

Федеральное агентство по образованию
ГОУВПО «Удмуртский государственный университет»
Институт исследования природных и техногенных катастроф

В.М.Колодкин

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ
АВАРИЙ И РИСКОВ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Ижевск 2008

УДК 351.862:51 (075.3)

ББК 68.903в631я73-1

К 61

Рецензенты: доктор технических наук, профессор
Н.П. Кузнецов,
доктор технических наук, профессор
В.П. Иванников.

Колодкин В.М.

К 61 Прогнозирование последствий аварий и рисков: Учеб.
пособие / УдГУ. Ижевск, 2008. 123 с.

В пособии рассмотрены математические модели и методы прогнозирования последствий аварий и рисков. Особое внимание уделено математическим моделям и методам прогнозирования последствий химических аварий и взрывов. Приведены примеры численной и программной реализации моделей. Обсуждаются проблемы создания WEB сервиса прогнозирования и управления аварийными рисками.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям: «Защита в условиях ЧС», «Математическое моделирование».

УДК 351.862:51 (075.3)

ББК 68.903в631я73-1

ISBN 5-7659-0383-5

© В.М. Колодкин, 2008

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙ	14
1.1.Классификация математических моделей	14
1.2.Устойчивость решения математической модели	16
1.3.WEB-сервис прогнозирования последствий аварий и рисков	21
1.4.Вопросы для проверки	23
1.5.Список литературы к главе 1	23
2.ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ АВАРИЯХ И КАТАСТРОФАХ	25
2.1.Общие сведения	25
2.1.1.Классификация моделей атмосферного переноса	26
2.2.Эмпирическая модель атмосферного переноса	27
2.2.1.Пример использования модели атмосферного переноса	33
2.3.Модель Института экспериментальной метеорологии	44
2.4.Модели переноса и диффузии примеси	45
2.5.Вопросы для проверки	49
2.6.Список литературы к главе 2	49

3.ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ВЗРЫВОВ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ	51
3.1.Общие сведения	51
3.1.1.Химические взрывы	52
3.1.2.Ядерные взрывы	56
3.1.3.Физические взрывы	58
3.1.4.Вопросы для проверки	58
3.2.Взрывы конденсированных взрывчатых веществ	59
3.2.1.Математическая модель точечного взрыва	59
3.2.2.Оценка последствий точечного взрыва	64
3.2.3.Примеры решения задач	70
3.2.4.Задачи для самостоятельного решения	78
3.3.Список литературы к главе 3	79
4.ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ОБЪЕМНЫХ ВЗРЫВОВ	80
4.1.Общие сведения о газопаровоздушных смесях	80
4.2.Детонация газопаровоздушной смеси	84
4.2.1.Примеры решения задач	87
4.2.2.Задачи для самостоятельного решения	95
4.3.Методика прогнозирования последствий взрывов топливно-воздушных смесей	95
4.3.1.Прогнозирование режима взрывного превращения	97
4.3.2.Расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных ударных волн	102
4.3.3.Определение дополнительных характеристик взрыва ТВС	104
4.4.Оценка поражающего воздействия	106

4.5.Примеры решения задач	111
4.6.Задачи для самостоятельного решения	115
4.7.Список литературы к главе 4	116
5.ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ОГНЕННОГО ШАРА	117
5.1.Характеристики теплового излучения	117
5.2.Оценки последствий теплового излучения	119
5.3.Примеры решения задач	120
5.4.Задачи для самостоятельного решения	121

Введение

Аварии и катастрофы последних лет показывают, что угрозы устойчивому развитию становятся многофакторными, взаимно влияющими друг на друга. Угрозы приобретают комплексный характер и требуют для своего разрешения и нейтрализации системного научного подхода.

В настоящее время развитие фундаментальных наук достигло необходимого уровня для содержательного анализа этой области и исследователями констатируется факт рождения новой точной науки – математической теории безопасности и риска. Эта теория – направление математического моделирования, ориентирована на развитие моделей и методов анализа безопасности, связанных с техническими системами, природными и техногенными объектами. Конечная цель анализа безопасности – определение условий и пространственно-временных ограничений, при которых техническая система или объект удовлетворяет критериям безопасности.

Аварии и катастрофы, имевшие место на техногенных объектах, привели к пересмотру общепринятой в России концепции безопасности, связанной с техногенными объектами. Согласно этой концепции право на существование имели объекты, которые безопасны с точки зрения воздействия на людей и на окружающую природную среду. Принцип безопасности, как условие существования техногенных объектов, господствовал в общественном сознании. Аварии и катастрофы, анализ их объективных предпосылок и последствий для человека и окружающей среды, упускались из рассмотрения, что соответствовало концепции полной безопасности.

Процесс пересмотра концепции активизировался после аварии на Чернобыльской АЭС. Пришло понимание, что любой даже самый совершенный техногенный объект не защищен от аварий. Любой техногенный объект является носителем

определенного уровня опасности. В сознании людей стала превалировать новая концепция, согласно которой право на существование имеют объекты для которых, порождаемый ими уровень опасности, выраженный в оценках риска, не превышает определенной величины. В общественном сознании концепция полной безопасности, заменилась концепцией предельного уровня риска.

Концепция предельного уровня риска первоначально разрабатывалась применительно к объектам атомной энергетики. 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 результаты прогнозирования оценок риска объектов атомной энергетики. Исследования "по Расмуссену" стали стандартной процедурой, проводимой на этапе проектирования техногенных объектов. К настоящему времени концепция предельного уровня риска во многих странах Западной Европы, Америки получила не только общественное признание, но и законодательное оформление.

Изменение концепции вызвало потребность в измерении уровня опасности, в численном выражении уровня опасности, связанного с техногенным объектом, с целью управления уровнем опасности, управления величиной риска. Управление величиной риска предполагает поиск технологических, конструкторских, архитектурных, организационных и других решений, обеспечивающих снижение величины риска до приемлемого уровня.

Численное выражение уровня опасности

Обычно уровень опасности, порождаемый техногенным объектом, функционирующим в штатном, предусмотренном проектом режиме, несравненно ниже уровня опасности, который

представляет объект, если на объекте возникает нештатная, аварийная ситуация. Соответственно, и оценки аварийного риска обычно имеют большие значения, чем оценки риска, отражающие уровень опасности от объекта, функционирующего в штатном режиме. Различие оценок обычно бывает настолько большим, что именно оценки аварийного риска принимаются за меру уровня опасности, порождаемой техногенным объектом.

В общем случае, оценка аварийного риска, может быть представлена в виде:

$$\boxed{\begin{array}{c} \text{Оценка} \\ \text{аварийного} \\ \text{риска} \end{array}} = \sum_z \boxed{\begin{array}{c} \text{Частота } z\text{-го} \\ \text{аварийного} \\ \text{процесса} \end{array}} * \boxed{\begin{array}{c} \text{Ущерб} \\ \text{(потери) при} \\ z\text{-ом} \\ \text{аварийном} \\ \text{процессе} \end{array}}$$

Суммирование производится по всей совокупности аварийных сценариев, которые теоретически могут иметь место на техногенном объекте. Из приведенного соотношения следует, что прогноз уровня аварийной опасности имеет два аспекта - аспект, связанный с частотным анализом возможных аварийных процессов, и аспект, связанный с прогнозом ущерба при аварии.

Прогнозируемое значение частоты аварийных процессов определяется:

- частотой событий, инициирующих аварийный процесс;
- вероятностью развития аварийного процесса по определенному сценарию, зависящему от имманентных свойств объекта;
- 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 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, экспертные оценки и т.д.

Что лежит в основе прогнозирования величины ущерба при авариях и катастрофах на техногенных объектах? Как и всякий прогноз, он может быть построен с использованием различных подходов. Например, на базе обработки статистического материала по последствиям аварий и катастроф на промышленных объектах, либо на основе экспертных оценок и т.д. Однако, указанные подходы применимы для прогнозирования последствий, в основном, типовых аварийных ситуаций на типовых техногенных объектах.

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

Действительно, процесс возникновения и развития источника опасности при антропогенной катастрофе, 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 высокотоксичных веществ)

проведение крупномасштабных экспериментальных работ по определению последствий аварий затруднено, методы, основанные на компьютерном моделировании, являются определяющими при прогнозе последствий аварий.

Критерии безопасности

Человек, как элемент экосистемы, признается наиболее чувствительным (критическим) ее элементом. Это установлено экспериментально для случаев токсических воздействий (об этом, например, свидетельствуют коэффициенты видовой выносливости при воздействии токсикантов, – он самый маленький среди животных у собак - 1.44 и у человека - 0.57). Поэтому в качестве цели при разработке критериев безопасности эксплуатации опасного объекта может быть выбрано сохранение здоровья людей, как при нормальном функционировании, так и при производственных авариях, связанных с ошибками персонала, отказами оборудования, техногенными и природными воздействиями на объект. При таком подходе в качестве критериев безопасности рассматриваются санитарно-гигиенические показатели, характеризующие опасность воздействий и основанные на концепции приемлемого риска для человека (как критического элемента биоты).

Пороговое значение интенсивности опасного воздействия, как правило, задается при вероятности летального исхода 50%. Оно определяет размер опасной зоны, нахождение в которой в момент аварии может повлечь гибель большей части людей.

Другим значением интенсивности опасного воздействия является порог, который соответствует выживанию людей после аварии, т.е. обратимому воздействию (не исключаются излечимые заболевания даже в острой форме). Он определяет размер опасной зоны, нахождение в которой в момент аварии не грозит гибелью людей, хотя и может привести к длительной утрате их трудоспособности.

Наконец, третьим значением интенсивности воздействия является безопасный уровень, который соответствует отсутствию изменений состояния здоровья людей. Он определяет размер зоны, находясь вне которой не представляет опасности для людей.

Концепция приемлемого риска

Концепция приемлемого риска опирается на представления, что человек является наиболее чувствительным элементом биоты. Концепция состоит в следующем:

- люди в разных странах интуитивно приемлют те виды практической деятельности, где риск гибели отдельных лиц из населения не превышает пренебрежимо низкого значения порядка 10^{-5} 1/год. Такой риск находится на уровне 0.1% от величины естественного риска смерти для населения. Предполагается, что этот риск не будет превышен как при нормальных условиях эксплуатации объекта, так и при проектных авариях для отдельных лиц из населения и для персонала, работающего вне зоны промышленной площадки объекта;
- персонал промышленных предприятий приемлет те виды производственной деятельности, где индивидуальный риск гибели находится в диапазоне от 10^{-2} до 10^{-5} 1/год. Приемлемый средний уровень риска гибели в процессе производственной деятельности в промышленно развитых странах равен $2.5 \cdot 10^{-4}$ 1/год. Предполагается, что этот средний уровень риска не будет превышен для персонала, работающего на объекте, как при нормальных условиях его эксплуатации, так и при проектных авариях.
- социальный риск, который является интегральным усредненным риском гибели людей при всех возможных авариях, считается приемлемым, если не превышает 10^{-3} чел/год, а если воздействию подвергаются детские учреждения или/и пансионаты, - не превышает 10^{-4} чел/год. Он определяется как сумма произведений числа

возможных жертв, т.е. летальных мгновенных или вследствие заболеваний исходов и значимых наследственных отклонений, при отдельных авариях на их вероятные частоты.

На рисунке 0.1 представлены предельные значения индивидуального риска, значения которых, рекомендуются для России Научным обществом анализа риска. На рисунке 0.2 представлены предельные значения социального риска, принятые для Нидерландов. Там же показаны значения, которые рекомендуются для детского и взрослого населения России. Отметим, что в России нет предельных значений уровня риска, которые были бы приняты на законодательном уровне.

В настоящее время по проблеме прогнозирования последствий аварий и рисков издано большое количество научной литературы: монографий, статей. Эта литература не в достаточной мере доступна студентам. Данное учебное пособие призвано в какой-то степени восполнить пробел в учебной литературе по данной теме. Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям: «Защита в условиях ЧС», «Математическое моделирование».

