значимость этой опасности, мы тем не менее должны подчеркнуть два момента: во-первых, оценки аварийного риска отвечают существующему уровню знаний, во-вторых, прогноз уровня опасности, выполненный в данной работе, ограничен анализом краткосрочных (несколько часов) последствий гипотетических аварий.

Предварительная оценка уровня опасности от проектируемого комплекса по утилизации ракетных двигателей твердого топлива

Прогноз уровня опасности, порождаемой проектируемым объектом, — наиболее эффективное приложение теории аварийного риска к решению проблем обеспечения безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей природной среды. В этом случае еще на стадии проектирования выявляются наиболее существенные, с точки зрения последствий, аварийные ситуации, что позволяет внести необходимые изменения в проект. В конечном счете, это приводит к снижению стоимости строительства при сохранении приемлемого уровня безопасности объекта.

Отметим, что вопросы безопасности были в центре внимания при проектировании комплекса утилизации. Однако как в «Технико-экономическом обосновании» (ТЭО) на строительство комплекса по утилизации, так и в «Заключении экспертизы промышленной безопасности на ТЭО», количественному прогнозу последствий аварий не уделено достаточного внимания. Возможно, эта часть проекта будет представлена в «Декларации безопасности».

Проектируемый комплекс предназначен для ликвидации и утилизации зарядов ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ). В общей сложности утилизации подлежат 916 двигателей. Общая масса уничтожаемого твердого ракетного топлива составляет около 17500 тонн.

Технология утилизации предполагает сжигание зарядов ракетных двигателей в специальной герметичной камере с последующей очисткой газового потока. Процесс сжигания продолжается несколько минут. Парогазовый поток проходит три стадии очистки от примеси и выводится в атмосферу через трубу рассеивания. В атмосферу поступает угарный газ, остатки оксида алюминия (1,5%) и хлористого водорода (2%).

В состав комплекса входят три отдельные охраняемые производственные площадки (ПП). Площадка №1 — площадка размещения административно-бытового корпуса, вспомогательных и обслуживающих зданий.

На площадке №2 расположены основные технологические здания комплекса по утилизации (здание загрузки двигателей, камера сжигания, здание очистки продуктов сгорания, здания приготовления нейтрализующего раствора и изготовления товарной продукции). Этот комплекс зданий связан единым технологическим процессом. Площадка №3 — площадка входного контроля изделий.



Рис. 7.1. Схема предполагаемого расположения комплекса по утилизации.

Для конкретизации расчетов оценок риска положим, что расположение комплекса отвечает схеме, представленной на рис. 7.1.

Представленные в настоящей главе результаты получены на этапе предварительной оценки уровня опасности. Т. е. рассчитанные оценки риска являются лишь «нулевым» приближением и ни в коей мере не претендуют на полноту описания аварийной опасности.

На стадии предварительного анализа¹ большое внимание было уделено прежде всего выявлению возможных опасностей и определению частотного фактора, построению более или менее полной картины аварийных ситуаций. При этом, основное внимание при анализе было уделено процессам, протекающим непосредственно в камере сжигания. Отметим, что ни в ТЭО, ни в «Заключении экспертизы промышленной безопасности на ТЭО» такой анализ фактически проведен не был.

7.1. Частотные характеристики аварий

В таблице 7.1 приведены основные аварийные ситуации для комплекса по утилизации и их частотные характеристики. Значения частот оценивались на основании нормативных документов или экспертных оценок.

¹В работе принимали участие: Корепанов М. А., Мокрушин Б. С., Тенев В. А., Тухватуллин З. А., Храмов С. Н.

Таблица 7.1. Прогнозируемые частоты возникновения аварийных ситуаций на комплексе по утилизации.

Наименование	Частота, год ⁻¹
Аварийные ситуации на основном производстве	
Взрыв РДТТ на стадии входного контроля (ПП №3)	$1,40 \cdot 10^{-4}$
Воспламенение РДТТ на стадии входного контроля (ПП №3)	$1,39 \cdot 10^{-2}$
Взрыв РДТТ при выполнении вспомогательных операций (ПП №2)	$1,91 \cdot 10^{-4}$
Воспламенение РДТТ при выполнении вспомогательных операций (ПП №2)	$1,89 \cdot 10^{-2}$
Разрушение камеры сжигания в процессе сжигания (ПП №2)	$8,02 \cdot 10^{-3}$
Выброс продуктов сжигания через аварийный клапан (ПП №2)	$1,46 \cdot 10^{-3}$
Выброс продуктов сжигания через крышку камеры сжигания (ПП №2)	$1,45 \cdot 10^{-3}$
Взрыв РДТТ в процессе сжигания (ПП №2)	$1,00 \cdot 10^{-5}$
Аварийные ситуации на вспомогательных производствах	
Разрушение емкости с НСІ с последующим испарением	$< 8,02 \cdot 10^{-3}$
Разгерметизация резервуаров с гидроксидом натрия	$< 10^{-2}$
Разгерметизация бочек с гипохлоридом натрия	$< 10^{-2}$
Утечка природного газа с последующим взрывом газозвушной смеси	$< 5 \cdot 10^{-3}$
Взрыв установки с жидким азотом	$< 5 \cdot 10^{-3}$

Аварийный процесс может привести к воздействию на реципиента риска. Например, пожар, вызванный взрывом на объекте, может привести к ряду воздействий: термическому, токсическому и др. Для целей предварительного анализа уровня опасности из полной совокупности аварийных сценариев целесообразно выбрать только наиболее значимые по последствиям аварийные сценарии.

Анализ таблицы показывает, что наиболее вероятными авариями на основном производстве являются воспламенение заряда двигателя и разрушение камеры сжигания. Взрыв двигателя является в значительной степени менее вероятным.

Аварийные инциденты, связанные с выбросом продуктов сжигания ракетного топлива из камеры сжигания, протекают по наиболее благоприятному, контролируемому сценарию. Эти сценарии были рассмотрены в ТЭО. Было установлено, что токсическое воздействие в результате этого инцидента на население незначительно. Аварийные ситуации на вспомогательном производстве были подробно рассмотрены в «Заключении экспертизы промышленной безопасности на ТЭО». Было установлено, что воздействия от аварий на вспомогательном производстве локализованы внутри территории комплекса по утилизации. Причем речь идет об условных оценках риска, не учитывающих частоту аварийной ситуации. Учет частотного фактора приведет к уменьшению численных значений оценок.

Таким образом, представляется целесообразным исследовать уровень опасности для населения от аварий, связанных с воспламенением РДТТ, разрушением

камеры сжигания и взрывом заряда двигателя. В рамках предварительной оценки уровня опасности анализировались последствия разрушения камеры сжигания и воздействия ударной волны взрыва.

7.2. Характеристики источников опасности

Рассмотрим подробнее процессы, протекающие в камере сжигания. Исследование режимов бессоплового сжигания зарядов двигателей выявило то обстоятельство, что процесс сжигания некоторых типов РДТТ может проходить при повышенном давлении во внутреннем канале заряда. Далее, предположим, что на стадии входного контроля был пропущен дефектный заряд твердого топлива. В таком случае, при сжигании может произойти увеличение площади горения, что приведет к увеличению давления во внутреннем канале и разрушению двигателя. В свою очередь, это может привести к увеличению давления внутри камеры сжигания. При сбое в работе аварийного клапана камера может быть разрушена. В результате аварийного разрушения камеры, в атмосферу поступают неочищенные газообразные продукты горения твердого ракетного топлива (в т. ч. содержащие токсичные компоненты) в виде облака горячего газа.

При воспламенении заряда двигателя продукты горения будут поступать в атмосферу на протяжении определенного времени (4-8 мин). Кроме того, характеристики источника будут подобны источнику при выбросе из клапана сжигания. Эта аварийная ситуация рассмотрена в ТЭО, и не было выявлено опасности для населения. Действительно, ближайший населенный пункт расположен в двух километрах от установки. Величина аварийного воздействия на таком расстоянии существенна только для значимых аварий.

При взрывном разрушении заряда двигателя возникает ударная волна, приводящая к поражению людей и механическому повреждению строений в районе эпицентра взрыва. Кроме того, в результате взрыва возможны дополнительные механизмы воздействия на удаленных от эпицентра взрыва реципиентов. Во-первых, определенную опасность будет представлять механическое воздействие обломков заряда, твердых частиц и кусков грунта. Во-вторых, при возникновении пожара в результате взрыва может возникнуть дымовой выброс, представляющий потенциальную опасность как для населения, так и для персонала. Два вышеуказанных механизма воздействия взрыва не рассматривались на представленной стадии анализа в силу достаточной удаленности мест проживания населения от комплекса и относительно низкой частоты взрыва. Однако полный анализ аварийного риска обязательно должен включать оценку этих факторов, особенно при развитии аварии на стадии транспортировки железнодорожным транспортом.

Таким образом, в данной работе ограничимся рассмотрением двух видов аварийных воздействий: токсическим и барическим. Ограничение справедливо, если реципиентом риска является население, проживающее вблизи комплекса, и оцениваются последствия аварий на временном интервале порядка одного часа. Виду воздействий соответствуют источники опасности.

7.2.1. Источник токсической опасности. Для верхней оценки последствий химической аварии были приняты следующие допущения:

Таблица 7.2. Химический состав продуктов горения ракетного топлива в расчете на килограмм топлива.

ТХВ	<i>m</i> , г	ТХВ	<i>m</i> , г
<i>Cl(Cl₂)</i>	47,97	<i>NO</i>	52,44
<i>HCl</i>	141,85	<i>CO</i>	270,38
<i>Al₂O₃</i>	377,90		

1. При аварийном разрушении камеры сжигания в процессе утилизации заряда ракетного двигателя образуется облако с перегретыми парами неочищенных продуктов горения ракетного топлива. Облако, поднимаясь за счет сил плавучести, оставляет за собой загрязненный токсичной примесью «след» (см. рассуждения в разделе 3.2).
2. Концентрации в следе облака соответствуют концентрациям, которые имеют место при сжигании двигателя максимальной массы — 50 т. Указанное предположение основано на том факте, что при разрушении камеры в момент сжигания заряда двигателя с наибольшей массой, концентрация ТХВ в следе поднимающегося облака максимальна. Однако нужно отметить, что при больших массах заряда стабилизация подъема облака наступает на высотах, превышающих высоту атмосферного пограничного слоя. Из предварительных расчетов следует, что примерно половина массы токсичных веществ, находящихся в облаке, не влияет на концентрации в приземном слое. При меньших массах двигателя и определенных метеорологических условиях возможны ситуации, когда стабилизация облака может наступить на высотах, вблизи границы пограничного слоя атмосферы. В этом случае приземные концентрации могут оказаться больше, чем при аварии с двигателем большей массы, за счет части стабилизовавшегося облака, попадающей в ПСА.
3. Считается, что аварийные события – «воспламенение заряда» и «выброс из камеры сжигания» – эквивалентны по последствиям аварийному событию «разрушение камеры сжигания».
4. Концентрация каждого компонента продуктов горения в облаке является максимальной для данного компонента с учетом возможных химических превращений, а также среди различных типов двигателей. Рассмотрены только наиболее опасные компоненты с большими концентрациями относительно ПДК (табл. 7.2).
5. Примесь считается пассивной. Предполагается, что при подъеме горячего облака образуется холодный загрязненный след, кроме того, само облако к моменту стабилизации также успевает охладиться до температуры окружающей среды.
6. Не учитываются вымывание примеси осадками и гравитационное оседание (это допущение может оказаться недостаточно обоснованным для Al_2O_3 , так как этот компонент присутствует в продуктах горения в виде мелкодисперсной пыли). Не рассматриваются процессы конденсации водяного пара.

Концентрации токсичных веществ в следе были рассчитаны на основе модели подъема в атмосфере облака нагретого газа (раздел 3.2). Полученное распределение концентраций примеси использовалось в качестве начального условия для решения уравнения турбулентной диффузии (раздел 4.4).

Таким образом, введен некоторый эффективный источник токсической опасности, обеспечивающий предварительную оценку риска. Следует отметить, что более детальные расчеты, которые являются предметом будущих исследований, могут привести к определенному изменению оценки уровня потенциальной опасности.

7.2.2. Источник опасности при гипотетическом взрыве. Допуская гипотетическую возможность взрыва заряда ракетного двигателя, можно предполагать, что наихудшие последствия для человека будут при взрыве заряда максимальной массы. Отметим, что возможность взрыва теоретически отвергается. По крайней мере, для декларируемых составов ракетного топлива. Однако возможен разрыв двигателя за счет нештатного режима горения.

При наличии дефектов в заряде двигателя во время сжигания возможно увеличение площади горения. Увеличение площади горения и, соответственно, увеличение объема газообразных продуктов горения может привести к разрушению двигателя и образованию в окружающей среде воздушной ударной волны. Со стороны наблюдателя разрыв двигателя подобен взрыву. Как указывалось выше, предварительному анализу подлежит только воздействие ударной волны взрыва.

В данной работе, следуя принципу поиска максимального поражающего эффекта, последствия этих различных по сути процессов — взрыв заряда и разрыв двигателя, рассматриваются в рамках одной модели — модели точечного взрыва (раздел 2.2).

Энергия, выделяющаяся при взрыве ракетного топлива, зависит от общей массы топлива. Тритиловый эквивалент вещества ракетного топлива принимался равным нормативному значению равному 1,2. В табл. 7.3 для каждого типа ракетного двигателя приведена соответствующая масса заряда. Наибольшую опасность представляют двигатели ракет СС-Н-20, СС-24 и СС-24-М, имеющие наибольшую массу.

7.3. Оценка токсического воздействия

При взрыве или воспламенении заряда твердого ракетного топлива, а также при разрушении камеры сжигания, перегретые продукты горения ракетного топлива попадают в атмосферу, что может привести к токсическому поражению персонала и населения. Величина токсического воздействия может быть охарактеризована в терминах среднечасовых концентраций и токсических ингаляционных

Тип РДТТ	Масса, кг
СС-Н-20	49000
СС-24, СС-24М	48000
СС-25, I ступень	25000
СС-25, II ступень	10000
СС-25, III ступень	4000

Таблица 7.3. Масса заряда ракетного топлива в зависимости от типа двигателя.

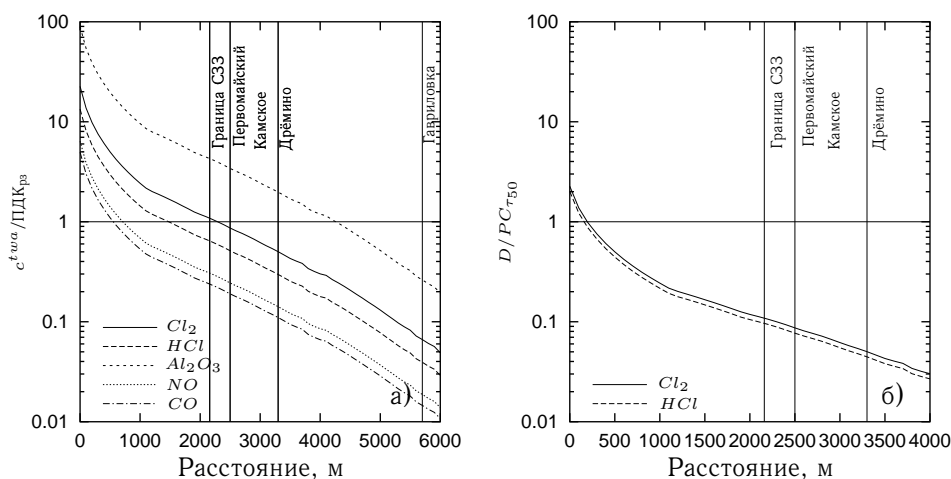


Рис. 7.2. Зависимость относительных концентраций и токсических доз от расстояния при наиболее неблагоприятных метеорологических условиях (скорость ветра 1 м/с, инверсия)

доз. Прогноз распространения токсичных веществ в атмосфере выполнен для периода времени 1 час.

Средняя по времени концентрация c^{twa} определяется как

$$c^{twa}(x, y) = D(x, y)/t_0, \quad (7.3.1)$$

где t_0 — временной масштаб, а накопленная токсическая доза D определяется следующим выражением:

$$D(x, y) = \int_0^{t_0} c(x, y, h) dt, \quad (7.3.2)$$

где t — время, $c(x, y, h)$ — концентрация ТХВ на высоте слоя дыхания $h = 1.5$ м.

На рис. 7.2 а) представлена зависимость относительных концентраций от расстояния при наиболее консервативных метеорологических условиях. Относительная концентрация — отношение c^{twa} к предельно допустимой концентрации рабочей зоны (ПДК_{рз}). Использование ПДК_{рз} обусловлено тем, что в случае аварии воздействие относительно кратковременно. Отметим, что ПДК_{рз} по смыслу отвечает концентрации, под действием которой человек может находиться в течение рабочего дня (8 часов) без последствий для здоровья.

Из рис. 7.2 а) следует, что концентрации наиболее опасных веществ (Cl , HCl) не превышают ПДК во всех населенных пунктах. Превышение ПДК в атмосфере населенных пунктов при аварии на комплексе имеет место только для оксида алюминия.

Уровень токсического воздействия характеризуется накопленной токсической дозой ТХВ и способом передачи воздействия реципиенту риска. Отношение накопленной токсической дозы к пороговой токсической дозе $PC_{T_{50}}$ при наиболее консервативных метеорологических условиях представлено на рис. 7.2 б). Пороговая токсическая доза имеет смысл такой величины, начиная с которой вероятно какое-либо поражение организма. Как видно из рис. 7.2 б), некоторое превышение пороговой токсической дозы наблюдается только в непосредственной близости от места аварии, тогда как уже на границе санитарно-защитной зоны (СЗЗ) накопленная доза на порядок ниже пороговой [185].

7.4. Оценка воздействия ударной волны взрыва

Формирующаяся при взрыве или разрыве двигателя ударная волна может приводить к механическому разрушению зданий и поражению людей. Степень разрушения и поражения определяется величиной избыточного давления на фронте ударной волны. Результаты расчетов зон разрушений приведены в табл. 7.4.

Анализ представленной информации позволяет заключить, что при взрыве заряда ракетного топлива на ПП №2 будут разрушены сооружения, размещенные непосредственно на площадке по утилизации ракетных двигателей. Возможны незначительные разрушения одно- и двухэтажных каменных зданий на ПП №1 и ПП №2. Также будет нанесен ущерб лесному массиву, находящемуся в непосредственной близости от эпицентра взрыва. На расстоянии порядка 1 км от эпицентра можно ожидать лишь незначительных повреждений лесного массива.

Севернее ПП №2 на расстоянии 930 м проходит магистральный газопровод. Как показывают результаты расчетов, даже при взрыве самого мощного заряда ракетного двигателя разрушение газопровода не произойдет. При взрыве заряда

Таблица 7.4. Прогнозируемые зоны разрушений (м) при взрыве двигателя максимальной массы.

Объект воздействия	Зона сильных разрушений	Зона средних разрушений	Зона слабых разрушений
Основные промышленные сооружения комплекса утилизации	194	232	303
Складские здания (кирпичная кладка)	232	303	493
Трансформаторные подстанции (кирпичная кладка)	194	303	493
Линии электропередачи высокого напряжения	131	170	232
Трубопроводы, заглубленные в землю на глубину не менее 20 см	—	76	—
Деревянные одноэтажные здания (жилые дома)	432	583	724
Одно- и двухэтажные каменные здания	260	366	583
Лесной массив. Средний возраст деревьев - 45-50 лет.	—	830	—
Средняя высота 20-24 м, диаметр 18-27 см			

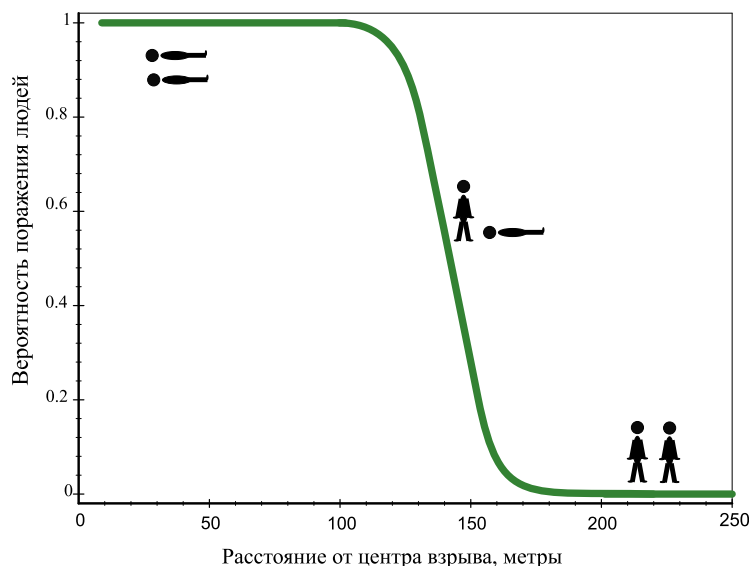


Рис. 7.3. Вероятность летального поражения при взрыве заряда РДТТ максимальной массы

твердого ракетного топлива на ПП №3 будут разрушены сооружения, находящиеся непосредственно на площадке. Возможны незначительные разрушения одно- и двухэтажных зданий на ПП №2.

Воздействие на людей избыточного давления, возникающего на фронте ударной волны, характеризуется вероятностью поражения. На рис. 7.3 показана зависимость между функцией ущерба (вероятностью смертельного поражения) и расстоянием от эпицентра взрыва для взрыва заряда твердого ракетного топлива максимальной массы (СС-Н-20). В табл. 7.5 представлены результаты расчетов радиусов границ зон 100% и 50% поражения людей при взрывах различных типов двигателей.

По технике безопасности на период сжигания заряда весь обслуживающий персонал эвакуируется с ПП №2 на ПП №1. Следовательно, при теоретически допустимом взрыве поражение обслуживающего персонала не прогнозируется. В случае взрыва заряда на стадии входного контроля или на стадии подготовительных операций может пострадать значительная часть персонала. Для населения прилегающего района воздействие ударной волны взрыва заряда твердого ракетного топлива угрозы не представляет [186], так как зона поражения локализована в радиусе 230 м.

Тип двигателя	100%	50%
СС-Н-20	115	141
СС-24, СС-24М	114	141
СС-25, I ступень	92	113
СС-25, II ступень	68	83
СС-25, III ступень	50	61

Таблица 7.5. Границы зон (м) 100% и 50% поражения.

7.5. Характеристики уровня потенциальной опасности

Уровень потенциальной аварийной опасности, связанный с объектом, может иметь различные характеристики (см. раздел 1.2).

Оценки концентраций токсичных продуктов горения ракетного топлива и токсических доз показали (см. раздел 7.3), что токсические дозы, которые может получить население при потенциальной аварии, значительно ниже пороговых. Следовательно, можно ожидать малых или нулевых значений ущерба при химической аварии. В связи с последним обстоятельством представляется целесообразным оценить риск порогового поражения населения.

7.5.1. Алгоритм расчета аварийного риска. На стадии частотного анализа было выделено 9 типов аварийных ситуаций. Однако анализ источников опасности показал, что можно выделить два «эффективных» источника опасности: источник химической опасности и источник взрывоопасности. Причем характеристики указанных источников опасности выбраны таким образом, чтобы обеспечить максимальность оценок риска. Следовательно, вероятности можно сгруппировать исходя из пространственной и физической неоднородности источников, введя таким образом «эффективные» аварийные ситуации. Результат процесса группировки приведен в табл. 7.6.

Таким образом, характеристики уровня потенциальной опасности, порождаемой объектом, могут быть получены прямым суммированием по аварийным ситуациям, приведенным в табл. 7.6. Расчет условных оценок аварийного риска проводился по следующей схеме. Для аварийных ситуаций, связанных со взрывом двигателя, условная оценка эквивалентна ущербу в силу независимости ущерба от параметров среды. Для аварийных ситуаций, связанных с «выбросами» продуктов горения ракетного топлива в атмосферу, проводилось осреднение ущерба по климатическим параметрам. При осреднении по направлениям ветра использовалась полярная сетка с угловым разрешением в 1° .

7.5.2. Условные оценки аварийного риска.

Токсическое воздействие. Расчеты по определению величин условных оценок аварийного риска выполнены на основе уровня химической опасности от аварий, связанных с «выбросом» продуктов горения ракетного топлива в атмосферу. Результаты интегральных оценок аварийных рисков приведены в табл. 7.7.

Химический состав продуктов горения ракетного топлива включает сотни компонент. Однако, для предварительного прогноза уровня опасности были выбраны

Таблица 7.6. Частоты аварийных ситуаций, используемые для расчета риска.