Функционирующий объект Вновь строящийся объект

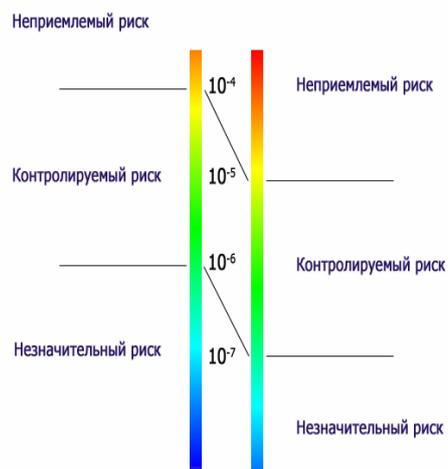


Рис.0.1. Предельные значения индивидуального риска

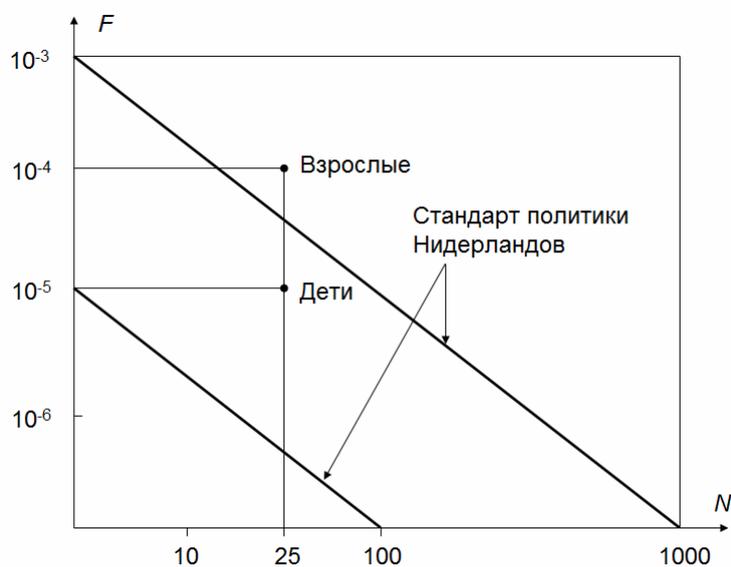


Рис.0.2. Предельные значения социального риска

1. Основы математического моделирования и прогнозирования последствий аварий

1.1. Классификация математических моделей

Под прогнозированием и математическим моделированием катастроф понимается процесс изучения явления с применением математических моделей [1-6].

Математическая модель – это “приближенное описание какого-либо класса явлений внешнего мира, выраженное с помощью математической символики”. Алгоритм моделирования состоит из следующих взаимосвязанных этапов:

- Предварительное исследование проблемы, формирование гипотез, выбор и обоснование направления исследований.
- Проведение физических оценок или экспериментов и создание физической модели, которая отвечает причинно-следственным связям.
- Разработка или выбор математической модели явления и математическая постановка задачи.
- Выбор или разработка аналитической или численной методики решения поставленной задачи, программирование, отладка и тестирование программ.
- Проведение вычислительного эксперимента – численное решение, анализ полученного решения, корректировка модели, оценка степени адекватности результатов моделирования и исследуемого явления, путем сравнения результатов моделирования с известными экспериментальными данными.
- Исследование явления на основе отработанной математической модели.

При математическом моделировании используются следующие типы математических моделей:

- детерминированные;
- вероятностные;

- смешанные (детерминированно-вероятностные);
- имитационные.

Детерминированные модели. Детерминированной математической моделью называется совокупность уравнений и соответствующих краевых условий, адекватно описывающих изучаемое явление. Уравнения модели выражают законы природы – закон сохранения массы, энергии, импульса и т.д.

Основная цель детерминистического математического моделирования – определение параметров состояния окружающей среды (температура, плотность, скорость, концентрация компонентов и др.) в различных точках пространства в различные моменты времени.

Детерминистические модели разделяются:

- по степени охвата причинно-следственных связей, присущих исследуемому явлению или группе физико-химических явлений, на общие, частные и оптимальные;
- по размерности на нульмерные, одномерные, двумерные и трехмерные;

и т.д.

Вероятностные модели. При использовании вероятностных моделей, в основе которых лежит теория вероятности, основная задача исследователя состоит в установлении связи между условиями и событием. В технике впервые вероятностные модели стали применяться в атомной промышленности, где был разработан вероятностный критерий безопасности. В дальнейшем методы теории вероятности стали применяться для прогноза лесной пожарной опасности.

Смешанные математические модели. Наиболее плодотворное исследование катастроф и их последствий осуществляется в рамках смешанных математических моделей. В рамках смешанных моделей оценивается вероятность реализации аварийного сценария (вероятностные модели) и для наиболее вероятных реализаций прогнозируются последствия аварий (детерминированные модели).

Имитационные модели. Имитационные модели – переложенные на программный продукт описание моделируемой системы. Имитационные модели не вскрывают механизма явления, а имитируют эти явления. Поэтому область определения этих моделей не выходит за границы наблюдений.

1.2. Устойчивость решения математической модели

Человек непроизвольно стремится к постоянству. Это стремление к устойчивости нашло свое отражение в науке XVIII века, когда создавалось классическое естествознание. Его основой стал математический язык дифференциального и интегрального исчисления; считалось, что все зависимости можно описывать непрерывными функциями, для которых характерно небольшое изменение значения функции при малых приращениях аргументов. Казалось бы, логично: приложено чуть больше усилий - получен чуть больший результат... Более того, если математические модели не отвечали этим условиям, то они считались некорректными, а значит, лишеными реального содержания.

Научная и инженерная мысль открыла множество примеров скачкообразного изменения системы при малых воздействиях, но, как ни странно, на наши представления об окружающем мире до недавнего времени это почти не влияло. Лишь в XX веке появились работы, в которых было показано, что такие неустойчивости столь же реальны, как и состояния гармонии.

Пример дифференциального уравнения первого порядка

$$\frac{dx}{dt} = kx \quad \Rightarrow \quad x = c_1 \exp(kt). \quad (1.1)$$

Уравнение и соответствующее решение (1.1), например, описывает изменение численности населения в стране, где рождаемость и смертность постоянны и не зависят от времени.

Значение постоянной c_1 определяется из начальных условий. Так как уравнение первого порядка, то достаточно одного условия.

Пусть в начальный момент времени население составляет 10 миллионов человек, то есть $x(0) = 10^7$, тогда $c_1 = 10^7$ и закон изменения населения

$$x = 10^7 \exp(kt).$$

Начальному условию $x(0) = 10^7$ удовлетворяет решение $x = 10^7 \exp(kt)$. Однако на практике начальные условия точно неизвестны. Но малое отклонение в начальных условиях может привести к большим отклонениям в решении. Действительно, положим, что начальное условие определено с точностью 10^{-4} , то есть $x(0) = 10^7 \pm 10^3$, то уже при $kt = 10$ значение $x = 2.2 \cdot 10^7$. Погрешность будет нарастать по экспоненциальному закону.

Пример дифференциального уравнения второго порядка

Уравнение, описывающее колебание маятника

$$x'' + a \cdot x' + b \cdot x = 0 \quad \Rightarrow D = \frac{d}{dt} \Rightarrow (D^2 + aD + b)x \quad (1.2)$$

Общее решение уравнения (1.2)

$$x = \exp(-at/2) \cdot (c_1 \sin \sqrt{b - a^2/4} \cdot t + c_2 \cos \sqrt{b - a^2/4} \cdot t) \quad (1.3)$$

включает две постоянные, которые определяются из начальных условий

$$x(0) = x_0; \quad x'(0) = x_1. \quad (1.4)$$

Решение (1.3) показывает, что при $a > 0$ и $b > a^2/4$ законом движения маятника являются постепенно затухающие колебания с частотой $\sqrt{b - a^2/4}$.

Дифференциальное однородное уравнение с постоянными коэффициентами может быть записано в виде

$$(a_n D^n + a_{n-1} D^{n-1} + \dots + a_0)x = 0. \quad (1.5)$$

Его решения зависят от характеристического полинома

$$a_n \lambda^n + a_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + a_0. \quad (1.6)$$

Если все корни характеристического полинома вещественны и различны, то общее решение уравнения запишется в виде

$$x = c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 e^{\lambda_2 t} + \dots + c_n e^{\lambda_n t} \quad (1.7)$$

Если среди корней полинома (1.6) имеются комплексные, то они могут входить только сопряженными парами

$$\lambda_{i,i+1} = \alpha \pm j\beta \quad j = \sqrt{-1}.$$

Каждой паре комплексных корней в общем решении будет соответствовать член вида

$$e^{\alpha t} (c_i \sin \beta_i t + c_{i+1} \cos \beta_i t).$$

Если среди корней полинома будут кратные корни, то в решении могут появиться члены вида

$$c_i t^m e^{\lambda_i t}.$$

Если все корни характеристического полинома имеют отрицательные вещественные части, то любое решение при любых начальных условиях с течением времени будет стремиться к нулю. Соответственно и разность между двумя решениями, отвечающими разным начальным условиям будет стремиться к нулю.

Полиномы, у которых все корни имеют отрицательные вещественные части, называются гурвицевыми полиномами (по имени немецкого математика А.Гурвица, который нашел соответствующие условия для полиномов). Например, полиномы второй степени

$$a_2 \lambda^2 + a_1 \lambda + a_0$$

будут гурвицевыми, если все их коэффициенты положительны.

Полиномы третьей степени

$$a_3 \lambda^3 + a_2 \lambda^2 + a_1 \lambda + a_0$$

будут гурвицевыми, если все их коэффициенты положительны и $a_2 a_1 > a_3 a_0$.

Для полиномов высоких степеней условия более сложные. Вместе с тем, существует необходимое условие, что полином является гурвицевыми и, следовательно, решение дифференциального уравнения является устойчивым – среди

коэффициентов полинома нет отрицательных коэффициентов или равных нулю.

Погрешность решения

Рассмотрим уравнение и решение

$$x + x = 0, \quad x(0) = 0 \Rightarrow x = c_1 e^{-t} \quad (1.8)$$

Продифференцируем уравнение и решим с согласованными условиями:

$$x + x = 0, \quad x(0) = 0, \quad x'(0) = 0, \quad P(\lambda) = \lambda^2 + \lambda, \quad \lambda_1 = 0, \quad \lambda_2 = -1.$$

Решение:

$$x = c_1 + c_2 e^{-t}. \quad \text{С учетом начальных условий, имеем } x = 0.$$

Умножим уравнение (1.8) на D-1:

$$(D+1)x = 0 \quad *(D-1) \rightarrow (D^2 - 1)x = 0.$$

Корни характеристического уравнения $\lambda_1 = -1, \lambda_2 = 1$. Общее решение $x = c_1 e^{-t} + c_2 e^t$. (1.9)

При заданных начальных условиях $x=0$, то есть решение совпадает с решением уравнения (1.8).

Однако решение неустойчиво. Положим $x(0) = \delta_1, x'(0) = \delta_2$.

На основании (1.9)

$$c_1 = \frac{1}{2} * (\delta_1 - \delta_2), \quad c_2 = \frac{1}{2} * (\delta_1 + \delta_2) \quad \text{и, следовательно,}$$
$$x = 0.5 (\delta_1 - \delta_2) e^{-t} + 0.5 (\delta_1 + \delta_2) e^t.$$

То есть отклонение от решения $x=0$ будет неограниченно возрастать с течением времени.

На практике недостаточно, чтобы система была просто устойчива, необходимо, чтобы система была устойчивой при вариациях параметров, то есть была бы устойчивой в некоторой области изменения параметров.