Z	Наименование аварийной ситуации	Частота [год ⁻¹]
1	Взрыв РДТТ на ПП №2	$1,35 \cdot 10^{-4}$
2	Взрыв РДТТ на ПП №3	$2,01 \cdot 10^{-4}$
3	Выброс продуктов сгорания РДТТ на ПП №2	$1,39 \cdot 10^{-2}$
4	Выброс продуктов сгорания РДТТ на ПП №3	$3,00 \cdot 10^{-2}$

Таблица 7.7. Характеристики уровня опасности при токсической аварии.

ТХВ	Летальное поражение		Пороговое поражение	
	$W_L^Z(\Omega)$	$W_G^Z(\Omega)$	$W_L^Z(\Omega)$	$W_G^Z(\Omega)$
Cl_2	$4,93 \cdot 10^{-1}$	$2,05 \cdot 10^{-15}$	$3,44 \cdot 10^3$	$1,85 \cdot 10^{-5}$
HCl	0	0	$0,87 \cdot 10^3$	0
всего	$4,93 \cdot 10^{-1}$	$2,05 \cdot 10^{-15}$	$4,21 \cdot 10^3$	$1,85 \cdot 10^{-5}$

только наиболее значимые, по мнению экспертов, вещества (Cl , HCl). Из-за отсутствия данных по токсическим свойствам, в оценках риска не учитывался вклад оксида алюминия. Вместе с тем, при аварии на комплексе именно для оксида алюминия возможно превышение ПДК (см. раздел 7.3). Указанное обстоятельство может привести к некоторому занижению оценок риска порогового поражения. Так как максимальные значения локальных оценок риска много меньше единицы, для расчета суммарного поражения от различных компонент использовалось аддитивное правило [187].

Из табл. 7.7 следует, что летальное поражение вероятно лишь от воздействия хлора, тогда как пороговое поражение возможно от обоих ТХВ. Кроме того, поскольку рассматривалось только ингаляционное воздействие токсичных веществ, возможна некоторая недооценка токсического воздействия через кожный покров.

Интегральная оценка условного аварийного группового риска (т. е., прогнозируемое число жертв за год при условии, что авария имела место) показывает, что при химической аварии не ожидается летальных исходов, а исходы, связанные с пороговым поражением среди населения, чрезвычайно маловероятны.

**Рис. 7.4.** Условная оценка локального риска порогового поражения в случае разрушения камеры сжигания



Рис. 7.5. Условная оценка локального риска летального поражения в случае разрушения камеры сжигания

Указанное обстоятельство иллюстрируют рисунки 7.4 и 7.5 с распределением условных оценок локального риска (напомним, что условная оценка локального риска имеет смысл вероятности поражения человека в выделенной точке в результате аварии). Из рисунков видно, что поле риска локализовано непосредственно вблизи объекта. При удалении от объекта численные значения риска быстро убывают. Вероятности поражения в случае аварии на территории близлежащих населенных пунктов чрезвычайно малы (для порогового поражения — 10^{-7} , для летального — 10^{-11}).

Таким образом, какой-либо значительной токсической опасности в случае разрушения камеры сжигания с «выбросом» продуктов горения в атмосферу или воспламенения ракетного двигателя на стадии предварительного анализа не обнаружено.

Воздействие ударной волны. На основе результатов, представленных в разделе 7.4, рассчитана интегральная оценка условного аварийного риска при гипотетическом взрыве заряда ракетного топлива. Результаты расчетов представлены в табл. 7.8.

Из таблицы следует, что величина условного аварийного риска при гипотетическом взрыве ракетного топлива превышает величину условной оценки аварийного риска от токсического воздействия продуктов горения ракетного топлива. Однако,

Таблица 7.8. Характеристики уровня опасности при гипотетическом взрыве заряда двигателя.

Тип двигателя	$W_L^Z(\Omega)$	$W_G^Z(\Omega)$	Тип двигателя	$W_L^Z(\Omega)$	$W_G^Z(\Omega)$
СС-Н-20	$6,61 \cdot 10^4$	0	СС-25, I ступень	$4,22 \cdot 10^4$	0
СС-24, СС-24М	$6,52 \cdot 10^4$	0	СС-25, II ступень	$2,29 \cdot 10^4$	0
			СС-25, III ступень	$1,22 \cdot 10^4$	0

так как зона влияния барического воздействия локализована вблизи объекта и в эту зону не попадает население, то оценка условного аварийного группового риска при гипотетическом взрыве заряда ракетного топлива ничтожно мала.

**Рис. 7.6.** Поле локального риска летального поражения при аварии на комплексе по утилизации ракетных двигателей (год^{-1})

7.5.3. Итоговая оценка риска. С учетом вероятностей возникновения аварийных ситуаций (табл. 7.6) и условных оценок рассчитаны оценки локального и группового риска. Результирующее поле локального риска приведено на рис. 7.6.

Из рисунка видно, что поле локального риска имеет два выраженных эпицентра — площадки №2 и №3. Максимальное расстояние от ПП №2 и ПП №3, на котором уровень опасности достигает значения 10^{-6} , — примерно 200 метров. На границе СЗЗ значения локального риска не превышают величины 10^{-13} год $^{-1}$. В виду малого значения интегральной оценки группового риска ($6,69 \cdot 10^{-17}$ чел/год) его распределение не приведено.

Анализ значимости составляющих аварийного риска. Анализ значимости составляющих риска может быть выполнен в терминах интегральных оценок. Из таблицы 7.9, где представлены результаты интегральных оценок риска летального поражения, следует, что 99,9% вкладов в локальный риск приходится на долю аварийного воздействия ударной волны при гипотетическом взрыве заряда ракетного топлива. Тогда как 100% вкладов в групповой риск приходится на долю аварий, связанных с попаданием продуктов горения ракетного топлива в атмосферу. Указанное обстоятельство является естественным следствием распределений функций ущерба: при воздействии ударной волны взрыва поле ущерба локализовано, и аварийное воздействие на реципиентов риска, удаленных от эпицентра, — незначительно.

z	$P_z \cdot W_L^z(\Omega)$	$P_z \cdot W_G^z(\Omega)$
1	8,92	0
2	13,19	0
3	$6,80 \cdot 10^{-3}$	$2,85 \cdot 10^{-17}$
4	$1,48 \cdot 10^{-2}$	$6,15 \cdot 10^{-17}$
Всего	22,23	$9,00 \cdot 10^{-17}$

Таблица 7.9. Вклады в интегральные оценки аварийного риска (z соответствует сценарию в табл. 7.6).

анализа уровня опасности, не рассмотрены такие последствия взрыва как «задымление», механическое воздействие обломков конструкций и т.д. В этой связи, необходимо проведение более детального исследования риска.

Таким образом, в рамках сделанных приближений и ограничений потенциальную опасность для населения представляют только аварии, связанные с попаданием в атмосферу продуктов горения ракетного топлива.

Однако необходимо подчеркнуть, что расширение круга механизмов воздействия при взрыве может качественно изменить выводы. Действительно в рамках предварительного

Анализ неопределенности аварийного риска. Среди множества частот или вероятностей, физических или химических параметров, используемых для оценки риска, лишь небольшое количество известно с полной определенностью. Некоторые из них, такие, как масса ракетного топлива, известны с достаточной степенью точности. Другие, такие, как химический состав и распределение продуктов горения в атмосфере, определены с использованием множества упрощающих предположений. Кроме того, некоторая неопределенность результатов возникает из-за множества допущений и упрощений, используемых при проведении расчетов. Важной частью

любого анализа риска является анализ влияния таких неопределенностей (неточностей) на результаты расчета риска.

Предварительный характер представленной работы не позволяет провести детальное количественное исследование неопределенности риска. Однако представляется целесообразным провести хотя бы качественный анализ влияния основных предположений на результирующую оценку риска. В табл. 7.10 приведены основные источники неопределенности и их качественное влияние на величину риска.

Таблица 7.10. Качественное влияние основных предположений на результирующую оценку риска (введены следующие обозначения: > — переоценка, < — недооценка, <> — переоценка или недооценка).

Базовое предположение	Потенциальное влияние		
	>	<	<>
Токсическое воздействие			
Учтено только ингаляционное воздействие при токсической аварии, пренебрегается другими путями воздействия.		+	
Пренебрегается токсическим воздействием оксида алюминия		+	
Не рассматривается влияние «задымления» и дисперсных продуктов горения.		+	
Модели источников опасности			
Рассмотрены только источники опасности, расположенные непосредственно на территории комплекса.		+	
Предполагается, что токсическое воздействие при аварии с разрушением емкостей с реагентом (<i>HCl</i>) мало.		+	
Не учтено термическое поражение при воспламенении заряда двигателя, а также возможность возникновения лесного пожара.		+	
В оценках риска используется только вариант с максимальной массой двигателя.			+
Химический состав продуктов сгорания ракетного топлива постоянен на любой высоте подъема токсичного облака.	+		
Концентрация каждого из компонентов продуктов горения ракетного топлива максимальна среди различных типов двигателей и условий аварии.	+		
Выбросы через аварийный клапан и крышку камеры сжигания, а также воспламенение, эквивалентны по последствиям мгновенному разрушению камеры сжигания.			+
Не учитывается влияние конденсации водяных паров в облаке.			+
Не учитываются эффекты, приводящие к уменьшению концентрации примеси в атмосфере: сухое осаждение, вымывание осадками.	+		

Продолжение таблицы на следующей странице

Таблица 7.10. (продолжение).

Базовое предположение	Потенциальное влияние		
	>	<	<>
Не рассматриваются эффекты влияния застройки на распространение ударной волны.			+
Не рассматривается механическое воздействие твердых частиц при гипотетическом взрыве.		+	
Не рассматривается возможность возникновения дымового «выброса» при горении частей разрушенного заряда ракетного двигателя.		+	
Оценки риска			
Не рассмотрена возможность образования «каскадных аварий».		+	
При расчетах группового риска не учитывалась возможность нахождения населения в пределах СЗЗ.		+	
Не рассмотрены долговременные эффекты при штатной работе комплекса (например, канцерогенный риск).		+	
Не оценивался риск для персонала комплекса.		+	

В рамках данной работы был выполнен предварительный анализ уровня потенциальной аварийной опасности. Поэтому возможна некоторая недооценка риска. Основные факторы, которые могут повлиять на оценку, представлены в таблице 7.10. Источники неопределенности, потенциально вызывающие недооценку, требуют дальнейшей проработки.

7.5.4. Сравнительная оценка аварийного риска.

Сопоставление с риском от взрыва облака пропана. Для сравнения можно рассмотреть, например, оценку аварийного риска при взрыве газозвушной смеси, образующейся в результате разрушения резервуара с $4 \cdot 10^3$ кг сжиженного пропана. Масса пропана в резервуаре выбрана равной массе заряда ракетного топлива самого слабого двигателя. Для расчетов были приняты следующие параметры задачи (детали модели приведены в 3.1.2): масса пропана $C_B = 4 \cdot 10^3$ кг, $\Theta = 0,5$, плотность смеси стехиометрического состава $\rho_S = 1,315$ кг/м³, объемная концентрация газовой смеси стехиометрического состава $C_S = 0,0403$, молекулярная масса горючей компоненты смеси $\mu = 44 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, удельная теплота взрыва $Q = 2,8 \cdot 10^6$ Дж/кг. Оценки показывают, что при таких параметрах объем образующегося газового облака равен $V_0 = 2,53 \cdot 10^4$ м³, масса газового облака $m = \rho_S \cdot V_0 = 3,3 \cdot 10^4$ кг, энергия взрывного превращения $E = Q \cdot m = 9,3 \cdot 10^{10}$ Дж.

Как показывают расчеты, последствия взрыва заряда РДТТ максимальной массы несколько больше, чем последствия взрыва газозвушного облака пропана. Для самого мощного двигателя (СС-Н-20) зона безопасности, связанная с поражением людей ударной волной, начинается с расстояния 227 м, тогда как при аварии с резервуаром пропана — с расстояния 120 м.

Таблица 7.11. Индивидуальный риск смерти по неестественным причинам.

Причина	Риск смерти, год ⁻¹
Автомобильный транспорт	$3 \cdot 10^{-4}$
Падение	$9 \cdot 10^{-5}$
Пожар и ожег	$4 \cdot 10^{-5}$
Утопление	$3 \cdot 10^{-5}$
Отравление	$2 \cdot 10^{-5}$
Огнестрельное оружие	$1 \cdot 10^{-5}$
Станочное оборудование (1968 г.)	$1 \cdot 10^{-5}$
Водный транспорт	$9 \cdot 10^{-6}$
Воздушный транспорт	$9 \cdot 10^{-6}$
Электрический ток	$6 \cdot 10^{-6}$
Железная дорога	$4 \cdot 10^{-6}$
Молния	$5 \cdot 10^{-7}$
Торнадо	$4 \cdot 10^{-7}$
Ураган	$4 \cdot 10^{-7}$
Общие причины	$6 \cdot 10^{-4}$

Таким образом, радиус границы зоны безопасности при взрыве двигателя СС-Н-20 примерно в 1,9 раза больше соответствующего радиуса при взрыве газоздушного облака пропана.

Сопоставление с фоновым риском. Локальный риск в том виде, как он определен в настоящей работе, представляет собой риск смерти индивидуума (в течение года функционирования комплекса) в результате аварий на комплексе утилизации на данном удалении от объекта. С чем сравнить полученное значение локального риска? Вполне естественно сравнить эту величину с фактическими данными об относительном числе (вероятности) смертельных случаев в год от различных неестественных причин, т. е. с фоновым риском. В табл. 7.11 приведены некоторые данные по риску смерти от неестественных причин.

Кроме того, риск гибели по неестественным причинам в СССР в 1987 г. составил $1,1 \cdot 10^{-3}$ год⁻¹, в Российской Федерации по данным за 1987-1990 гг. он находился в интервале $1,1 - 1,7 \cdot 10^{-3}$ год⁻¹. Риск погибнуть от неисправности бытовой электропроводки составляет $1 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹, а риск гибели в дорожно-транспортных происшествиях в 1990 г. в СССР оценивался как $2 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹. В качестве фонового локального риска для нашей страны может быть принято значение $1 \cdot 10^{-3}$ год⁻¹.

Сравнивая локальный риск, порождаемый комплексом по утилизации ракетных двигателей на твердом топливе, с фоновым риском, приходим к выводу, что максимальное значение сопоставимо с фоновым риском. При удалении от комплекса на расстояние порядка 1000 метров локальный риск составляет уже 10⁻⁶% от фонового.

7.6. Заключение

Основные результаты *предварительной* оценки уровня потенциальной аварийной опасности, связанной с комплексом по утилизации, могут быть охарактеризованы следующими утверждениями.

- Область безопасности жизнедеятельности (т. е. область, в пределах которой величина локального риска не превышает величину 10^{-6} год⁻¹) начинается с расстояния 250 метров от производственных площадок №2 и №3 комплекса утилизации ракетных двигателей на твердом топливе.
- Величина риска смерти индивидуума в результате аварий на комплексе по утилизации не превышает 10^{-11} год⁻¹ при удалении от комплекса на расстояние порядка 1000 метров.
- Наиболее опасными для населения авариями являются аварии, связанные с выбросами в атмосферу неочищенных продуктов сгорания ракетного топлива. По результатам предварительного исследования, существенного токсического воздействия на население, не предполагается. Возможно разовое превышение концентрации оксида алюминия по отношению к ПДК в ближайших населенных пунктах.
- Вероятность летального исхода среди населения в результате аварии на комплексе по утилизации крайне незначительна.
- Уровень опасности, порождаемый комплексом по утилизации, вблизи потенциально опасного объекта сопоставим с фоновым уровнем. На расстоянии порядка 1000 метров от комплекса по утилизации локальный риск составляет уже $10^{-6}\%$ от фонового.

В заключение отметим, что результаты представленного анализа носят предварительный характер, а, следовательно, более детальный анализ риска может как выявить дополнительные источники опасности, так и понизить прогнозируемый уровень аварийной опасности. Оценка полного уровня опасности (с учетом долгосрочных воздействий) является предметом будущих исследований.

Литература

- [1] Прогноз последствий аварий на объекте хранения боевых отравляющих веществ в районе г. Камбарки Удмуртской Республики /Под ред. В. М. Колодкина. – Ижевск: Изд-во Удм. Ун-та, 1995. – 110 с.
- [2] Оценка риска, связанного с объектами хранения химического оружия на территории Удмуртской Республики /Под ред. В. М. Колодкина. – Ижевск: Изд-во Удм. Ун-та, 1996. – 219 с.
- [3] Акимов В. О федеральной целевой программе «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2005 года». – <http://www.secur.ru/vitmb42.htm>
- [4] Хенли Э. Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска / Перевод с англ. под редакцией В. С. Сыромятникова. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.
- [5] Евстафьев И. Б., Григорьев С. Г., Браун Д. Л. и др. Оценка аварийной опасности системы объектов по хранению и уничтожению химического оружия. Отчет о НИР в/ч 64518. – 1992. – 126 с.
- [6] Евстафьев И. Б. и др. Рекомендации по оценке риска при проектировании и вводу в эксплуатацию объектов для уничтожения химического оружия. Рабочие материалы по НИР «Железобетон П». – М.: в/ч 64518, 1991. – 14 с.
- [7] Маршалл В. Основные опасности химических производств / Пер. с англ. под ред. Б. Б. Чайванова и А. Н. Черноплекова. – М.: Мир, 1989. – 671 с.
- [8] Добročеев О. В. и др. Разработка методик предпроектной и проектной оценки риска при уничтожении химического оружия. Оценка безопасности объекта, содержащего химическое оружие. – М.: ОНИР «Ирис», 1993. – 81 с.
- [9] Беляев С. Т., Ларичев О. И., Кузьмин И. И., Кречетов Л. И. Риск как точная наука. // Наука и жизнь. – 1991. №3. – с. 2-5, 59-64 .
- [10] Горский В. Г., Курочкин В. К., Дюмаев К. М., Новосельцев В. Н., Браун Д. Л. Анализ риска — методологическая основа обеспечения безопасности химико-технологических объектов // Российский химический журнал. – 1994. № 2. – с. 54-61.
- [11] Колодкин В. М., Мурин А. В., Петров А. К., Данилов Д. А. Характеристики уровня опасности, порождаемой техногенным объектом // Вестник Удмуртского Университета. – 2000. № 4. – с. 92-107.
- [12] Щучанский арсенал химического оружия. Прогноз потенциальной опасности как критерий принятия решения /Под ред. В. М. Колодкина и И. И. Манило. – Курган: Изд-во Курганский Центр МАНЭБ, 1997. – 45 с.
- [13] Колодкин В. М. Компьютерное моделирование в решении задач прогнозирования последствий аварий на техногенных объектах // Вестник Удмуртского Университета. – 2001. № 1. – с. 44-46.
- [14] Kolodkin V. M., Murin A. V. Prediction of the level of hazard of potentially hazardous objects. // Environmental Management and Health.— 2001. Vol. 12, № 5. – in press.
- [15] V. Kolodkin. Risk assessments of the potential hazard connected with the objects of storage of warfare chemical agents // Effluents from Alternative Demilitarization Technologies / Editor by Francis W. Holm. – NATO Science Series 1, 1998. Vol. 22. – pp. 121-139.
- [16] Бельский М. Л. Элементы количественной оценки фармакологического эффекта. – Л.: Медгиз, 1963. – 152 с.
- [17] Франке З. Химия отравляющих веществ: В 2 т. – М.: Химия, 1973. – Т. 1. – 404 с.

- [18] Egidi D., Foraboschi F.P., Spadoni G., Amendola A. The ARIPAR Project: Analysis of the Major Accident Risks Connected with Industrial and Transportation Activities in the Ravenna Area. // *Reliability Engineering and System Safety*. – 1995, Vol. 49. – pp. 75-89.
- [19] Отраслевое руководство по анализу и управлению риском, связанным с техногенным воздействием на человека и окружающую среду при сооружении и эксплуатации объектов добычи, транспорта, хранения и переработки углеводородного сырья с целью повышения их надежности и безопасности. – М.: Газпром, 1996. – 208 с.
- [20] Tooele Chemical Agent Disposal Facility Quantitive Risk Assessment. – Abington: Science application international corporation, 1996.
- [21] Pocket Guide to Chemical Hazards. –NIOSH. <http://www.cdc.gov/niosh/npg/npgdname.html>.
- [22] Методика оценки последствий химических аварий (методика «Токси»). – М.: НТЦ «Пром. безопасность», 1993. – 19 с.
- [23] Рекомендации по организации защиты населения, проживающего вблизи объектов по хранению и уничтожению химического оружия, и взаимодействию органов управления при чрезвычайных ситуациях на этих объектах. – М.: ВНИИГОЧС, 1996.
- [24] Калинина Н. И. К вопросу о стандартах безопасности при уничтожении химического оружия // *Токсикологический вестник*. – 1994. № 4. – с. 6-9.
- [25] Александров В. Н., Емельянов В. И. Отравляющие вещества. – М.: Воен. изд., 1990. – 271 с.
- [26] Карлссон Э., Конберг М., Рунн О., Винтер С. Оценка последствий возможных аварий на объекте по хранению люизита в районе г. Камбарки // *Российский химический журнал*. – 1995. № 4. – с. 79-88.
- [27] Колодкин В. М., Стурман В. И., Красноперов Д. В. Использование геоинформационных систем в задачах экологического картографирования // *Экологические проблемы предуралья: стратегия изучения и пути решения*. – Ижевск: Изд-во Удмуртского Университета, 1994. – с. 128-129.
- [28] ГИС-технология. ARC/INFO / Колодкин В. М., Красноперов Д. В., Данилов С. Е., Галиуллин М. Э. – Ижевск: Изд-во Удмуртского Университета, 1994. – 118 с.
- [29] Колодкин В. М., Морозов О. А., Данилов С. Е. Принципы построения автоматизированной системы прогноза последствий аварий при хранении, транспортировке и переработке химического оружия // *Вестник Удмуртского Университета. Спецвыпуск*. – 1994. – с. 83-86.
- [30] Kolodkin V. Risk posed by the chemical weapon stockpile in the Udmurt Republic // *Chemical Weapon Destruction in Russia: Political, Legal and Technical Aspects* / Edited by John Hart and Cynthia D. Miller., SIPRI Chemical & Biological Warfare Studies. – Oxford University Press. 1998. Vol. 17. – pp. 94-102.
- [31] Шулейкин В. В. Физика моря. – М.: Изд-во АН СССР, 1953. – 989 с.
- [32] Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. – Л.: Наука, 1975. – 592 с.
- [33] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика: В 2 т. – М.: Наука, 1964. Ч.1. – 567 с.
- [34] Бабкин В. И. Испарение с водной поверхности. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984, – 80 с.
- [35] Плетнев Л. В., Гамаюнов Н. И., Замятин В. М. Компьютерное моделирование процесса испарения в вакуум // *Труды IV Минского международного форума по тепломассообмену «Тепломассообмен ММФ-2000»*. Т. 5. – с. 325-329.
- [36] Rose J. W.. Accurate approximate equations for intensive sub-sonic evaporation // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2000. Vol. 43, № 20. – pp. 3869-3875.
- [37] Eames I. W., Marr H. J., Sabir H. The evaporation coefficient of water: a review // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 1997. Vol. 40, № 12. – pp. 2963-2973.
- [38] Методика оценки последствий химических аварий (Методика «Токси». Вторая редакция). – М.:НТЦ «Пром. безопасность», 1999. – 83 с.
- [39] Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.– М.: Наука, 1966.
- [40] Кестенбойм Х. С., Росляков Г. С., Чудов Л. А. Точечный взрыв: Методы расчета. Таблицы. – М.: Наука, 1974. – 255 с.
- [41] Проблемы уничтожения химического оружия // *Сб. научных трудов 1*. – М.: Мин. обороны СССР, войсковая часть 52688-х, 1990.
- [42] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: В 10-ти т. – М.: Наука, 1987. Т. 7. Теория упругости. – 246 с.