Эквивалентные преобразования уравнений (систем уравнений) обязаны не изменять решения исходных уравнений (систем уравнений), но не обязаны сохранять неизменность свойств окрестностей. Поскольку свойство сохранения устойчивости при вариациях параметров является свойством

окрестности, оно может появляться и исчезать при эквивалентных преобразованиях уравнений.

Характерные черты аварий, возникающих в системах, способных терять устойчивость при вариациях параметров определенного знака:

- При дрейфе параметров системы в момент перехода параметра в опасный интервал в характеристическом полиноме системы появляется большой положительный корень. Авария развивается стремительно в виде отказа системы.

- Если система не разрушилась (была вовремя отключена) то она может перейти в нормальное состояние. То есть идентификация ситуации будет затруднена.

Пример возможной потери устойчивости.

Авария аэробуса А-310 22 марта 1994 года над городом Междуреченском. Самолет летел под управлением автопилота, перейти в режим ручного управления не успели, так как место пилота в этот момент занимал ребенок.

Аварийная ситуация вблизи Бухареста с аэробусом А-310. Но пилоты успели перейти на ручное управление.

1.3. WEB-сервис прогнозирования последствий аварий и рисков

Задачи риск-анализа природных и технических систем, а также сопутствующие задачи моделирования развития аварий и их последствий являются сложными, в том числе и в вычислительном плане. Высокая трудоемкость задач обуславливает применение высокопроизводительных вычислительных платформ, развитие масштабируемых алгоритмов и программных комплексов [7-9].

С другой стороны, развитие коммуникационных каналов и сети Интернет привело к смещению акцентов в разработке прикладного программного обеспечения с ограниченных настольных продуктов к сервис-ориентированной Программной системе, интегрирующей математические модели катастрофических процессов и прогнозирования рисков. Система призвана обеспечить прозрачный доступ к высокопроизводительным моделям, а также устойчивую открытую платформу для создания банка данных моделей аварийных процессов, прогнозирования последствий аварий и рисков.

Архитектура Системы включает несколько функциональных подсистем: информационную, вычислительную, управляющую, обучающую, клиентскую.

Информационная подсистема – логическая совокупность хранилищ разнородных данных (исходные данные по физико-химическим свойствам, характеристик окружающей среды, распределения реципиентов и др.). Подсистема реализована в виде СУБД, сетевого файлового хранилища и прикладного программного интерфейса для доступа к данным.

Вычислительная подсистема – логическая совокупность процессорных единиц (например, сегмент кластера) и параллельного программного обеспечения, предназначенная для решения вычислительных задач.

Управляющая подсистема – сервер приложений, интегрирующий работу системы как целого и предоставляющий удаленный доступ посредством Интернет к вычислительному ядру. Кроме того, на управляющую подсистему возложены задачи по автоматическому распределению задач по имеющимся аппаратным вычислительным ресурсам.

Обучающая подсистема включает совокупность мультимедийных учебных модулей и модулей методической поддержки, реализующих учебный курс «Прогнозирование последствий аварий и рисков»:

- структурированный по темам, по подразделам тем, по урокам тематический план, построенный по модульному принципу, обеспечивающий индивидуально-ориентированный образовательный процесс;
- вариативные тематические электронные мультимедийные учебные модули трех типов: (И) – получение информации, (П) – учебный проект, (К) – контроль уровня учебных достижений обучаемого;
- комплект модулей методической поддержки, включающих алгоритмы использования учебных модулей (манифест SCORM), методические рекомендации для преподавателя и обучаемого;
- система дистанционного образования (серверное приложение);

Клиентская подсистема обеспечивает интерфейс пользователя и представляет собой набор представлений и редакторов исходных, управляющих, промежуточных и результирующих данных системы.

Функциональное назначение WEB-сервиса прогнозирования последствий аварий и рисков:

- прогнозирование рисков в отношении человека, природной среды;
- оценка эффективности систем защиты человека и территории в условиях ЧС;

- поддержка принятия решений в условиях ЧС на опасных производственных объектах;
- формирование паспорта безопасности объекта и территории;
- визуализация последствий аварий и мер по защищенности людей и территорий;
- обучение специалистов и студентов ВУЗов.

Математические модели и методы прогнозирования последствий аварий являются общей частью задач, решаемых в рамках WEB-сервиса.

1.4. Вопросы для проверки

- Какие типы математических моделей используются при прогнозировании последствий аварий?
- Цели и задачи математического моделирования аварий и катастроф.
- Этапы вычислительного эксперимента.
- Устойчивые и неустойчивые решения. Связь неустойчивых решений с авариями и катастрофами.
- Необходимое условие устойчивости решений уравнений математической модели.

1.5. Список литературы к главе 1

1. Колодкин В.М., Мурин А.В., Петров А.К., Горский В.Г. Количественная оценка риска химических аварий. Ижевск, Изд-во Удм. Ун-та. 2001. – 218 с.
2. Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф. Томск. Издательство Томского университета, 2003, Часть I 522 с.

3. Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф. Кемерово Издательство Практика, 2005, Часть II 559 с.
4. Малинецкий Г.Г. Управление риском. Москва: Наука, 2000, 431 с.
5. Шокин Ю.И., Лепихин А.М. Математическое моделирование в задачах риск-анализа технических систем // Вычислительные технологии. 2003. Том 8. С. 14-21
6. Колодкин В.М., Княжин В.С., Варламов Д.В., Васильев И.А., Александрович А.Н., Пахомов С.В., Князев Г.П., Гараев М.М., Огородников П.Г., Маслова Т.С., Малых Д.М. Прогнозирование последствий аварий на объектах уничтожения химического оружия. Ижевск 2006, 42 с.
7. Колодкин В.М., Княжин В.С., Князев Г.П., Васильев И.А., Габдуллин В.М., Гараев М.М., Александрович А.Н., Огородников П.Г., Пупышев В.В., Новоселова Т.С., Титова А.С. Прямой доступ к результатам прогнозирования последствий аварий на объектах уничтожения химического оружия. Ижевск 2006, 34 с.
8. Колодкин В.М., Князев Г.П., Варламов Д.В., Княжин В.С., Васильев И.А. WEB-сервис прогнозирования последствий аварий и рисков. «Проблемы безопасности критических инфраструктур территорий и муниципальных образований», Екатеринбург 2007, с.12.
9. В.М.Колодкин. Высокопроизводительный WEB-сервис прогнозирования последствий химических аварий и рисков. Материалы международного семинара «Предупреждение и устранение последствий химически опасных чрезвычайных ситуаций, обусловленных терроризмом и промышленными авариями», Санкт-Петербург 2007, с.379-388.

2. Прогнозирование загрязнения приземного слоя атмосферы при авариях и катастрофах

2.1. Общие сведения

Моделям и методам прогнозирования загрязнения приземного слоя атмосферы при авариях и катастрофах посвящено значительное количество теоретических и экспериментальных работ. Краткий обзор этих работ представлен в [1-2]. Несмотря на определенные успехи в области разработки моделей распространения примеси в атмосфере в настоящее время не представляется возможным остановиться на какой-то одной модели. Это связано с многообразием атмосферных ситуаций, которые, в основном, определяют поведение примеси в атмосфере.

После попадания примеси в атмосферу, характер перемещения примеси определяется ее собственными физическими свойствами и свойствами атмосферы. Аварийные выбросы проникают в атмосферу с определенной скоростью и температурой, которые обычно отличаются от соответствующих характеристик окружающей среды. Движение выбросов имеет вертикальную составляющую, обусловленную начальной вертикальной скоростью потока и разницей температур, до тех пор, пока не исчезнет воздействие этих факторов. Если выброс кратковременный – то его называют термиком (часть выброса, отличающаяся по свойствам от окружающей атмосферы), в противном случае – шлейфом. Соответственно, строятся модели подъема термика, и модели подъема шлейфа. На путь распространения выброса воздействуют также изменения потоков вблизи препятствий.

Движение примеси и газовой фазы при выбросе под действием ветра называется переносом.

Турбулентное движение атмосферы вызывает произвольное движение выброса, приводящее к его распространению в

горизонтальном и вертикальном направлениях за счет смещения с воздухом. Этот процесс называется атмосферной диффузией.

Комбинация переноса и диффузии называется атмосферной дисперсией. Модели, описывающие эти процессы, называют моделями атмосферного переноса-диффузии или моделями атмосферной дисперсии.

2.1.1. Классификация моделей атмосферного переноса

Сложность описания процесса распространения примеси в изменяющейся атмосфере порождает разнообразие признаков для классификации моделей. Во-первых, можно разделить модели по признаку эмпирического или теоретического характера. Строго говоря, во всех моделях присутствуют оба начала. Классическими образцами эмпирических моделей являются модели созданные в Институте экспериментальной метеорологии [2], модели созданные Паскуиллом и Гиффордом [3]. По сути эмпирическими являются и модели, созданные в ГГО [4],[5]. Хотя при изложении их научных оснований [6] и используются общие представления о пространственной турбулентной диффузии, они при конкретизации переходят в формулы, аналогичные [3].

Фундаментальные теоретические модели в настоящее время используются для научных целей.

В практических расчетах широко используются полуэмпирические модели. Примером является модель, созданная в Институте экспериментальной метеорологии [2]. В таких моделях эмпирика дополнена развитым математическим аппаратом, что позволяет объединять результаты разнородных экспериментов, например метеорологических и диффузионных.

Вторым признаком для классификации является степень учета в модели физических процессов.

Третьим признаком для классификации является тип используемого математического аппарата. В эмпирических моделях обычно используются явные выражения для искомых

характеристик. Полуэмпирические модели содержат уже процедуры численного решения дифференциальных уравнений в частных производных. Теоретические же модели чрезвычайно разнообразны по аппарату: от теории подобия и чисто аналитических выкладок [7] до численного решения уравнений мезометеорологии с диффузией и трансформацией примесей.

Возможны и другие признаки, лежащие в основе классификации моделей, например стационарные и нестационарные и т.д.

В данной работе, следуя обзору МАГАТЭ [8], в котором представлены модели распространения примесей в атмосфере для оценки последствий аварий на объектах атомной энергетики, выделены три типа моделей: гауссовские (эмпирические) модели, модели лагранжева облака и трехмерные модели.

2.2. Эмпирическая модель атмосферного переноса

В разделе рассмотрена математическая модель [9], используемая для описания поведения выбросов в атмосфере на расстоянии по ветру до 10-20 км от источника. Ограничение связано с тем, что по мере увеличения расстояния масштабы распространения выброса в вертикальном направлении становятся сравнимыми с толщиной планетарного пограничного слоя, и обычные предположения об однородности не позволяют использовать упрощенные модели.

Концентрационное поля поллютанта, порождаемого мгновенным точечным источником в атмосфере, может быть описано выражением

$$c(x, t) = \frac{M}{(2\pi)^{3/2} \sigma_{(1)}(u_1 t) \sigma_{(2)}(u_1 t) \sigma_{(3)}(u_1 t)} * \exp \left[-\frac{(x_1 - u_1 t)^2}{2\sigma_{(1)}^2(u_1 t)} - \frac{x_2^2}{2\sigma_{(2)}^2(u_1 t)} \right] *$$

$$* \left\{ \exp \left[-\frac{(x_3 - x_{30})^2}{2\sigma_{(3)}^2(u_1 t)} \right] + \exp \left[-\frac{(x_3 + x_{30})^2}{2\sigma_{(3)}^2(u_1 t)} \right] \right\} \cdot f_p(t) \cdot f_{oc}(t).$$

Эта зависимость отражает распределение поллютанта в пространстве и изменение во времени при следующих условиях:

- масса поллютанта M выброшена из источника, находящегося в точке $(0,0, x_{30})$, мгновенно в момент времени $t=t_0=0$;

- ветер со скоростью u_1 направлен вдоль оси x_1 ;

- дисперсии $\sigma_{(i)}^2$ являются функциями аргумента $u_1 t$;

- $f_p(t), f_{oc}(t)$ - функции истощения облака, обусловленные соответственно химическим превращением поллютанта и оседанием, выражаются формулами

$$\left\{ \begin{array}{l} f_p(t) = e^{-kt}, \\ f_{oc}(t) = \exp \left\{ -\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{v_d}{u_1} \int_0^{u_1 t} \frac{d\beta}{\sigma_3(\beta) \cdot \exp[x_{30}^2 / 2\sigma_3^2(\beta)]} \right\}, \end{array} \right.$$

где k - константа скорости деградации поллютанта;

v_d - скорость оседания.