- [43] Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 711 с.
- [44] Спэрроу Э. М., Сесс Р. Д. Теплообмен излучением. – Л.: Энергия, Ленингр. отд., 1971. – 294 с.
- [45] Бартльме Ф. Газодинамика горения. – М.: Энергоиздат, 1981. – 47 с.
- [46] Самарский А. А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977. – 656 с.
- [47] Самарский А. А., Николаев Е. С. Методы решения сеточных уравнений. – М.: Наука, 1978. – 589 с.
- [48] Коваленко А. Д. Основы термоупругости. – Киев: Наукова Думка, 1970.
- [49] Мелан Э., Паркус Г. Термоупругие напряжения, вызываемые стационарными температурными полями. – М.: Физматгиз, 1958. – 50 с.
- [50] Горский В. Г., Швецова-Шиловская Т. Н. Основы анализа аварийного риска, порождаемого химико-технологическими объектами / Под ред. проф. В. К. Курочкина. – М.: ГосНИИОХТ.
- [51] Седов Л. И. Движение воздуха при сильном взрыве // ДАН СССР. – 1946. Т. 52, № 1.
- [52] Седов Л. И. Распространение сильных взрывных волн // Прикл. матем. и мех. – 1946. Т. 10, Вып. 2.
- [53] Станюкович К. П. Неустановившиеся движения сплошной среды. – М.: Наука, 1971. – 854 с.
- [54] Коробейников В. П., Мельникова Н. С., Рязанов Е. В. Теория точечного взрыва. – М.: Физматгиз, 1961.
- [55] Коробейников В. П. Задачи теории точечного взрыва в газах // Труды Матем. ин-та им. В. А. Стеклова. – М.: Наука, 1973. Т. 119. – 278 с.
- [56] Взрывные явления. Оценка и последствия: В 2 т. / Бейкер У., Кокс П. и др. – М.: Мир, 1986.
- [57] Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Цыганов С. А. О моделировании волн давления, образующихся при детонации и горении газовых смесей // Физика горения и взрыва. – 1985. Т. 21. № 2. – 90 с.
- [58] С. А. Губин, С. М. Когарко, В. В. Одинцов – В кн.: Проблемы технологического горения. Черно-головка, 1981.
- [59] Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Михалкин В. Н., Шаргатов В. А. Расчет параметров ударных волн при детонации горючих газообразных смесей переменного состава // Физика горения и взрыва. – 1985. Т. 21, № 3. – 92 с.
- [60] Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1972. – 435 с.
- [61] Качурин Л. Г., Морачевский В. Г. Кинетика фазовых переходов воды в атмосфере. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1965. – 195 с.
- [62] Woodward V. The motion in and around isolated thermals // Q. J. Roy. Met. Soc. – 1959. Vol. 85. № 364.
- [63] Никонов С. Н., Пискунов В. Н. Модели формирования объемных источников выброса в атмосферу // Вопросы атомной науки и техники, сер. Теоретическая и прикладная физика. – 1993. Вып. 3. – с. 23-26.
- [64] Гончаров Е. А., Пискунов В. Н., Харченко А. И., Мартин Ф. Дж., Черч Х. У. Модель, описывающая динамику подъема облака неядерного взрыва // Вопросы атомной науки и техники, сер. Теоретическая и прикладная физика. – 1995. Вып. 3/1. – с. 59-68.
- [65] Теория турбулентных струй / Под ред. Г. Н. Абрамовича. – М.: Наука, 1984. – 716 с.
- [66] Андреев В., Панчев С. Динамика атмосферных термиков. – Л.: Гидрометеоздат, 1975. – 152 с.
- [67] Scorer R. S., Ronne C. Experiments with convection bubbles // Weather. – 1956. № 11.
- [68] Шметер С. М. Структура полей метеорологических элементов в зоне кучево-дождевых облаков // Труды ЦАО. – 1969. Вып. 8.
- [69] Turner J. S. The dynamics of spheroidal masses of buoyant fluids // J. Fluids Mech. – 1964. Vol. 19.
- [70] McBain G. D., Shehrcke H., J. A. Harris Evaporation from open cylinder // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2000. Vol. 43. – pp. 2117-2128.
- [71] Griffiths R. F., Roberts I. D. Droplet evaporation from porous surfaces; model validation from field and wind tunnel experiments for sand and concrete // Atmospheric Environment. – 1999. Vol. 33. – pp. 3531-3549
- [72] Schwartze J. P., Brocker S. The evaporation of water into air of different humidities and the inversion temperature phenomenon // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2000. Vol. 43. – pp. 1791-1800.
- [73] Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987. – 494 с.

- [74] Шебеко Ю. Н., Шевчук А. П., Смолин И. М., Колосов В. А., Малкин В. Л., Смирнов Е. В. Математическая модель испарения сжиженных углеводородов со свободной поверхности // Хим. Пром. – 1992. № 7. – с. 28-31.
- [75] Воротилин В. П., Горбулин В. Д. Математическая модель испарения жидкости в объем ограниченного пространства // Хим. Пром.— 1993. № 3-4. – с. 56-60.
- [76] Методика определения площади зоны защитных мероприятий, устанавливаемой вокруг объектов по хранению химического оружия и объектов по уничтожению химического оружия. – М., 1999.
- [77] Тищенко Н. Ф., Тищенко А. Н. Охрана атмосферного воздуха. Справочник. Выделение вредных веществ. – М.: Химия, 1993. Ч. 1. – 192 с.
- [78] Kulmala M., Asmi A., Pirjola L. Indoor air aerosol model: the effect of outdoor air, filtration and ventilation on indoor concentrations // Atmospheric Environment.— 1999. Vol. 33. – pp. 2133-2144.
- [79] Drakou G., Zerefos C., Ziomas I., Voyatzaki M. Measurements and numerical simulations of indoor O_3 and NO_x in two different cases // Atmospheric Environment.— 1998. Vol. 32. № 4. – pp. 595-610.
- [80] Lee R. L., Naslund E. Lagrangian stochastic particle model simulations of turbulent dispersion around buildings // Atmospheric Environment.— 1998. Vol. 32. № 4. – pp. 665-672.
- [81] Колодкин В. М., Петров А. К., Тенев В. А., Чернышева Л. П. Математическая трехмерная модель пожара в помещении // Вестник Ижевского Государственного Технического Университета. – 2000. № 1. – с. 3-6.
- [82] Оран Э., Борис Дж. Численное моделирование реагирующих потоков. – М.: Мир, 1990. – 661 с.
- [83] Курбацкий А. Ф., Моделирование турбулентных течений // Изв. СОАН СССР, – 1969 г. № 5 – с. 119-114.
- [84] Baldwin B. S., Lomax H. Thin Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows. – 1978, A/AA, pp. – 78-257.
- [85] Секундов А. Н. Применение дифференциального уравнения для турбулентной вязкости и анализ плоских неавтономных течений // Изв. АН СССР, МЖГ. – 1971. № 5. – с. 114-127.
- [86] Сполдинг Д. Б. Горение и массообмен. – М.: Машиностроение, 1985. – 236 с.
- [87] Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86). – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 94 с.
- [88] Экологический программный комплекс для персональных ЭВМ. Теоретические основы и руководство пользователя ЭПК «Zone» / Под ред. Гаврилова А. С. – СПб: Гидрометеоздат, 1992. – 168 с.
- [89] Stohl A. The FLeXPART Particle Dispersion Model Version 3.1. User Guide. – University of Munich, 1999. – 53 pp.
- [90] Едигаров А. С. Численный расчет турбулентного течения холодного газа в атмосфере // Журнал выч. математики и выч. физики. – 1991. Т 31. № 9. – с. 1369–1380.
- [91] Carmichael G. R., Sandu A., Song C. H., He S., Phadnis M. J., Daescu D., Damian-Iordache V., Potra F. A. Computational challenges of modelling interactions between aerosol and gas phase processes in large-scale air pollution models // Environmental Management and Health. – 1999. Vol. 10. № 4. – pp. 224-235.
- [92] Jose R. S., Rodriguez M. A., Cortes E., Gonzalez R. M. EMMA model: an advanced operational mesoscale air quality model for urban and regional environments // Environmental Management and Health. – 1999. Vol. 10. № 4. – pp. 258-266.
- [93] D'Ambra P., Barone G., di Serafino D., Giunta G., Murli A., Riccio A. Pnam: parallel software for air quality simulations in the Naples area // Environmental Management and Health. – 1999. Vol. 10. № 4. – pp. 209-215.
- [94] Иванов Н. В., Никонов С. Н., Пискунов В. Н. Методика расчета переноса и осаждения аэрозольных выбросов в атмосферу // Вопросы атомной науки и техники. Серия: мат. моделирование физ. процессов. – 1994. Вып. 3. – с. 21–25.
- [95] Brandt J., Christensen J. H., Zlatev Z. Real time predictions of transport, dispersion and deposition from nuclear accidents // Environmental Management and Health. – 1999. Vol. 10. № 4. – pp. 216-223.
- [96] Jiang W.-Mei, Liu H., Liu H.-Nian The Numerical Simulation on Atmospheric Transport and Dispersion of the Spray Atomized from Flood Discharging by Hydropower Station over Complex Terrain // Meteorol. Atmos. Phys. – 1999. Vol. 70. – pp. 215-226.
- [97] Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1984. – 752 с.

- [98] Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 509 с.
- [99] Бызова Н. Л., Гаргер Е. К., Иванов В. Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 274 с.
- [100] Kalthoff N., Binder H.-J., Kossmann M., Vogtlin R., Corsmeier U., Fiedler F., Schlager H. Temporal evolution and spatial variation of the boundary layer over complex terrain // *Atmospheric Environment*. – 1998. Vol. 32. № 7. – pp. 1179-1194.
- [101] Mikami M., TOYA T., Yasuda N. An analytical method for the determination of the roughness parameters over complex regions // *Boundary-Layer Meteorology*. – 1996. Vol. 79. – pp. 23-33.
- [102] Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.
- [103] Siddiqui T. A., Mohan M. Analysis of various schemes for the estimation of atmospheric stability classification // *Atmospheric Environment*. – 1998. Vol. 32. № 1. – pp. 3775-3781.
- [104] Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и на транспорте. Руководящий документ РД 52.04.253-90. – Л.: Госкомгидромет, 1991. – 23 с.
- [105] Методика расчёта загрязнения аварийными выбросами неустойчивого конденсата. – М.: ГАНГ им. Губкина, 1993. – 71 с.
- [106] Правила безопасности для наземных складов жидкого аммиака. ПБ 03-182-98. – М.: Госгортехнадзор, 1999. – 94 с.
- [107] Романов Г.Н. Ликвидация последствий радиационных аварий. Справочное руководство. – М.: Изд. АТ, 1993. – 336 с.
- [108] Risk Assessment and Risk Management for the Chemical Process Industry / Ed. by Greenberg H.R., Cramer J.J. – N.-Y.: Van Nostrand Reinhold Co., 1991. – 315 p.
- [109] Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в атмосфере. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
- [110] Seinfeld J.H. Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution. – N.-Y.: J.Wiley, 1986. – 738 p.
- [111] Mc Mahon T.A., Denison P.J. Empirical Atmospheric Deposition Parameters – A Survey // *Atmospheric Environment*. – 1979. Vol. 13. – pp. 571-585.
- [112] Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. – N.-Y.: J. Wiley, 1998.
- [113] Zanetti P. Simulating Short-term, Short-range Air Quality Dispersion Phenomena // *Encyclopedia of Environmental Control Technology, Air Pollution Control*. – Houston: Gulf Publ. Co., 1989. Vol. 2. – pp. 159-196.
- [114] Briggs G. A. Diffusion Estimation for Small Emissions // *Environmental Research Laboratories. Air Resources Atmospheric Turbulence and Diffusion Laboratory 1973 Annual Report ATDL-106, National Oceanic and Atmospheric Administration*. – 1974.
- [115] Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей /Пер. с англ. под ред. А. М. Яглома. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 351 с.
- [116] Ханна С. Р. Применение исследований в области турбулентности для моделирования загрязнения воздуха // *Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / Пер. с англ. под ред. А.М.Яглома. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – с. 281-314.*
- [117] Hanna S. R. Plume Dispersion and Concentration Fluctuations in the Atmosphere // *Encyclopedia of Environmental Control Technology, Air Pollution Control*. – Houston: Gulf Publ. Co., 1989. Vol. 2. – pp. 547-582.
- [118] Panofsky H. A., Dutton J. A. Atmospheric Turbulence. – N.-Y.: J. Wiley, 1984. – 397 p.
- [119] Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analysis // *Workshop Proceedings American Meteorol / D. A. Hougen ed. – Society, Boston, Mass., 1975. – 296 p.*
- [120] Smith F. B. A scheme for estimating the vertical dispersion of a plume from a source near ground level // *Proc. of 3rd Meeting of an Expert Panel on Air Pollution Modelling*. – Brussels. NATO/CCMS, 1972. Rep. 14.
- [121] Hosker R. P., Jr. Estimates of Dry Deposition and Plume Depletion over Forests and Grassland // *Proceedings of a Symp., IAEM-SM-181/19, Int. Atomic Energy*. – Vienna, 1974.

- [122] Веверка О., Валента В. Проблемы расчёта распределения активностей в атмосфере // Сб. докл. научно-технической конференции СЭВ, г. Усти-над-Лабой, ЧССР, сент. 1975. – Прага: Чехословацкая комиссия по атомной энергии, 1976, – с. 387-404.
- [123] Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases, Exposures of Critical Groups. IAEA Safety Series. – Vienna: IAEA, 1982. №57.
- [124] Общее положение безопасности АЭС. Методы расчёта распространения радиоактивных веществ с АЭС и облучение окружающего населения. Нормативно-технический документ стран-членов СЭВ и СФРЮ 38.220. 56-84. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
- [125] Stohl A. Computation, accuracy and applications of trajectories – A review and bibliography. // Atmospheric Environment. – 1998. Vol. 32. № 6. – pp. 947-966.
- [126] Maurizi A., Tampieri F. Velocity probability density functions in Lagrangian dispersion models for inhomogeneous turbulence. // Atmospheric Environment. – 1999. Vol. 33. № 2. – pp. 281-289.
- [127] Gopalakrishnan S. G., Sharan M. A lagrangian particle model for marginally heavy gas dispersion // Atmospheric Environment. – 1997. Vol. 31. № 20. – pp. 3369-3382.
- [128] Heinz S., H. van Dop. Buoyant plume rise described by a Lagrangian turbulence model // Atmospheric Environment. – 1999. Vol. 33. № 13. – pp. 2031-2043.
- [129] Leuzzi G., Monti P. Particle trajectory simulation of dispersion around a building // Atmospheric Environment. – 1998. Vol. 32. № 2. – pp. 203-214.
- [130] Maryon R. H. Determining cross-wind variance for low frequency wind meander // Atmospheric Environment. – 1998. Vol. 32. № 2. – pp. 115-121.
- [131] Franzese P., Luhar A. K., Borgas M. S. An efficient Lagrangian stochastic model of vertical dispersion in the convective boundary layer // Atmospheric Environment. – 1999. Vol. 33. № 15. – pp. 2337-2345.
- [132] Crone G. C., Dinar N., H. van Dop, Verver G. H. L. A Lagrangian approach for modelling turbulent transport and chemistry // Atmospheric Environment. – 1999. Vol. 33. № 29. – pp. 4919-4934.
- [133] Gifford F. A. Horizontal diffusion in the atmosphere: a lagrangian-dynamical theory // Atmospheric Environment. – 1982, Vol. 16. № 3. – pp. 505-512.
- [134] Barone G., P. D'Ambra, D. di Serafino, Guinta G., Riccio A. A comparison of numerical methods for solving diffusion-reaction equations in air quality models // Computing and Visualization in Science. – 1999. Vol. 2. – pp. 1-13.
- [135] Carver G., Brown P. D., Wild O. The ASAD atmospheric chemistry integration package and chemical reaction database. User Guide. – Centre for Atmospheric Science. Chemistry Department, Cambridge University, 1997. – 48 pp.
- [136] Nguyen K. C., Noonan J. A., Galbally I. E., Physick W. L.. Prediction of plume dispersion in complex terrain: eulerian versus lagrangian models // Atmospheric Environment. – 1997, Vol. 31. № 7. – pp. 947-958.
- [137] Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. Теория турбулентности: В 2 т. – Л.: Гидрометеиздат, 1992. Т. 1. – 693 с.
- [138] Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнение атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 250 с.
- [139] Brown R. J., Bilger R. W. Experiments on a reating plume – 1. Conventional concentration statistics // Atmospheric Environment. – 1998, Vol. 32. № 4. – pp. 611-628.
- [140] Brown R. J., Bilger R. W. Experiments on a reating plume – 2. Conditional concentration statistics // Atmospheric Environment. – 1998, Vol. 32. № 4. – pp. 629-646.
- [141] Ackermann I. J., Hass H., Schell B., Binkowski F. S. Regional modelling of particulate matter with MADE // Environmental Management and Health. – 1999, Vol. 10. № 4. – p. 201-208.
- [142] Gangoiti G., Sancho J., Ibarra G. Rise of moist plumes from tall stacks in turbulent and stratified atmospheres // Atmospheric Environment. – 1997, Vol. 31. № 2. – pp. 253-269.
- [143] Бызова Н. Л., Шнайндман В. А., Бондаренко В. Н. Расчет вертикального профиля ветра в пограничном слое атмосферы по наземным данным // Метеорология и гидрология. – 1987. № 11. – с. 75-83.
- [144] Динамическая метеорология: Теоретическая метеорология / Под ред. Д. Л. Лайхтмана. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 607 с.

- [145] Зилитинкевич С. С. Динамика пограничного слоя атмосферы. – М.: Гидрометеиздат, 1974. – 291 с.
- [146] Волощук В. М., Куприянчук А. И., Лев Т. Д. О параметризации вертикального турбулентного обмена для пограничного слоя атмосферы // *Метеорология и гидрология*. – 1992, с. 5–15.
- [147] Шнайдман В.А., Фоскарино О.В. Моделирование пограничного слоя и макротурбулентного обмена в атмосфере. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 160 с.
- [148] The Model Documentation System / European Environment Agency. – <http://www.etcaq.rivm.nl/databases/mds.html>
- [149] Initiative on «Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes». – <http://www.dmu.dk/AtmosphericEnvironment/harmoni.htm>
- [150] Ramsdell J. V., Fosmire C. J. Estimating concentrations in plumes released in the vicinity of buildings: model evaluation // *Atmospheric Environment*. – 1998, Vol. 32. № 10. – pp. 1679–1689.
- [151] Sharan M., Yadav A. K. Simulation of diffusion experiments under light wind, stable conditions by a variable K-theory model // *Atmospheric Environment*. – 1998, Vol. 32. № 20. – pp. 3481–3492.
- [152] Olesen H. R. Model Validation Kit for the workshop on Operational Short-Range Atmospheric Dispersion Models for Environmental Impact Assessments in Europe (Mol, 1994) // *Compendium of materials reprinted at National Environmental Research Institute*. – Denmark, 1996. – 32 p.
- [153] Hanna S. R., Strimaitis D. G., Chang J. C. Hazard Response Modelling Uncertainty. Users's Guide for Software for Evaluating Hazardous Gas Dispersion Models. – Sigma Research Corporation, Westford, 1991. Vol. I. – 71 p.
- [154] Olesen H. R. Local-Scale Regulatory Dispersion Models: Initiatives to Improve «Modelling Culture», Proceedings of the «10th Joint Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology with Air and Waste Management Association (AWMA)». – American Meteorological Society, Boston, 1998. – pp. 49-53.
- [155] Smith J. S. Statistical Evaluation of Centerline Concentration Estimates by Atmospheric Dispersion Models // *Int. J. Environment and Pollution*, in press.
- [156] Olesen H. R. The Model Validation Exercise at Mol: Overview of Results // *Int. J. Environmental and Pollution*. – 1995. Vol. 5. № 4-6. – pp. 761-784.
- [157] Gryning S.-E., Lyck E. The Copenhagen Tracer Experiments: Reporting of Measurements // *Technical report Riso-R-1054*. – Riso National Laboratory, Roskilde, 1998. – 55 p.
- [158] Mahrt L. Stratified Atmospheric Boundary Layers and Breakdown of Models // *Theoret. Comp. Fluid Dynamics*. – 1998, Vol. 11. – pp. 263-279.
- [159] Т. Чанг. Системное программирование на C++ для Unix. – Киев: BHV, 1999. – 590 с.
- [160] MPI Primer / Developing With LAM. – Ohio Supercomputer Center. The Ohio State University, 1996. – 86 pp.
- [161] С. С. Гайсарян. Объектно-ориентированные технологии проектирования прикладных программных систем. – <http://citforum.udm.ru>
- [162] Б. Страустрап. Введение в язык C++. – <http://citforum.udm.ru>
- [163] G. van Rossum. Python Tutorial. – <http://www.python.org>
- [164] C. Hoffman. A Python Quick Reference. – <http://www.python.org>
- [165] G. van Rossum. Python Library Reference. – <http://www.python.org>
- [166] G. van Rossum. Python Reference Manual. – <http://www.python.org>
- [167] Г. ван Россум. Семинар по программированию на Python. – <http://sultan.da.ru>
- [168] www.acl.lanl.gov/siloon
- [169] Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости.— М.: Энергоатомиздат, 1984. – 150 с.
- [170] Тенев В. А., Шухардин М. В. Трехмерные течения продуктов сгорания в энергетических установках // *Сб. Проблемы энергоресурсосбережения и охраны окружающей среды*. – Ижевск: ИжГТУ, 1998, – с. 65-70.
- [171] Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен.— М.: Мир, 1990. – 726 с.
- [172] Tomlin A. S., Ghorai S., Hart G., Berzins M. 3D adaptive unstructured meshes for air pollution modelling // *Environmental Management and Health*. – 1999. Vol. 10. № 4. – pp. 267-274.

- [173] Самарский А. А., Попов Ю. П. Разностные методы решения задач газовой динамики. – М.: Наука, 1980. – 352 с.
- [174] Kessler M. Development and analysis of an adaptive transport scheme // *Atmospheric Environment*. – 1999. Vol. 33. № 15 – pp. 2347-2360.
- [175] Ghorai S., Tomlin A. S., Berzins M. Resolution of pollutant concentrations in the boundary layer using a fully 3D adaptive gridding technique // *Atmospheric Environment*. – 2000. Vol. 34. № 18 – pp. 2851-2863.
- [176] Роуч П. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
- [177] Белоцерковский О. М., Давыдов Ю. М. Метод крупных частиц в газовой динамике. – М.: Наука, 1982. – 392 с.
- [178] Elbern H. Parallelization and load balancing of a comprehensive atmospheric chemistry transport model // *Atmospheric Environment*. – 1997. Vol. 31. № 21 – pp. 3561-3574.
- [179] Martin M., Oberson O., Chopard B., Mueller F., Clappier A. Atmospheric pollution transport: the parallelization of a transport & chemistry code. // *Atmospheric Environment*. – 1999. Vol. 33 – pp. 1853-1860.
- [180] Marrocchi M., Scardovelli R., Malguzzi P. Parallelization and performance of a meteorological limited area model // *Parallel Computing*. – 1998. Vol. 24 – pp. 911-922
- [181] Валях Е. Последовательно-параллельные вычисления. – М.: Мир, 1985. – 456 с.
- [182] Братсерт У. Х. Испарение в атмосферу. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 352 с.
- [183] Российский объект по уничтожению химического оружия. Оценка риска для здоровья населения. Отчет № SAIC-01/2607 – Международная корпорация прикладных исследований (САИК), Эбингтон, 2001.
- [184] Общий подход к прочностным расчетам строительных конструкций при анализе возможного падения самолетов, выполненных для объекта по уничтожению ОВ в г. Аннистоне, шт. Алабама. Дополнение к отчету № SAIC-01/2607 – Международная корпорация прикладных исследований (САИК), Эбингтон, 2001.
- [185] Колодкин В. М., Новикова Т. А., Королева Д. Н., Данилов Д. Ю., Мулин А. В., Чиркова Л. С. Утилизация ракетных двигателей. Вопросы безопасности. – Ижевск: ИИПТК УдГУ, 2000. – 19 с.
- [186] Колодкин В. М. Анализ риска, связанного с уничтожением РДТТ в Воткинском районе УР // Публичные слушания по проблеме уничтожения твердотопливных ракетных двигателей. – Воткинск, 2000. – с. 53-56
- [187] Risk Assessment Guidance for Superfund. Human Health Evaluation Manual. – Office of Emergency and Remedial Response, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, 1989. V I. – pp. 8-11–8-15.