Дисперсии $\sigma_{(i)}^2$ в формуле (2.1), исходя из того, что объем облака поллютанта в начальный момент времени $t=0$ не равен нулю, можно записать в виде следующих выражений

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{(1)}^2(u_1 t) = \sigma_1^2(u_1 t) + \sigma_0^2, \\ \sigma_{(2)}^2(u_1 t) = \sigma_2^2(u_1 t) + \sigma_0^2, \\ \sigma_{(3)}^2(u_1 t) = \sigma_3^2(u_1 t) + \sigma_0^2, \end{array} \right.$$

где поправка σ_0 выражается формулой

$$\sigma_0 = [M / (2^{1/2} \cdot \pi^{3/2} \rho)]^{1/3},$$

где ρ - плотность паров поллютанта.

Важно отметить, что данная поправка введена как в дисперсии, входящие в сомножитель

$$\frac{M}{(2\pi)^{3/2} \sigma_{(1)}(u_1 t) \sigma_{(2)}(u_1 t) \sigma_{(3)}(u_1 t)},$$

так и в дисперсии, содержащиеся в показателях экспонент. В силу этого не нарушается условие материального баланса

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} c(x, t) dx_1 dx_2 dx_3 = 1.$$

В качестве дисперсионных зависимостей $\sigma_i^2(u_1 t)$ используем формулы Смита-Хоскера [9-11], которые отражают влияние на дисперсию расстояния центра клуба от источника, класса устойчивости атмосферы и параметра шероховатости подстилающей поверхности.

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{c_3 \cdot u_1 t}{\sqrt{1 + 0,0001(u_1 t)}},$$

где коэффициент c_3 зависит от категорий (классов) устойчивости атмосферы.

Таблица 2.1

Зависимость коэффициента c_3 от категорий (классов) устойчивости атмосферы

Категория (класс) устойчивости атмосферы	A	B	C	D	E	F
Значение c_3	0,22	0,16	0,11	0,08	0,06	0,04

Выражение для вычисления величины σ_3 :

$$\sigma_3 = F(u_1 t, Z_0) \cdot g(u_1 t),$$

$$\sigma_3 = \begin{cases} F(u_1 t, Z_0) \cdot g(u_1 t) & \text{при } F(u_1 t, Z_0) \cdot g(u_1 t) \leq \sigma_3^{\max}, \\ \sigma_3^{\max} & \text{при } F(u_1 t, Z_0) \cdot g(u_1 t) > \sigma_3^{\max}, \end{cases}$$

где σ_3^{\max} есть максимально возможное значение среднеквадратического отклонения σ_3 , которое задается таблицей.

Таблица 2.2

Максимально возможное значение величины σ_3

Категория (класс) устойчивости атмосферы	А	В	С	Д	Е	Ф
Значение σ_3	1600	920	640	400	220	100

$F(Z_0, u_1 t_0)$ - корректирующий фактор, учитывающий влияние шероховатости подстилающей поверхности; $g(u_1 t)$ - функция, отражающая влияние аргумента $u_1 t$ при разных категориях устойчивости атмосферы.

Функция $F(u_1 t, Z_0)$ представляется в виде

$$F(u_1 t, Z_0) = \begin{cases} \ln \left\{ c_1 (u_1 t)^{d_1} \left[1 + \left[c_2^* (u_1 t)^{d_2^*} \right]^1 \right]^1 \right\} & \text{при } Z_0 > 0,1 \text{ м,} \\ \ln \left\{ c_1 (u_1 t)^{d_1} \left[1 + c_2^* (u_1 t)^{d_2^*} \right]^1 \right\} & \text{при } Z_0 \leq 0,1 \text{ м.} \end{cases} \quad (2.10)$$

Численные значения коэффициентов c_1, d_1, c_2^* и d_2^* представлены в таблице [8],

Таблица 2.3

Коэффициенты функции $F(u, t, Z_0)$

Параметр шероховатости $Z_0, \text{м}$	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

Таблица 2.4

Значения коэффициентов a_1, a_2, b_1 и b_2

Категория (класс) устойчивости атмосферы	Значения коэффициентов			
	a_1	a_2	b_1	b_2
A	0,112	$5,38 \cdot 10^{-4}$	1,06	0,815
B	0,130	$6,52 \cdot 10^{-4}$	0,95	0,750
C	0,112	$9,05 \cdot 10^{-4}$	0,92	0,718
D	0,098	$1,35 \cdot 10^{-3}$	0,889	0,688
E	0,0609	$1,96 \cdot 10^{-3}$	0,895	0,684
F	0,0638	$1,36 \cdot 10^{-3}$	0,783	0,672

Функция $g(u_1t)$, фигурирующая в формуле (2.9) для вычисления σ_3 имеет вид:

$$g(u_1t) = \frac{a_1(u_1t)^{b_1}}{1 + a_2(u_1t)^{b_2}}.$$

Коэффициенты a_1 , a_2 , b_1 и b_2 зависят от категорий (классов) устойчивости атмосферы. Их численные значения представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.5

Значения параметров шероховатости при заданных скоростях ветра на высоте 2 м

Тип поверхности	Z_0 , м
Очень гладкая снежная или ледяная	10^{-5}
Гладкий снег на невысокой траве	$5 \cdot 10^{-5}$
Пустыня	$3 \cdot 10^{-3}$
Снежная при наличии кустарника	$1 \cdot 10^{-3}$
Скошенная трава с высотой среза 1,5 см 3 см 4,5 при $u_1 = 2$ м/с при $u_1 = 6-8$ м/с	$2 \cdot 10^{-3}$ $7 \cdot 10^{-3}$ $2,4 \cdot 10^{-2}$ $1,7 \cdot 10^{-2}$
Высокая трава (60-70 см) при $u_1 = 1,5$ м/с при $u_1 = 3,5$ м/с при $u_1 = 6,2$ м/с	$9 \cdot 10^{-2}$ $6,1 \cdot 10^{-2}$ $3,7 \cdot 10^{-2}$
Неоднородная, с чередованием участков, покрытых травой, кустарником, деревьями и т.п.	$1 \cdot 10^{-1}$
Лесонасаждения со средней высотой деревьев 10м, городская застройка	1

2.2.1. Пример использования модели атмосферного переноса

В данном разделе представлена программа расчета полей токсических нагрузок в атмосфере при разливе токсичной жидкости. Программа выполнена на языке Си.

```
// Расчет токсических нагрузок при проливе токсичной жидкости
// S пролива определяется по m из расчета толщины слоя 0.01 м.
// Учитывается симметрия задачи относительно оси y=0
// Интенсивность испарения рассчитывается по эмпирич. формуле
// При расчете учитывается:
//     Время усреднения концентрации,
//     Изменение дисперсии на малых расстояниях от источника
//     Расчеты:
// По веществам "GB" "GD" "VX" -
// По массе {50, 100, 500} -
// По температуре среды {-10,0,10,25} -
// По скорости ветра {1, 2, 4, 8, 10, 12, 20} -
// По устойчивости атм. {2,4,6} -

//=====
#include "stdafx.h"

const char* file_mis="mistake.dat";
// identification of mistake file
double Sigma1SX( double, double, int);
double Sigma3SX(double, double, int);
double Intension( double, int, double, int);
double Square(double, double, int);
double Citting_Station( double, double, double, double, double,
double);

//=====

void main()
{
char DP1[] = ".\\Spill_051228\\";
double Vwind0[]={1, 2, 4, 8, 10, 12, 20}; // ,m/c
double Mob, Mob0[] = {50, 100, 500}; // , kg
double Ts, Ts0[] = {-10,0,10,25}; // temperature, grag C
int K, K0[] = {2,4,6}; // category of stability
double Time_rez0[]={10, 300, 600, 900, 1200, 1500, 1800, 2100,
2400, 2700, 3000, 3300, 3600, 4200, 4800, 5400, 6000, 6600,
7200, 8100, 9000, 9900, 10800}; // , cek
```

```

int    Nx = 350, Ny =50, Nz = 1, Ny_buf, // N шагов по x, y, z
      Dy = 3,  Dz = 10,                // Область по Y,Z
      Dt = 30;
double He = 0.0,                        // height of ejection, m
      Hr = 1.5,                          // height of recipient of risk, m
      Z0 = 0.5,                          // parametr of roughness
      Llimit = 30000,                    // max of distance, m
      Hliq  = 0.01,                      // depth of liquid, m
      T_aver = 600;                      // Время усреднения, сек
char   MatterOB[3][3];
      strcpy(MatterOB[0], "GB");
      strcpy(MatterOB[1], "GD");
      strcpy(MatterOB[2], "VX");
double J0, J,                            // intension of evaporate, kg/(с*m3), kg/c
      S,                                  // square of overflow, m2
      R00;                                // Начальная точка расчета по x и y
int    N_cycle = 0,                       // Выполнено циклов по исходным данным
      N_start = 0;                       // Номер набора входных параметров
double Vwind, time_rez, time, time_fin;
double *x_coor, *y_coor, *z_coor, *C, *D;
double x, y, z, dx, dy, dz, dt, xp, dxp, ddt, ddd, Eps = 1.0e-
20 ;
double sigma, xfinis, yfinis, sigma3, h_const, zzk, SS, dd,
cl, c2;
int    i_t, n_t, i_Mob, n_Mob, i_M, i_V, n_V, i_K, n_K, i_T, n_T,
NN, N12, NN_buf, N12_buf;
int    i, j, k, ijk, k_rR, ndig;
char   str_x[8], str_nn[12], str_time[7], str_dd[10], str_xx[5],
str_yy[5], str_zz[5], str_NNb[8];
char   strU[6], strC[3], strT[6], strMassa[9], strM[3];
char   DirPath[80], DirPath0[80], DirPath00[80], DirPath1[80],
DirPath_Control[80], file_spill[80];
char   nf_Cont[80], nf_VTK_C[80], nf_VTK_D[80], nf_C[80],
nf_D[80];
FILE*  f_r, *f_C_VTK, *f_D_VTK, *f_rezult
char   nf_Cont_ext[] = ".txt",
nf_VTK_ext[] = ".vtk",
vtk1[] = "# vtk DataFile Version 3.0",
vtkx[256],
vtk3[] = "ASCII",
vtk4[] = "DATASET RECTILINEAR_GRID",
vtk5[] = "DIMENSIONS ",
vtk6[] = "X_COORDINATES ", vtkx_3[] = "DOUBLE",
vtk7[] = "Y_COORDINATES ",
vtk8[] = "Z_COORDINATES ",
vtk9[] = "POINT_DATA ",
vtk10[] = "SCALARS CONCENTRATIONS DOUBLE",