Основные обозначения и сокращения

Обозначения

c	—	массовая концентрация
c_v	—	концентрация насыщенного пара
C_p	—	теплоемкость при постоянном давлении
C_v	—	теплоемкость при постоянном объеме
D	—	токсическая доза (1.3)
D	—	коэффициент молекулярной диффузии примеси в воздухе (3.3)
f	—	параметр Кориолиса
\vec{g}	—	ускорение свободного падения
\mathbf{I}	—	единичный тензор
K_α	—	коэффициенты турбулентного обмена
\tilde{k}_α	—	безразмерные коэффициенты турбулентного обмена
L	—	молярная энтальпия испарения
m	—	масса
Nu	—	число Нуссельта
N_A	—	число Авогадро
p	—	давление
\mathbf{P}	—	тензор давлений
Pr	—	число Прандтля
p_v	—	парциальное давление насыщенного пара
P_z	—	частота z -го аварийного процесса
\vec{q}	—	диффузионный тепловой поток
q_γ	—	лучистый тепловой поток
Re	—	число Рейнольдса
R	—	универсальная газовая постоянная
r	—	радиус
$R(r, \varphi)$	—	оценка аварийного риска в точке
R_L	—	интегральная оценка аварийного локального риска
$R_g(r, \varphi)$	—	оценка локального аварийного группового риска в точке
R_G	—	интегральная оценка аварийного группового риска
\mathbf{S}	—	тензор вязких напряжений
t	—	время
T	—	температура
u	—	компонента вектора скорости в радиальном направлении (3.1)
U	—	прогнозируемый ущерб от аварии (1.2)
u_*	—	динамическая скорость
u_α	—	α -компонента поля скоростей среды в переменных Эйлера

U_α	—	α -компонента средней скорости
\vec{V}	—	вектор скорости
$W^z(r, \varphi)$	—	оценка условного аварийного риска в точке, связанная с z -ой аварией
x_α	—	декартовы прямоугольные координаты
z_0	—	параметр шероховатости подстилающей поверхности
α	—	коэффициент теплопередачи
β	—	коэффициент массопередачи
ϵ	—	степень черноты тела
η	—	коэффициент вязкости
Λ	—	масштаб толщины пограничного слоя атмосферы
λ	—	коэффициент теплопроводности
μ	—	молекулярный вес (1.3)
μ	—	коэффициент динамической вязкости (3.4)
μ_B	—	вязкость воздуха
ν	—	коэффициент Пуассона (2.3)
ν	—	молекулярная кинематическая вязкость воздуха (3.3)
ν_T	—	коэффициент турбулентной вязкости
ρ	—	плотность
σ	—	коэффициент Стефана-Больцмана
σ_t	—	предел текучести
σ_{ij}	—	компонента тензора напряжений
\aleph	—	постоянная Кармана

Сокращения

ЕС _{т50}	—	средняя токсическая доза (внешняя) при ингаляционном воздействии
LC _{т50}	—	средняя смертельная токсическая доза при ингаляционном воздействии
PC _{т50}	—	средняя пороговая токсическая доза при ингаляционном воздействии
АС	—	аварийная ситуация
ВВ	—	взрывчатое вещество
ГИС	—	географическая информационная система
КС	—	компьютерная система
ОВ	—	отравляющее вещество
ПВС	—	параллельная вычислительная система
ПДК	—	предельно допустимая концентрация
ПК	—	персональный компьютер
ПО	—	программное обеспечение
ПП	—	производственная площадка
ПСА	—	пограничный слой атмосферы
ПХРС	—	простая химически реагирующая система
РДТТ	—	ракетный двигатель твердого топлива
ТХВ	—	токсичное химическое вещество

Список иллюстраций

Глава 1

- 1.1 Представление локального риска на карте местности 13
- 1.2 Пример F-N-кривой для аварии с проливом боевых отравляющих веществ 16
- 1.3 Схема прогнозирования последствий химических аварий 26

Глава 2

- 2.1 Схема химического боеприпаса (а) и пример размещения боеприпасов при их хранении на стеллаже (б) 28
- 2.2 Межфазная граница 30
- 2.3 Схемы расположения снарядов в контейнерах: а) прямоугольный шаблон (схема А); б) концентрический шаблон (схема Б) 40
- 2.4 Математическое ожидание массы отравляющего вещества, оставшегося в химических боеприпасах калибра 152 мм и 122 мм на момент разгерметизации 43

Глава 3

- 3.1 Зависимость безразмерного давления p от безразмерного радиуса r 47
- 3.2 Зависимость безразмерного избыточного давления \bar{p} от безразмерного радиуса \bar{R} 50
- 3.3 Зависимость высоты подъема вершины облака H от массы взрывчатого вещества в тротиловом эквиваленте E_0 54
- 3.4 Зависимость высоты подъема вершины облака H при взрыве от времени . 55
- 3.5 Зависимость эффективного коэффициента массопередачи β^* от скорости потока u при испарении зарина 61
- 3.6 Зависимость эффективного коэффициента массопередачи β^* от скорости потока u при испарении Ви-газа 62
- 3.7 Схема воздушных потоков в помещении 63
- 3.8 Зависимость концентрации зарина в помещении от времени при кратности вентиляции $W/V = 1 \text{ ч}^{-1}$ 66
- 3.9 Зависимость концентрации зарина в помещении от времени при кратности вентиляции $W/V = 10 \text{ ч}^{-1}$ 67
- 3.10 Зависимость вероятности летального ущерба U от времени при испарении зарина 68
- 3.11 Зависимость вероятности летального ущерба U от времени при испарении зомана 69

Глава 4

4.1	Структура пограничного слоя	77
4.2	Сопоставление прогнозируемых (модель АТМ) и наблюдаемых концентраций для экспериментов в г. Копенгагене	98
4.3	Сопоставление прогнозируемых (модель ЭКСБР) и наблюдаемых концентраций для экспериментов в г. Копенгагене	99
4.4	Сопоставление прогнозируемых (модель ЭКССХ) и наблюдаемых концентраций для экспериментов в г. Копенгагене	100
4.5	Сопоставление прогнозируемых (модель АТМ) и наблюдаемых концентраций для условий г. Лиллестрема	102
4.6	Сопоставление прогнозируемых (модель ЭКСБР) и наблюдаемых концентраций для условий г. Лиллестрема	103
4.7	Сопоставление прогнозируемых (модель ЭКССХ) и наблюдаемых концентраций для условий г. Лиллестрема	104
4.8	Сопоставление прогнозируемых (модель АТМ) и наблюдаемых концентраций для условий г. Кинсайда: а) совместное решение (4.4.4) и (4.4.11); б) расчет при помощи формулы (4.4.10)	106
4.9	Сопоставление прогнозируемых (модель ЭКСБР) и наблюдаемых концентраций для условий г. Кинсайда	107
4.10	Сопоставление прогнозируемых (модель ЭКССХ) и наблюдаемых концентраций для условий г. Кинсайда	108

Глава 5

5.1	Архитектура системы «ChemRisk»	113
5.2	Укрупненная функциональная диаграмма системы	114
5.3	Упрощенная объектная модель модуля «Пролив»	114
5.4	Сопоставление расчетной и экспериментальной скорости в ламинарном и буферном подслое	117
5.5	Архитектура подсистемы «Атмосфера»	118
5.6	Дискретизация расчетного пространства	121
5.7	Схема потоков данных при параллельном решении уравнения турбулентной диффузии	123
5.8	Влияние топологии ЛВС ($v = 10^8$) и размерности задачи на масштабируемость алгоритма: 1 — идеальная масштабируемость; 2 — топология звезды, $n_1 = 50$; 3 — топология звезды, $n_1 = 150$; 4 — топология кольца, $n_1 = 50$; 5 — топология кольца, $n_1 = 150$	125
5.9	Влияние размерности задачи и производительности ЛВС на масштабируемость алгоритма: 1 — идеальная масштабируемость; 2 — $v = 10^7$, $n_1 = 50$, расчет; 3 — $v = 10^7$, $n_1 = 150$, расчет; 4 — $v = 10^8$, $n_1 = 50$, расчет; 5 — $v = 10^8$, $n_1 = 150$, расчет; 5 — $v = 10^8$, $n_1 = 150$, измерение	127
5.10	Сопоставление аналитического и численного решения задачи Сеттона ($u_2 = 2$ м/с, $z_0 = 0,0213$ см, $m = 1/7$, $c_s = 1$, $c_a = 0$) на высоте 2 м	128
5.11	Архитектура подсистемы «Риск»	129
5.12	Упрощенное представление реализаций аварийной ситуации в подсистеме «Риск»	132
5.13	Зависимость коэффициента ускорения от числа процессоров при расчете условных оценок риска (100 Мбит/с, топология звезды): 1 — идеальная масштабируемость; 2 — результат измерения	136

Глава 6

6.1	Схема объекта по уничтожению химического оружия	141
6.2	Схема размещения объекта по уничтожению химического оружия	142
6.3	Схема размещения арсенала	143
6.4	Зависимость уровня условного локального риска от эффективного радиуса при взрыве на заводе: 1 — эвакуация населения в течении 1 часа; 2 — при отсутствии эвакуации; 3 — предельная оценка	157
6.5	Зависимость уровня условного локального риска от эффективного радиуса при пожаре на заводе: 1 — эвакуация населения в течении 1 часа; 2 — при отсутствии эвакуации; 3 — предельная оценка	169
6.6	Зависимость уровня условного локального риска от эффективного радиуса при проливе на заводе: 1 — эвакуация населения в течение 1 часа; 2 — при отсутствии эвакуации; 3 — предельная оценка	174
6.7	<i>F-N</i> -кривые для случая без эвакуации населения: а) завод; б) арсенал	178
6.8	Уровни локального риска от объектов по уничтожению и хранению химического оружия	179
6.9	Схема расположения объектов по хранению и уничтожению химического оружия в Кизнерском районе Удмуртии. Уровни локального риска	180
6.10	<i>F-N</i> -кривые для случая без эвакуации населения для объектов на территории Удмуртии: а) завод; б) арсенал	186

Глава 7

7.1	Схема предполагаемого расположения комплекса по утилизации.	190
7.2	Зависимость относительных концентраций и токсических доз от расстояния при наиболее неблагоприятных метеорологических условиях (скорость ветра 1 м/с, инверсия)	195
7.3	Вероятность летального поражения при взрыве заряда РДТТ максимальной массы	197
7.4	Условная оценка локального риска порогового поражения в случае разрушения камеры сжигания	199
7.5	Условная оценка локального риска летального поражения в случае разрушения камеры сжигания	200
7.6	Поле локального риска летального поражения при аварии на комплексе по утилизации ракетных двигателей (год^{-1})	201

Список таблиц

Глава 1

1.1	Коэффициенты пробит-функций [18–20] и коэффициент преобразования размерности концентрации α [21] для некоторых веществ.	19
1.2	Характеристики токсических свойств некоторых химически опасных веществ [22–26].	19
1.3	Значения функции ущерба при токсическом воздействии паров зарина. . .	20

Глава 2

2.1	Параметры некоторых веществ при температуре 20°C	32
2.2	Зависимость минимальной толщины пленки жидкости h_m от типа поверхности.	33
2.3	Избыточное давление, отвечающее разгерметизации химических боеприпасов.	35
2.4	Расстояние, в пределах которого происходит разгерметизация химических боеприпасов.	35
2.5	Параметры процесса разгерметизации химических боеприпасов при пожаре: временной интервал сохранения герметичности — τ (с), масса отравляющего вещества в боеприпасе на момент разгерметизации — m (кг). . . .	39
2.6	Временной интервал сохранения герметичности, масса отравляющего вещества, попадающая в окружающую среду при нагреве боеприпасов в контейнерах.	41

Глава 3

3.1	Избыточное давление ($\text{кг}/\text{см}^2$), отвечающее разрушению.	48
3.2	Оценки критерия Нуссельта для ряда значений параметра ϵ	58
3.3	Скорость испарения н-бутана ($\text{г}/\text{м}^2\text{с}$) при различной температуре и подвижности воздуха.	59
3.4	Интенсивность испарения некоторых ОВ ($\text{г}/\text{м}^2\text{с}$) при различной температуре и подвижности воздуха (давление 0,83 атм).	60
3.5	Параметры химической опасности при пожаре.	75

Глава 4

4.1	Параметр шероховатости z_0 по [98] (h — высота препятствий, x — расстояние между ними).	78
4.2	Качественное соответствие между классом устойчивости и характеристикой стратификации.	79