```

```

        vtk10D[] = "SCALARS DOSE DOUBLE",
        vtk11[] = "LOOKUP_TABLE default";

// Формирование имени директории и файла с результатами в
// формате VTK
strcpy( DirPath00, ""); // формирование имени директории
strcpy( DirPath00, DP1);
if (!CreateDirectory(DirPath00, NULL))
    {printf("Couldn't create new directory 0 =%s .", DirPath00);
return; }
strcpy(DirPath_Control, DirPath00);
strcat( DirPath_Control, "Control\\");
if (!CreateDirectory(DirPath_Control, NULL))
    {printf("Couldn't create new directory Control =%s .",
DirPath_Control); return; }
strcpy(file_spill, DirPath_Control);
strcat( file_spill, "000_Spill.txt");
strcat( DirPath00, "Spill\\");
if (!CreateDirectory(DirPath00, NULL))
    {printf("Couldn't create new directory 1 =%s .", DirPath00);
return; }

// Размещение массивов
{ NN = Nx*Ny*Nz; N12 = Nx*Ny; Ny_buf = 2*Ny-1; N12_buf =
Nx*Ny_buf; NN_buf = Nz*N12_buf;
x_coor = new double[Nx];
y_coor = new double[Ny];
z_coor = new double[Nz];
D = new double[NN];
C = new double[NN];
if ((x_coor == NULL)|| (y_coor == NULL) || (z_coor == NULL)|| (C ==
NULL) || (D == NULL) ) { printf("No memory for the array
coordinates");
f_r=fopen(file_mis,"w");
if (!f_r)
printf("Cannot open file the mistake in EVP");
char* str=" \n No memory for the array coordinates\n";
fprintf(f_r,str); fclose(f_r); exit(1);}
n_t = sizeof(Time_rez0)/sizeof(Time_rez0[0]);
n_Mob = sizeof(Mob0)/sizeof(Mob0[0]);
n_V = sizeof(Vwind0)/sizeof(Vwind0[0]);
n_K = sizeof(K0)/sizeof(K0[0]);
n_T = sizeof(Ts0)/sizeof(Ts0[0]);
_itoa(Nx,str_xx,10);
_itoa(Ny_buf,str_yy,10);
_itoa(Nz,str_zz,10);
_itoa(NN_buf,str_NNb,10); }

```

```

for(i_M=0; i_M<3; i_M++) // цикл по веществам
{strcpy(strM, MatterOB[i_M]); // strM - вещество
strcpy( DirPath0, DirPath00);
strcat( DirPath0, strM); strcat( DirPath0, "\\");
if (!CreateDirectory(DirPath0, NULL))
{printf("Couldn't create new directory 2 =%s .", DirPath0);
return; }
for(i_Mob=0; i_Mob<n_Mob; i_Mob++) // цикл по массе пролива
{ Mob = Mob0[i_Mob];
if (Mob<10) ndig=1;
else {if (Mob<100) ndig=2; else {if (Mob<1000) ndig=3; else
{if (Mob<10000) ndig=4; else {if (Mob<100000) ndig=5;
else ndig=6;}}}}};
gcvt(Mob,ndig,strMassa); // strMassa - масса
strcpy( DirPath1, DirPath0);
strcat( DirPath1, "M");
strcat( DirPath1, strMassa); strcat( DirPath1, "\\");
if (!CreateDirectory(DirPath1, NULL))
{printf("Couldn't create new directory 3 =%s .",
DirPath1); return; }

for(i_T=0; i_T<n_T; i_T++) { // цикл по температуре среды
for(i_K=0; i_K<n_K; i_K++) { // цикл по устойчивости
for(i_V=0; i_V<n_V; i_V++) { // цикл по скорости ветра

Vwind = Vwind0[i_V]; K = K0[i_K]; Ts = Ts0[i_T];
if ( (K == 1)&& (Vwind>=3) ) continue;
if ( (K == 2)&& (Vwind>=4) ) continue;
if ( (K == 5)&& (Vwind>=4) ) continue;
if ( (K == 6)&& (Vwind>=3) ) continue;
if ( (K == 7)&& (Vwind>=2) ) continue;

N_cycle++;
if (N_cycle < N_start) continue;

// формирование имен директории и файлов с результатами
{
if (Vwind<10) ndig=1;
else {if (Vwind<100) ndig=2; else ndig=3;};
gcvt(Vwind,ndig,strU); // strU - скорость
gcvt(K, 1, strC); // strC -категория устойчивости
if (Ts < 0) {if(Ts > -10) ndig=1; else {if (Ts > -100)
ndig=2;
else printf("Mistake - 1");} }
else {if (Ts<10) ndig=1; else {if (Ts<100 )ndig=2;
else printf("Mistake -
2");} };
gcvt(Ts, ndig, strT); // strT - температура среды

```

```

// формирование имени директории и файла с результатами в
// формате VTK
// формирование имени директории
strcpy( DirPath, DirPath1);
strcat( DirPath, "U");          strcat( DirPath, strU);
strcat( DirPath, "C");          strcat( DirPath, strC);
strcat( DirPath, "T");          strcat( DirPath, strT);
strcat( DirPath, "\\");
if (!CreateDirectory(DirPath, NULL))
    {printf("Couldn't create new directory 4 =%s .", DirPath);
return; }

// формирование имени файла VTK
strcpy( nf_VTK_C, DirPath);    strcpy( nf_VTK_D, DirPath);
strcat( nf_VTK_C, "conc");     strcat( nf_VTK_D, "dose");
strcpy( nf_Cont, DirPath_Control); strcat( nf_Cont, "A");
strcat( nf_Cont, strM);
strcat( nf_Cont, "M");         strcat( nf_Cont, strMassa);
strcat( nf_Cont, "U");         strcat( nf_Cont, strU);
strcat( nf_Cont, "C");         strcat( nf_Cont, strC);
strcat( nf_Cont, "T");         strcat( nf_Cont, strT);
strcat( nf_Cont, nf_Cont_ext);
f_r=fopen(nf_Cont, "a");
if (!f_r) { printf("Cannot open file result"); exit(1);};
fprintf(f_r, " File:  %s  ", nf_Cont); }
S = Square(Mob, Hliq, i_M);
J0 = Intension(Ts, i_M, Vwind, K); // kg/(c*m2)
J = J0*S;                          // kg/c
R00 = sqrt(S)*0.5;                  // начальная точка расчета по x и y
f_rezult =fopen(file_spill, "a");
if (!f_rezult) printf("Cannot open file the fire");
fprintf(f_rezult, "\n N=%d  %s  J=%.3e (kg/c)  S_OB(sp) =
%.1f(m2)",
N_cycle, nf_Cont, J, S);
// формирование разностной сетки в обл. x>0,y>0, z>0
// (Область по x ограничена величиной Llimit ~ 10-15 km )
time_rez = Time_rez0[n_t-1];
time_fin = time_rez;
xfinis = Vwind*time_rez;

if (xfinis>Llimit) xfinis = Llimit;
*(z_coor+0) = Hr;
// формирование координат точек по x
h_const=0;
for(i=1; i<Nx; i++) {zzk=i; h_const=h_const+zzk*zzk;};
SS = xfinis/h_const;
*(x_coor+0)= 0; x=R00;

```

```

    for(i=1; i<Nx; i++) { zzk=i; x = x + SS*zzk*zzk; *(x_coor+i)
= x; };
    // формирование координат точек по y
    sigma = Sigma1SX(xfinis, T_aver, K);
    yfinis = Dy*sigma;
    y=0; h_const=0;
    for(i=1; i<Ny; i++) { zzk=i; h_const=h_const+zzk*zzk;};
    SS = (yfinis)/h_const;
    *(y_coor+0)= 0; y=R00;
    for(i=1; i<Ny; i++) { zzk=i; y = y + SS*zzk*zzk; *(y_coor+i)
= y; };
    // формирование шагов по t (подготовка коэффициентов)
    dt = sigma/(Vwind*Dt);
    // Цикл по времени процесса
    for (i=0; i<NN; i++) {*(C + i) = 0; *(D + i) = 0;};
    time = 0.0; i_t = 0; time_rez = Time_rez0[i_t];
    do
    {
        time = time + dt;
        for(k=0; k<Nz; k++)
        for(j=0; j<Ny; j++)
        for(i=0; i<Nx; i++)
        { ijk = i + j*Nx + k*N12;
          x = *(x_coor+i); y = *(y_coor+j); z = *(z_coor+k);
          dx = Vwind*time;
          sigma = Sigma1SX(x, T_aver, K);
          dy = Dy*sigma;
          sigma3 = Sigma3SX(x, Z0, K);
          dz = Dz*sigma3;
          if ((x<=dx) && (y<=dy) && (z<=dz))
          { ddd = *(D+ijk);
            c2 = J*Citting_Station(y, z, sigma, sigma3, Vwind, He);
            if (ddd<Eps) { ddt = (dx - x)/Vwind; dd = c2*
ddt; }

            else { c1 = *(C+ijk); dd = 0.5*dt*(c1+c2); }
            *(C+ijk) = c2;
            *(D+ijk) = ddd + dd;
          };
        };
    };

    if (time >= time_rez) {
// Вывод результатов для момента времени time_rez(нормировано на J)
strcpy( nf_C, nf_VTK_C); strcpy( nf_D, nf_VTK_D);
if (time_rez<10) ndig=1;
else {if (time_rez<100) ndig=2;
else {if (time_rez<1000) ndig=3; else { if (time_rez<10000)
ndig=4; else ndig =5;}}};
gcvt(time_rez,ndig,str_time); // str_time - время

```

```

switch (ndig) {
    case 1: strcpy(str_nn,"-00000"); break;
    case 2: strcpy(str_nn,"-0000"); break;
    case 3: strcpy(str_nn,"-000"); break;
    case 4: strcpy(str_nn,"-00"); break;
    case 5: strcpy(str_nn,"-0"); break;
    default: printf("mistake in ndig ndig = %i",ndig); };
strcat( str_nn, str_time); strcat( str_nn, nf_VTK_ext);
strcat( nf_C, str_nn); strcat( nf_D, str_nn);
// формирование C
f_C_VTK=fopen(nf_C,"a");
if (!f_C_VTK) { printf("Cannot open file f_C_VTK"); exit(1);};
fprintf(f_C_VTK, "%s \n",vtk1);
strcpy( vtkx, nf_C); strcat( vtkx, " J = ");
gcvt(J,10,str_dd); strcat( vtkx,str_dd);
fprintf(f_C_VTK, "%s \n",vtkx);
fprintf(f_C_VTK, "%s \n",vtk3);
fprintf(f_C_VTK, "%s \n",vtk4);
strcpy( vtkx, vtk5); strcat( vtkx,str_xx);
strcat( vtkx, " "); strcat( vtkx,str_yy);
strcat( vtkx, " "); strcat( vtkx,str_zz);
fprintf(f_C_VTK, "%s \n",vtkx);
strcpy( vtkx, vtk6); strcat( vtkx,str_xx); // координаты по x
strcat( vtkx, " "); strcat( vtkx,vtkx_3);
fprintf(f_C_VTK, "%s \n",vtkx);
for(i=0; i<Nx; i++) fprintf(f_C_VTK, "%.4e ",*(x_coor+i));
strcpy( vtkx, vtk7); strcat( vtkx,str_yy); // координаты по y
strcat( vtkx, " "); strcat( vtkx,vtkx_3);
fprintf(f_C_VTK, "\n%s \n",vtkx);
for(j=Ny-1; j>=1; j-- ) {y = - *(y_coor+j); fprintf(f_C_VTK,
"% .2f ",y);};
for(j=0; j<Ny; j++) fprintf(f_C_VTK, "%.4e ",*(y_coor+j));
strcpy( vtkx, vtk8); strcat( vtkx,str_zz); // координаты по z
strcat( vtkx, " "); strcat( vtkx,vtkx_3);
fprintf(f_C_VTK, "\n%s \n",vtkx);
for(k=0; k<Nz; k++) fprintf(f_C_VTK, "%.4e ",*(z_coor+k));
strcpy( vtkx, vtk9); strcat( vtkx,str_NNb); // point data <n>
fprintf(f_C_VTK, "\n%s \n",vtkx);
strcpy( vtkx, vtk10); fprintf(f_C_VTK, "%s \n",vtkx);
strcpy( vtkx, vtk11); fprintf(f_C_VTK, "%s \n",vtkx);

for(k=0; k<Nz; k++) {
    for(j=Ny-1; j>=1; j-- )
        for(i=0; i<Nx; i++) { ijk = i + j*Nx + k*N12;
SS=*(C+ijk); if(SS<Eps) SS=0;
fprintf(f_C_VTK, "%.4e \n",SS); };
for(j=0; j<Ny; j++)

```

```

        for(i=0; i<Nx; i++) { ijk = i + j*Nx + k*N12;
SS=*(C+ijk));
        if ((j==0)&&(i==0)) SS=0;
        if(SS<Eps)
SS=0;    fprintf(f_C_VTK, "%.4e \n",SS); } };
fclose(f_C_VTK);

f_D_VTK=fopen(nf_D,"a");
if (!f_D_VTK) { printf("Cannot open file VTK"); exit(1);};
fprintf(f_D_VTK, "%s \n",vtk1);
strcpy( vtkx, nf_D); strcat( vtkx,"      J = ");
gcvt(J,10,str_dd); strcat( vtkx,str_dd);
fprintf(f_D_VTK, "%s \n",vtkx);
fprintf(f_D_VTK, "%s \n",vtk3);
fprintf(f_D_VTK, "%s \n",vtk4);
strcpy( vtkx, vtk5);    strcat( vtkx,str_xx);
strcat( vtkx," ");    strcat( vtkx,str_yy);
strcat( vtkx," ");    strcat( vtkx,str_zz);
fprintf(f_D_VTK, "%s \n",vtkx);
strcpy( vtkx, vtk6);    strcat( vtkx,str_xx);
strcat( vtkx," ");    strcat( vtkx,vtkx_3);
fprintf(f_D_VTK, "%s \n",vtkx);
for(i=0; i<Nx; i++) fprintf(f_D_VTK, "%.4e ",*(x_coor+i));
strcpy( vtkx, vtk7);    strcat( vtkx,str_yy);
strcat( vtkx," ");    strcat( vtkx,vtkx_3);
fprintf(f_D_VTK, "\n%s \n",vtkx);
for(j=Ny-1; j>=1; j-- ) {y = - *(y_coor+j)); fprintf(f_D_VTK,
"% .4f ",y);};
for(j=0; j<Ny; j++) fprintf(f_D_VTK, "%.4e ",*(y_coor+j));
strcpy( vtkx, vtk8);    strcat( vtkx,str_zz);
strcat( vtkx," ");    strcat( vtkx,vtkx_3);
fprintf(f_D_VTK, "\n%s \n",vtkx);
for(k=0; k<Nz; k++) fprintf(f_D_VTK, "%.4e ",*(z_coor+k));
strcpy( vtkx, vtk9);    strcat( vtkx,str_NNb);
fprintf(f_D_VTK, "\n%s \n",vtkx);
strcpy( vtkx, vtk10D);    fprintf(f_D_VTK, "%s \n",vtkx);
strcpy( vtkx, vtk11);    fprintf(f_D_VTK, "%s \n",vtkx);

for(k=0; k<Nz; k++) {
for(j=Ny-1; j>=1; j-- )
for(i=0; i<Nx; i++) { ijk = i + j*Nx + k*N12;
SS=*(D+ijk); if(SS<Eps) SS=0;
fprintf(f_D_VTK, "%.4e \n",SS); };
for(j=0; j<Ny; j++)
for(i=0; i<Nx; i++) { { ijk = i + j*Nx + k*N12;
SS=*(D+ijk));
if ((j==0)&&(i==0)) SS=0;
if(SS<Eps) SS=0;

```

```

        fprintf(f_D_VTK, "%.4e \n",SS);} } };
fclose(f_D_VTK);

    k_rR = 0;
    fprintf(f_r, " %.0f (cek) \n ",time);
    fprintf(f_r, " X, m          C, kg/m3          D, kg*c/m3
D, mg*min/m3 \n ");
    dxp=500; xp = 0;
    for(i=0; i<Nx; i++) { ijk = i + k_rR*N12;
        x = *(x_coor+i);
        if (x > xp) {xp=xp+dxp;
            gcvt(x,6,str_x);          fprintf(f_r," %-5s ", str_x);
            fprintf(f_r, "  %-.4e          %-.4e          %-.4e \n ",
J*(*(C+ijk)), J*(*(D+ijk)),
            (1000000.0/60.0)*J*(*(D+ijk)) );        };
        };
        i_t++; time_rez = Time_rez0[i_t];};
    }
    while (time< time_fin);
    fprintf(f_r, " ===== \n ");fclose(f_r);
fclose(f_rezult);
} } } } // завершение циклов по исходным данным

delete (x_coor); delete (y_coor); delete (z_coor), delete (C),
delete (D);
printf("\n Finis of culculation (Spill)");
}
//=====
//=====
//          Площадь разлива
double Square(double M, double Hliq, int Cod_Matter)
//          Square          - square of overflow, m2
//          Cod_Matter = 0   GB
//                      = 1   GD
//                      = 2   VX
{ double d, S;          // Плотность кг/м3
    switch (Cod_Matter) {
        case 0: d = 1100; break;
        case 1: d = 10020; break;
        case 2: d = 1010; };
    S = M/(d*Hliq);
    return S;
}
//=====
//          Intension of evaporate, kg/(c*m)
double Intension(double T,int Cod_Matter, double Vwind10, int K)
//          T , gradus C - temperature
//          Cod_Matter = 0   GB

```

```

//          = 1   GD
//          = 2   VX
{   double mu, T_K;
    double a1, a2, a3, a4;
    double st,p, J;

        if (abs(T) < 60 )
        {
switch (Cod_Matter) {
    case 0: mu = 140.1; a1 = 9.899;   a2 = -2850.9;
            a3 = -0.0;   a4 = 0.0;   break;
    case 1: mu = 182.2; a1 = 15.987; a2 = -3722.45;
            a3 = -0.01650; a4 = 0.00001196; break;
    case 2: mu = 267.4; a1 = 13.90;  a2 = -5235;
            a3 = 0.0; a4 = 0.0; break;
    default: printf("mistake in Cod (Intension) Cod_Matter=
%i",
                    Cod_Matter); getch();   };
        } else {
switch (Cod_Matter) {
    case 0: mu = 140.1; a1 = 14.644; a2 = -3186.55;
            a3 = -0.01463; a4 = 0.0000108; break;
    case 1: mu = 182.2; a1 = 15.987; a2 = -3722.45;
            a3 = -0.01650; a4 = 0.00001196; break;
    case 2: mu = 267.4; a1 = 20.530; a2 = -5731.866;
            a3 = -0.02175; a4 = 0.00001461; break;
    default: printf("mistake in Cod (Intension)
Cod_Matter=%i",
                    Cod_Matter); getch();   };
        };
    T_K = T+273.1;
    st = a1 + a2/T_K + a3*T_K + a4*T_K*T_K;
    p = pow(10.0, st);
    J = sqrt(mu)*0.000001*(5.83+4.1*Vwind10)*p;
    return J;
}
//=====
//      Citting Factor of padmixture in the stationary
double Citting_Station
( double y, double z, double sigma2, double sigma3, double
Vwind, double He)
{
    double dc, f2, f3;
    double dd2,dd3, ddd;
    double pr=0.159155;

    dc = pr/(Vwind*sigma2*sigma3);
    f2 = exp(-0.5*y*y/(sigma2*sigma2));

```

```

    dd2 = z - He;    dd3 = z + He;    ddd = - 0.5/(sigma3*sigma3);
    f3 = exp(ddd*dd2*dd2) + exp(ddd*dd3*dd3);
    return dc*f2*f3;
}
//=====
//          Dispersion
double Sigma1SX( double x, double T_aver, int K)
{ double alfa2, sigma;
  double dd1, dd2, ddd, T_aver0,C;
  switch (K) {
    case 1: alfa2 = 0.22; break;
    case 2: alfa2 = 0.16; break;
    case 3: alfa2 = 0.11; break;
    case 4: alfa2 = 0.08; break;
    case 5: alfa2 = 0.06; break;
    case 6: alfa2 = 0.04; break;
    default: printf("mistake in category of stability.
Cod=1; K = %i",K); getch();
  };
  if (x >= 100.0)    dd1=x; else dd1=100.0; // поправки
  dd2 = alfa2*dd1/sqrt(1.0 + 0.0001*dd1);
  if (x >= 100.0)    ddd = dd2;
  else ddd = (x/100)*dd2;
  T_aver0 = T_aver/60.0;
  C = pow(T_aver0/10.0, 0.2);
  if (T_aver0 > 10)  sigma = C*ddd;
  else { if (C>0.5) sigma = C*ddd; else sigma = 0.5*ddd;};
  return sigma;
}
//=====
//          Dispersion
double Sigma3SX(double x, double Z0, int K)
{ FILE* f_m;
  double alfa1, alfa2, b1, b2, s3_max, c1, d1, c2, d2;
  double x1, dd2;
  double g, F, gF, gFt;
  double dd3;
  switch (K) {
    case 1: alfa1 = 0.112; alfa2 = 0.000538; b1= 1.06;
            b2=0.815; s3_max=1600; break;
    case 2: alfa1 = 0.13; alfa2 = 0.000652; b1= 0.95;
            b2=0.750; s3_max=920; break;
    case 3: alfa1 = 0.112; alfa2 = 0.000905; b1= 0.92;
            b2=0.718; s3_max=640; break;
    case 4: alfa1 = 0.098; alfa2 = 0.00135; b1= 0.889;
            b2=0.688; s3_max=400; break;
    case 5: alfa1 = 0.0609; alfa2 = 0.00196; b1= 0.895;
            b2=0.684; s3_max=220; break;

```

```

case 6: alfa1 = 0.0638; alfa2 = 0.00136; b1= 0.783;
        b2=0.672; s3_max=100; break;
default: printf("mistake in category of stability. Cod=3;
K = %i",K);          getch();
        f_m=fopen(file_mis,"w"); if (!f_m)
            printf("Cannot open file file_mis");
        char* str=" \n Mistake in sigma3SX. Cod mistake 3, K=%i
        \n";
        fprintf(f_m,str,K); fclose(f_m); exit(1);};
if (Z0 <=0.01) { c1= 1.56; d1= 0.048; c2=6.75e-4;
                d2=0.45; }
else if (Z0 <= 0.04) {c1= 2.02; d1= 0.0269; c2=7.76e-4;
                    d2=0.37; }
else if (Z0 <= 0.1) { c1= 2.72; d1= 0.0; c2=0;
                    d2=0; }
else if (Z0 <= 0.4)
    { c1= 5.16; d1= -0.098; c2=18.6;
      d2=-0.225; }
else if (Z0 <= 1)
    { c1= 7.37; d1= -0.096; c2=4.29e+3;
      d2=-0.60; }
else{ c1= 11.7; d1= -0.128; c2=4.59e+3;
     d2=-0.78; };

if (x >= 100.0) x1=x; else x1 =100.0; // поправки
g = alfa1*pow(x1, b1)/(1.0+alfa2*pow(x1,b2));
if (Z0 > 0.1){ dd2=1.0+1.0/(c2*pow(x1,d2)); }
else { dd2=1.0/(1.0+ c2*pow(x1,d2)); };
dd3=c1*pow(x1,d1)*dd2; F = log(dd3);
gFt = g*F;
if ( gFt <= s3_max ) gF = gFt;
else gF = s3_max;
if (x >= 100.0) return gF;
else return (x/100)*gF;
}

```

2.3. Модель Института экспериментальной метеорологии

Научные основы модели представлены в [2]. Модель позволяет прогнозировать распространение примеси в атмосфере на расстояниях до 100 км. Модель в равной степени пригодна для описания распространения облака, созданного мгновенным источником, и струи от непрерывного источника.

Распределения концентрации примеси по всем трем координатам имеют гауссову форму. Положение центра облака или струи определяется интегрированием кинематического уравнения

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{u}(t) , \quad (2.12)$$

где $\vec{u}(t)$ – скорость ветра в точке, где облако в настоящий момент находится,

\vec{x} – вектор координат центра облака,

t – время движения.