4.3	Значения коэффициентов α_2 , α_3 и выражения функций $S_3(x_1)$ для вычисления дисперсионных зависимостей Бриггса в зависимости от классов устойчивости атмосферы.	84
4.4	Максимально возможное значение стандартного отклонения σ_3^{max} и значения коэффициентов a_1 , a_2 , b_1 и b_2 при разных классах устойчивости атмосферы.	84
4.5	Коэффициенты c_1 , d_1 , c_2 , d_2 для функции $F(x_1, z_0)$ в зависимости от параметра шероховатости z_0	85
4.6	Типовые безразмерные вертикальные профили модуля скорости \tilde{u} , угла поворота ветра $\Delta\phi$, коэффициента \tilde{k} для холодного периода года и средние значения L_k для категорий устойчивости.	92
4.7	Типовые безразмерные вертикальные профили модуля скорости \tilde{u} , угла поворота ветра $\Delta\phi$, коэффициента \tilde{k} для теплого периода года (значения L_k соотв. табл. 4.6).	93
4.8	Прогнозируемые значения максимальных концентраций, отвечающие эксперименту в г. Копенгагене.	99
4.9	Прогнозируемые значения интегральных концентраций в направлении, перпендикулярном направлению ветра. Эксперимент в г. Копенгагене.	100
4.10	Прогнозируемые значения максимальных концентраций, отвечающие эксперименту в г. Лиллестреме.	101
4.11	Прогнозируемые значения интегральных концентраций в направлении, перпендикулярном направлению ветра. Эксперимент в г. Лиллестреме.	102
4.12	Прогнозируемые значения максимальных концентраций. Серия экспериментов в г. Кинсайде.	105
Глава 5		
5.1	Зависимость характеристик эффективности алгоритма от числа процессоров в вычислительном кластере.	126
5.2	Соответствие между прагматикой оценок риска и некоторыми программными абстракциями.	131
Глава 6		
6.1	Численность населения вблизи потенциально опасных объектов.	142
6.2	Характеристики токсичности паров отравляющих веществ.	144
6.3	Частоты аварий, связанные с взрывным превращением.	145
6.4	Частоты противоправных действий.	146
6.5	Условные вероятности химических аварий при взрыве.	146
6.6	Математические ожидания масс отравляющих веществ (m , кг) в химических боеприпасах, поврежденных при взрыве.	148
6.7	Минимальные массы ВВ и ОВ при взрыве.	149
6.8	Вероятность нахождения отравляющего вещества определенного типа в разрушенных при взрыве химических боеприпасах.	150
6.9	Условная вероятность химической аварии при взрыве на объекте по утилизации химического оружия.	152
6.10	Масса M_{ij} и вероятность P_{ij} типа отравляющего вещества, поступившего в атмосферу при гипотетическом взрыве.	153
6.11	Условные оценки аварийного риска при взрыве на объекте уничтожения химического оружия.	156

6.12	Максимальное количество жертв N_{let}^{max} в населенных пунктах при взрыве на территории завода по утилизации.	158
6.13	Максимальное количество жертв N_{let}^{max} при взрыве в одном из помещений хранения арсенала.	160
6.14	Характеристики аварийных сценариев «пожара» на объекте по уничтожению химического оружия.	161
6.15	Условные вероятности возникновения химической аварии на различных технологических стадиях при пожаре на объекте по уничтожению химического оружия.	162
6.16	Характеристики источников опасности при разгерметизации химических боеприпасов в условиях пожара.	164
6.17	Результатирующие характеристики источников химической опасности при гипотетическом пожаре.	166
6.18	Условные оценки аварийного риска при «пожаре» на объекте по уничтожению химического оружия.	168
6.19	Характеристики источника опасности при проливе отравляющих веществ в результате падения летательного аппарата.	173
6.20	Условные оценки аварийного риска при проливе на объекте по уничтожению химического оружия.	175
6.21	Характеристики уровня опасности, связанной с заводом по утилизации боевых отравляющих веществ.	176
6.22	Характеристики уровня опасности объектов по утилизации и хранению отравляющих веществ (X — без эвакуации, $X_{t=1}$ — при условии эвакуации населения в течение часа, \bar{X} — предельные значения).	177
6.23	Масса M_{ij} и вероятность P_{ij} типа отравляющего вещества, поступившего в атмосферу при гипотетическом взрыве на объектах Удмуртии.	181
6.24	Результатирующие характеристики источников химической опасности при пожаре на объектах Удмуртии.	182
6.25	Площади проливов — S_{ij} и вероятности P_{ij} типов отравляющих веществ при проливе на объектах Удмуртии.	183
6.26	Характеристики уровня опасности от объекта уничтожения химического оружия на территории Удмуртии.	183
6.27	Характеристики уровня опасности от объектов по утилизации и хранению отравляющих веществ на территории Удмуртии (X — без эвакуации, $X_{t=1}$ — при условии эвакуации населения в течение часа, \bar{X} — предельные значения).	184
6.28	Значения характеристик аварийной опасности от объектов с боевыми отравляющими веществами, размещенных в двух районах России (X — без эвакуации населения, $X_{t=1}$ — при условии эвакуации населения в течение часа, \bar{X} — предельные значения).	185

Глава 7

7.1	Прогнозируемые частоты возникновения аварийных ситуаций на комплексе по утилизации.	191
7.2	Химический состав продуктов горения ракетного топлива в расчете на килограмм топлива.	193
7.3	Масса заряда ракетного топлива в зависимости от типа двигателя.	194

7.4	Прогнозируемые зоны разрушений (м) при взрыве двигателя максимальной массы.	196
7.5	Границы зон (м) 100% и 50% поражения.	197
7.6	Частоты аварийных ситуаций, используемые для расчета риска.	198
7.7	Характеристики уровня опасности при токсической аварии.	199
7.8	Характеристики уровня опасности при гипотетическом взрыве заряда двигателя.	201
7.9	Вклады в интегральные оценки аварийного риска (z соответствует сценарию в табл. 7.6).	202
7.10	Качественное влияние основных предположений на результирующую оценку риска (введены следующие обозначения: > — переоценка, < — недооценка, <> — переоценка или недооценка).	203
7.11	Индивидуальный риск смерти по неестественным причинам.	205

Оглавление

Предисловие	3
Введение	4
Часть 1. Теория аварийного риска	7
Глава 1 Оценки риска как характеристики уровня опасности	9
1.1 Опасность, порождаемая техногенным объектом	9
1.2 Модель прогноза аварийного риска	11
1.3 Характеристики ущерба при аварии	17
1.4 Прогнозирование частотных характеристик аварийных процессов	20
1.5 Информационная поддержка прогнозирования	23
1.6 Прогнозирование уровня аварийной опасности	24
Глава 2 Модели источников химической аварийной опасности	27
2.1 Модель источника опасности при проливе	28
2.2 Модель возникновения источника опасности при взрыве	34
2.3 Возникновение источника опасности при пожаре	36
2.4 Возникновение источника опасности при тушении пожара	41
2.5 Заключительные замечания	44
Глава 3 Моделирование начальной стадии распространения аварийных воздействий	45
3.1 Модель воздействия ударной волны взрыва	45
3.1.1 Точечный взрыв	46
3.1.2 Взрыв газозооушной смеси	47
3.2 Модель подъема облака нагретого газа	50
3.2.1 Модель движения облака	51
3.2.2 Тестирование модели	54
3.3 Модель пролива в технологическом помещении	55
3.3.1 Модель испарения	56
3.3.2 Модель накопления примеси в вентилируемом пространстве	63
3.3.3 Результаты расчетов	67
3.4 Моделирование переноса примеси при пожаре в помещении	69
3.5 Заключительные замечания	75

Глава 4 Моделирование рассеяния примеси в пограничном слое атмосферы	76
4.1 Пограничный слой атмосферы	77
4.2 Экспресс-методика прогнозирования уровня аварийной опасности	80
4.2.1 Основные положения методики	80
4.2.2 Модель концентрационного поля поллютанта	81
4.2.3 Эмпирические зависимости для дисперсий стационарного концентрационного поля	83
4.2.4 Эмпирические зависимости для дисперсий нестационарного концентрационного поля	85
4.3 Лагранжевы стохастические модели	86
4.4 Эйлерова модель турбулентного рассеяния примеси	87
4.4.1 Уравнение диффузии	88
4.4.2 Характеристики турбулентности и скорости ветра	92
4.5 Тестирование моделей рассеяния примеси	95
4.5.1 Рассеяние примеси в условиях городской застройки	98
4.5.2 Рассеяние примеси при низких скоростях ветра	101
4.5.3 Рассеяние перегретой примеси	104
4.6 Заключение	108
Глава 5 Компьютерная система прогноза последствий аварий	110
5.1 Объектно-ориентированный дизайн	111
5.2 Архитектура системы	113
5.3 Подсистема «Источники»	113
5.3.1 Модуль «Пролив»	114
5.3.2 Модуль «Боеприпас»	115
5.3.3 Модуль «Пожар»	116
5.4 Подсистема «Атмосфера»	118
5.4.1 Архитектура	118
5.4.2 Объектная модель	119
5.4.3 Численный метод	120
5.4.4 Алгоритм параллельных вычислений	122
5.4.5 Тестирование численного алгоритма. Задача Сеттона	126
5.5 Подсистема «Риск»	128
5.5.1 Архитектура	128
5.5.2 Объектная модель	129
5.5.3 Алгоритм параллельных вычислений	133
5.6 Заключительные замечания	135
Часть 2. Приложение теории аварийного риска	137
Глава 6 Оценка риска хранения и утилизации боевых отравляющих веществ	139
6.1 Общие сведения	140
6.2 Сценарии аварийных ситуаций и схема расчета	143
6.3 Прогноз последствий «взрыва»	145
6.3.1 Частота возникновения аварии	145
6.3.2 Параметры источников химической опасности	147
6.3.3 Характеристики уровня опасности	151

6.3.4	Количественная оценка уровня опасности	155
6.4	Прогноз последствий «пожара»	160
6.4.1	Частота возникновения аварии	161
6.4.2	Характеристики источников химической опасности	163
6.4.3	Количественная оценка уровня опасности	167
6.5	Прогноз последствий «пролива»	170
6.5.1	Частота возникновения аварии	170
6.5.2	Параметры источника опасности	172
6.5.3	Оценка уровня опасности	173
6.6	Оценки аварийного риска	175
6.7	Влияние места размещения объекта	180
6.8	Заключительные замечания	187
Глава 7	Предварительная оценка уровня опасности от проектируемого комплекса по утилизации ракетных двигателей твердого топлива	189
7.1	Частотные характеристики аварий	190
7.2	Характеристики источников опасности	192
7.2.1	Источник токсической опасности	192
7.2.2	Источник опасности при гипотетическом взрыве	194
7.3	Оценка токсического воздействия	194
7.4	Оценка воздействия ударной волны взрыва	196
7.5	Характеристики уровня потенциальной опасности	198
7.5.1	Алгоритм расчета аварийного риска	198
7.5.2	Условные оценки аварийного риска	198
7.5.3	Итоговая оценка риска	202
7.5.4	Сравнительная оценка аварийного риска	204
7.6	Заключение	206
Литература		207
Основные обозначения и сокращения		215
Список иллюстраций		217
Список таблиц		218

Количественная оценка риска
химических аварий

**Под редакцией
В. М. Колодкина**

Лицензия ЛР № 020411 от 16.02.97.
Сдано в производство 16.07.01.
Формат 70 × 100¹/₁₆. Печать офсетная.
Уч. изд. л. 14,25. Усл. печ. л. 18,38.
Заказ № 5126. Тираж 100 экз.

Издательский дом «Удмуртский университет»,
426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1, корп. 2.
Факс: 8(3412) 75-21-55; e-mail: bus@uni.udm.ru,
internet: <http://www.uni.udm.ru/pubhouse>.

Отпечатано с готовых пленок в
Ижевской Республиканской типографии,
426057, г. Ижевск, ул. Пастухова, 13.

УДМУРТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



Институт исследования природных и техногенных катастроф

Направления деятельности:

- Теория аварийного риска. Оценка и управление риском.
- Компьютерное моделирование физических процессов.
- Ситуационное моделирование аварий и катастроф.
- Современные информационные и вычислительные технологии (ГИС - технология, параллельные вычисления).

Прикладные аспекты:

- Разработка и экспертиза декларации безопасности.
- Оценка воздействия на окружающую среду при авариях и катастрофах.
- Консультационные услуги в области экологической безопасности.

426034, Россия, г. Ижевск,
ул. Университетская 1, корп. VI.
Тел./факс: **8(3412) 75-38-31**
e-mail: intd@wing.uni.udm.ru

Посетите наш сервер в Интернет!

<http://intd.uni.udm.ru>