Процесс диффузии в перпендикулярных к ветру направлениях рассматривается как временной процесс. В модели учитывают поворот и изменение модуля скорости ветра с высотой. Модель включает важные свойства так называемых моделей "лагранжева облака". Это позволяет учесть изменения направления и скорости ветра в процессе распространения облака, что позволяет применять модель для расстояний, много больших 10 км.

Зависимости дисперсий облака по всем координатам как функции от времени задают формулами, в которые входит параметр Монина-Обухова, заменяющий в качестве характеристики устойчивости атмосферы классы устойчивости Паскуилла. Известна приближенная связь между этими двумя параметрами.

2.4. Модели переноса и диффузии примеси

Модели обычно включают расчет диффузии и перенос примеси. Для этого численно решается краевая задача для уравнения параболического типа:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\vec{V}, \text{grad})C - \text{div}(\hat{D} \text{grad}C) = Q . \quad (2.13)$$

Здесь:

$C(x, y, z, t)$ – концентрация примеси,

$\vec{V}(x, y, z, t)$ – вектор скорости ветра,

$\hat{D}(x, y, z, t)$ – тензор коэффициентов турбулентной диффузии,

$Q(x, y, z, t)$ – плотность источника примеси,

$grad, div$ – операторы градиента и дивергенции.

Компоненты скорости ветра, коэффициенты тензора диффузии и плотность источника примеси при решении этого уравнения рассматривают как заданные функции. Для задания коэффициентов тензора диффузии используются различные эмпирические модели атмосферной турбулентности. Для прогнозирования распределения скорости ветра обычно используются методы аппроксимации и интерполяции данных непосредственных измерений или используются расчетные методы прогнозирования.

Пусть источники выбросов находятся внутри цилиндра, нижняя грань которого – подстилающая поверхность (земля).

Уравнение (2.13) перепишем в виде:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} + \sigma \varphi = \frac{\partial}{\partial z} \gamma \frac{\partial C}{\partial z} + \mu \Delta C + f .$$

Здесь:

C – искомая концентрация примеси;

t – время;

u, v, w – компоненты скорости ветра по осям x, y, z декартовой системы координат соответственно;

μ – коэффициент турбулентной диффузии в плоскости (x, y) ;

γ – коэффициент турбулентной диффузии в z -направлении (z – высота);

$$\Delta C = \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} ; \quad (2.15)$$

$f = f(x, y, z, t)$ – член, отвечающий источнику примеси;

$\sigma = \sigma(x, y, z, t)$ – величина, связанная с трансформацией (поглощением) субстанции.

Обычно требуется еще условие соленоидальности поля скоростей, то есть компоненты скорости в каждой точке области в любой момент времени должны удовлетворять уравнению неразрывности:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0.$$

(2.16)

Граничные условия для уравнения (2.14) определяются условиями задачи. Наиболее распространенными граничными условиями для уравнения (2.14) являются следующие:

$C = C_p$ – на боковой поверхности цилиндра, представляющего расчетную область. Условие означает, что граница удалена от источника примеси настолько далеко, что концентрация, выбрасываемого источником поллютанта, не вносит существенного вклада в фоновую концентрацию;

$\frac{\partial C}{\partial z} = \alpha C$ – в нижнем основании цилиндра ($z = 0$) (условие «прилипания» примеси; трава, деревья, городская застройка удерживают примесь в своих «порах» и сами могут служить источником загрязнения атмосферы);

$\frac{\partial C}{\partial z} = 0$ – в верхнем основании цилиндра ($z = H$) (на верхней границе происходит поглощение, уничтожение поллютанта или самоочищение атмосферы).

В этих соотношениях: C_p – фоновая концентрация примеси; α – коэффициент, учитывающий "прилипание" примеси к поверхности Земли.

В общем случае то или иное решение уравнения (2.14) (по сути – распределение концентраций примеси в любой момент времени) находится путем численного интегрирования последнего.

При численном решении сложных задач, описывающих совокупность нескольких физических процессов, эффективным приемом является так называемое расщепление [12].

Процессы диффузии и поглощения удобно рассматривать совместно. Ограничимся двумерным приближением. Обозначим:

$$A \cdot C = -\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \sigma C ,$$

$$B \cdot C = \frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) .$$

С учетом (2.16) и (2.17) в двумерном случае уравнение (2.14) редуцируется к виду:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + A \cdot C + B \cdot C = Q .$$

Идея метода расщепления по физическим процессам [12] состоит в том, что шаг по времени τ разбивается на две половины, на каждой из которых один процесс интегрируется по явной схеме, а другой – по неявной. Аппроксимируем функцию C функцией φ . Обозначим индексами 0, 1, 2 значения φ в моменты времени t , $t + \tau/2$, $t + \tau$. Тогда при заданном φ_0 требуется найти φ_2 из уравнений:

$$\frac{\varphi_1 - \varphi_0}{\tau/2} + A \cdot \varphi_0 + B \cdot \varphi_1 - Q = 0 ,$$

$$\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\tau/2} + A \cdot \varphi_2 + B \cdot \varphi_1 - Q = 0 .$$

Промежуточное значение φ_1 определяется независимо из первого уравнения, после подстановки которого во второе уравнение, определяется φ_2 .

Выразим φ_0 и φ_2 через φ_1 из уравнений (2.19):

$$\varphi_0 = \left(1 - \frac{\tau}{2} A \right)^{-1} \left[\left(1 + \frac{\tau}{2} B \right) \varphi_1 - \frac{\tau}{2} Q \right] ,$$

$$\varphi_2 = \left(1 + \frac{\tau}{2} A\right)^{-1} \left[\left(1 - \frac{\tau}{2} B\right) \varphi_1 + \frac{\tau}{2} Q \right].$$

При малых τ , когда $\tau \ll 1/\|A\|$, $\tau \ll 1/\|B\|$, приближенно имеем

$$\varphi_0 = \left(1 + \frac{\tau}{2} A + \frac{\tau}{2} B\right) \varphi_1 - \frac{\tau}{2} Q + O(\tau^2),$$

$$\varphi_2 = \left(1 - \frac{\tau}{2} A - \frac{\tau}{2} B\right) \varphi_1 + \frac{\tau}{2} Q + O(\tau^2).$$

Поэтому

$$\frac{\varphi_0 + \varphi_2}{2} = \varphi_1 + O(\tau^2).$$

Подставим это выражение в полусумму уравнений (2.19):

$$\frac{\varphi_2 - \varphi_0}{\tau} + A \frac{\varphi_2 + \varphi_0}{2} + B \frac{\varphi_2 + \varphi_0}{2} - Q = O(\tau^2),$$

то есть построенный итерационный процесс при $\tau \rightarrow 0$ действительно аппроксимирует нестационарное уравнение.

2.5. Вопросы для проверки

- Указать наиболее существенные ограничения в использовании эмпирических моделей атмосферного переноса
- С чем связано использование схем расщепления в модели переноса и диффузии примеси?

2.6. Список литературы к главе 2

1. Колодкин В.М., Мурин А.В., Петров А.К., Горский В.Г. Количественная оценка риска химических аварий. Ижевск, 2001 г., 226 с.

2. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчет распространения примеси. Л.: Гидрометеиздат, 1991.
3. Учет дисперсионных параметров атмосферы при выборе площадок для атомных электростанций. Руководство по безопасности АЭС. Международное агентство по атомной энергии. Вена, 1980. 106 с.
4. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте. Руководящий документ РД 52.04.253-90. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 23 с.
5. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 93 с.
6. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 272 с.
7. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. М.: Наука, 1965. 720 с.
8. Techniques and decision making in the assessment of off-site consequences of an accident in a nuclear facility / Safety series, N.86, International Atomic Energy Agency. Vienne, 1987. 185 p.
9. Горский В.Г. и др. Научно-методические аспекты анализа аварийного риска. М.: Экономика и информатика, 2002, 260 с.
10. Романов Г.Н. Ликвидация последствий радиационных аварий. Справочное руководство. М.: ИздАТ, 1993, 336с.
11. Методика оценки последствий химических аварий (Методика "ТОКСИ". Вторая редакция). М.: НТЦ "Промышленная безопасность", 1999, 83с.
12. Ковеня В.М., Яненко Н.Н. Метод расщепления в задачах газовой динамики. Новосибирск: Наука, 1987. 304 с.

3. Прогнозирование последствий взрывов конденсированных взрывчатых веществ

3.1. Общие сведения

Анализа аварий показывает, что более 60 % всех аварий сопровождается возгоранием и взрывом. Основными поражающими факторами при этом являются:

- фугасное действие;
- термическое действие;
- токсическое действие (продукты взрыва);
- осколочное действие (осколки и части разлетающегося оборудования и т.п.).

Взрыв – это процесс освобождения большого количества энергии в ограниченном объеме за короткий промежуток времени. В результате взрыва вещество, заполняющее объем, в котором происходит освобождение энергии, превращается в сильно нагретый газ с очень высоким давлением. Этот газ воздействует на окружающую среду, вызывая её движение. Взрыв в твёрдой среде сопровождается её разрушением и дроблением. Основное отличие между пожарами и взрывами состоит в скорости выброса энергии. Во время пожара энергия освобождается медленно, при взрыве освобождение энергии происходит в течении микросекунд.

Различают два типа взрывов: физические взрывы и химические. При физическом взрыве высвобождающаяся энергия является внутренней энергией сжиженного газа. При химических взрывах энерговыделение обусловлено экзотермической реакцией между горючим и окислителем.

Порожденное взрывом движение, при котором происходит резкое повышение давления, плотности и температуры среды, называют взрывной волной. Фронт взрывной волны распространяется по среде с большой скоростью, в результате чего

область, охваченная движением, быстро расширяется. Возникновение взрывной волны является характерным следствием взрыва в различных средах. Если среда отсутствует, т. е. взрыв происходит в вакууме, энергия переходит в кинетическую энергию разлетающихся во все стороны с большой скоростью продуктов взрыва. Посредством взрывной волны взрыв производит механическое воздействие на объекты, расположенные на различных расстояниях от него. По мере удаления от места взрыва механическое воздействие взрывной волны ослабевает.

Разнообразные виды взрывов различаются физической природой источника энергии и способом её освобождения.



3.1.1. Химические взрывы

Типичными примерами взрывов являются взрывы химических взрывчатых веществ. Взрывчатые вещества обладают способностью к быстрому химическому разложению, при котором энергия межмолекулярных связей выделяется в виде теплоты. Для взрывчатых веществ характерно увеличение скорости химического

разложения при повышении температуры. При сравнительно низкой температуре химическое разложение протекает очень медленно, так что взрывчатое вещество в течение длительного времени может не претерпевать заметного изменения в своём состоянии. В этом случае между взрывчатым веществом и окружающей средой устанавливается тепловое равновесие, при котором непрерывно выделяющиеся небольшие количества теплоты отводятся за пределы вещества посредством теплопроводности. Если создаются условия, при которых выделяющаяся теплота не успевает отводиться за пределы взрывчатого вещества, то благодаря повышению температуры развивается самоускоряющийся процесс химического разложения, который называется тепловым взрывом. В связи с тем, что теплота отводится через внешнюю поверхность взрывчатого вещества, а её выделение происходит во всём объёме вещества, тепловое равновесие может быть также нарушено при увеличении общей массы взрывчатого вещества. Это обстоятельство учитывается при хранении взрывчатых веществ.

Возможен иной процесс осуществления взрыва, при котором химическое превращение распространяется по взрывчатому веществу последовательно от слоя к слою в виде волны. Движущийся с большой скоростью передний фронт такой волны представляет собой ударную волну, то есть резкий (скачкообразный) переход вещества из исходного состояния в состояние с высокими давлением и температурой. Взрывчатое вещество, сжатое ударной волной, оказывается в состоянии, при котором химическое разложение протекает очень быстро. В результате область, в которой освобождается энергия, оказывается сосредоточенной в тонком слое, прилегающем к поверхности ударной волны. Выделение энергии обеспечивает сохранение высокого давления в ударной волне на постоянном уровне. Процесс химического превращения взрывчатого вещества, который вводится ударной волной и сопровождается быстрым выделением энергии, называется детонацией. Детонационные волны распространяются по взрывчатому веществу с большой

скоростью, всегда превышающей скорость звука в исходном веществе. Например, скорости волн детонации в твёрдых взрывчатых веществах составляют несколько км/сек. Тонна твёрдого взрывчатого вещества может превратиться таким способом в плотный газ с высоким давлением за 10^{-4} сек. Давление в образующихся при этом газах достигает нескольких сотен тысяч атмосфер.

Взрывчатые вещества

Взрывчатые вещества (ВВ) – это химические соединения или смеси веществ, способные к быстрой химической реакции, сопровождающейся выделением большого количества тепла и образованием газов. Эта реакция, возникнув в какой-либо точке в результате нагревания, удара, трения, взрыва другого взрывчатого вещества или иного внешнего воздействия, распространяется по заряду за счёт передачи энергии от слоя к слою с помощью процессов тепло- и массопереноса (горение) либо ударной волны (детонация).

Скорость горения различных взрывчатых веществ колеблется от долей мм/с до десятков и сотен м/сек, скорость детонации может превышать 9 км/с.

Взрывчатыми веществами могут быть конденсированные (твёрдые и жидкие) вещества, газы, а также взвеси частиц твёрдых или жидких веществ в газах. По заряду из 1 кг гексогена, объём которого 0,6 л, а теплота взрыва 5,4 Мдж (1300 ккал), детонация может пройти за 10 мксек (10^{-5} сек), что соответствует мощности 500 млн. кВт (в десятки раз больше, чем мощность самой крупной электростанции). Реакция при детонации идёт так быстро, что газообразные продукты с температурой несколько тысяч градусов оказываются сжатыми в объёме, близком к исходному объёму заряда, до давлений в десятки Гн/м². Давление, развивающееся при детонации, зависит от плотности заряда и скорости детонации.

Важной характеристикой ВВ является также их детонационная способность, мерой которой служит критический диаметр детонации, т. е. наименьший диаметр цилиндрического

заряда, при котором детонация ещё распространяется, несмотря на разброс вещества из зоны реакции. Детонационная способность ВВ тем больше, чем меньше критический диаметр.

Из многих способных к взрыву соединений в качестве взрывчатых веществ и компонентов взрывчатых смесей применяют лишь 2—3 десятка веществ. Основные из них — нитросоединения (тринитротолуол, тетрил, гексоген, октоген, нитроглицерин, тетранитропентаэритрит — тэн, нитроклетчатка, нитрометан и др.) и соли азотной кислоты, особенно нитрат аммония. Для уменьшения чувствительности и опасности в обращении мощные взрывчатые вещества смешивают с парафином, церезином и другими легкоплавкими добавками (этот процесс называется флегматизация). Для увеличения теплоты взрыва в смеси вводят порошкообразный алюминий или магний.

По взрывчатым свойствам (условиям перехода горения в детонацию) и обусловленным ими областям применения взрывчатые вещества подразделяют на:

- иницирующие (первичные);
- бризантные (вторичные);
- метательные (пороха).

Иницирующие вещества характеризуются чрезвычайно высокой скоростью взрывного превращения. Чувствительность их высока, горение неустойчиво и быстро переходит в детонацию уже при атмосферном давлении. Взрыв может быть возбуждён поджиганием, ударом или трением. Они используют для возбуждения взрывчатого превращения других веществ. Основные представители этих веществ — азид свинца, гремучая ртуть, тринитрорезорцинат свинца, тетразен. Бризантные взрывчатые вещества более инертны. Чувствительность их к внешним воздействиям гораздо меньше, чем иницирующих. Горение может перейти в детонацию только при наличии прочной оболочки либо большого количества этого вещества. В качестве бризантных взрывчатых веществ применяют главным образом нитросоединения и взрывчатые смеси на основе нитратов, хлоратов, перхлоратов и жидкого кислорода. Основным режим их

взрывного превращения — детонация, возбуждаемая небольшим зарядом инициирующего взрывчатого вещества. Метательные взрывчатые вещества горят ещё более устойчиво, чем бризантные: они не детонируют при горении даже в самых жёстких условиях. Основным режим взрывного превращения таких веществ — горение. Отличие метательных веществ от бризантных определяется в основном не химическим составом, а физической структурой этих веществ (плотностью и прочностью заряда).

3.1.2. Ядерные взрывы

При ядерном взрыве происходит превращение атомных ядер исходного вещества в ядра других элементов, которое сопровождается освобождением энергии связи элементарных частиц (протонов и нейтронов), входящих в состав атомного ядра. Ядерный взрыв основан на способности определённых изотопов тяжёлых элементов урана или плутония к делению, при котором ядра исходного вещества распадаются, образуя ядра более лёгких элементов. При делении всех ядер, содержащихся в 50 г урана или плутония, освобождается такое же количество энергии, как и при детонации 1000 т тринитротолуола. Деление ядра атома урана или плутония может произойти в результате захвата ядром одного нейтрона. Существенно, что в результате деления возникает несколько новых нейтронов, каждый из которых может вызвать деление других ядер. В результате число делений будет быстро нарастать (по закону геометрической прогрессии). Если принять, что при каждом акте деления число нейтронов, способных вызвать деление др. ядер, удваивается, то менее чем за 90 актов деления образуется такое количество нейтронов, которого достаточно для деления ядер, содержащихся в 100 кг урана или плутония. Время, необходимое для деления этого количества вещества, составит $\sim 10^{-6}$ сек. Такой самоускоряющийся процесс называется цепной реакцией. В действительности не все нейтроны, образующиеся при делении, вызывают деление других ядер. Если общее количество делящегося вещества мало, то большая часть нейтронов будет выходить за пределы вещества, не вызывая деления. В делящемся

веществе всегда имеется небольшое количество свободных нейтронов, однако, цепная реакция развивается лишь в том случае, когда число вновь образующихся нейтронов будет превышать число нейтронов, которые не производят деления. Такие условия создаются, когда масса делящегося вещества превосходит так называемую критическую массу. Взрыв происходит при быстром соединении отдельных частей делящегося вещества (масса каждой части меньше критической) в одно целое с общей массой, превосходящей критическую массу, или при сильном сжатии, уменьшающем площадь поверхности вещества и тем самым уменьшающем количество выходящих наружу нейтронов. Для создания таких условий обычно используют взрыв химического взрывчатого вещества.

Существует другой тип ядерной реакции — реакция синтеза лёгких ядер, сопровождающаяся выделением большого количества энергии. Силы отталкивания одноимённых электрических зарядов (все ядра имеют положительный электрический заряд) препятствуют протеканию реакции синтеза, поэтому для эффективного ядерного превращения такого типа ядра должны обладать высокой энергией. Такие условия могут быть созданы нагреванием веществ до очень высокой температуры. В связи с этим процесс синтеза, протекающий при высокой температуре, называют термоядерной реакцией. При синтезе ядер дейтерия (изотопа водорода 2H) освобождается почти в 3 раза больше энергии, чем при делении такой же массы урана. Необходимая для синтеза температура достигается при ядерном взрыве урана или плутония. Таким образом, если поместить в одном и том же устройстве делящееся вещество и изотопы водорода, то может быть осуществлена реакция синтеза, результатом которой будет взрыв огромной силы. Помимо мощной взрывной волны, ядерный взрыв сопровождается интенсивным испусканием света и проникающей радиации.

3.1.3. Физические взрывы

Существуют взрывы, в которых выделяющаяся энергия подводится от внешнего источника. Таким примером может служить мощный электрический разряд в какой-либо среде. Электрическая энергия в разрядном промежутке выделяется в виде теплоты, превращая среду в ионизованный газ с высокими давлением и температурой. Аналогичное явление происходит при протекании мощного электрического тока по металлическому проводнику, если сила тока оказывается достаточной для быстрого превращения металлического проводника в пар. Явление взрыва возникает также при воздействии на вещество сфокусированного лазерного излучения. Как один из видов взрыва можно рассматривать процесс быстрого освобождения энергии, происходящий в результате внезапного разрушения оболочки, удерживавшей газ с высоким давлением (например, взрыв баллона со сжатым газом). Взрыв может произойти при столкновении твёрдых тел, движущихся навстречу друг другу с большой скоростью. При столкновении кинетическая энергия тел переходит в теплоту в результате распространения по веществу мощной ударной волны, возникающей в момент столкновения. Скорости относительного сближения твёрдых тел, необходимые для того, чтобы в результате столкновения вещество полностью превратилось в пар, измеряются десятками км/сек, развивающиеся при этом давления составляют миллионы атмосфер.

3.1.4. Вопросы для проверки

1. Что называется взрывом и каковы его характерные признаки?
2. На какие виды делятся взрывы по своей природе?
3. Дайте определение взрывчатым веществам.
4. Какую роль выполняют первичные и вторичные инициирующие взрывчатые вещества?

5. Как называются компоненты, которые вводятся в состав взрывчатых веществ для повышения его чувствительности к начальному импульсу и передачи детонации?
6. Что такое флегматизация?

3.2. Взрывы конденсированных взрывчатых веществ

3.2.1. Математическая модель точечного взрыва

Для математического описания процесса распространения ударной волны в атмосфере при взрыве используется модель точечного взрыва. Взрыв происходит на плоской поверхности раздела между газом (воздухом) и деформируемой средой. Воздушная среда приближается моделью невязкого, нетеплопроводного газа с показателем адиабаты γ . Ударная волна распространяется в полуограниченном пространстве с начальной плотностью ρ_0 и давлением P_0 при наличии противодействия.

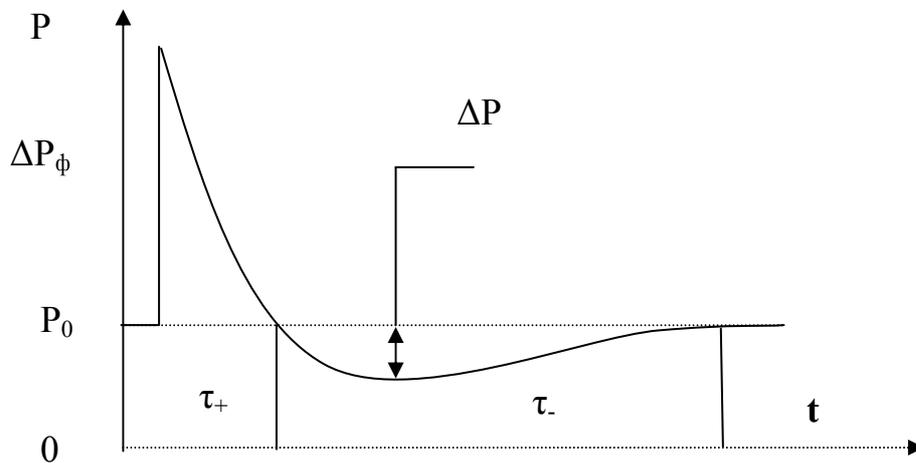


Рис.3.1. Изменение давления в ударной волне P со временем t в фиксированной точке.

t

Данная модель предполагает, что выделение энергии при взрыве происходит за короткий промежуток времени в относительно небольшой области пространства. Таким образом, возникает идеализированное представление о мгновенном точечном взрыве как о движении газа, которое вызвано мгновенным выделением конечной энергии в некоторой точке.

При воздушном взрыве ударная сферическая волна достигает земной поверхности и отражается от неё. На некотором расстоянии от эпицентра взрыва фронт отраженной волны сливается с фронтом падающей, вследствие чего образуется так называемая головная волна с вертикальным фронтом, распространяющаяся от эпицентра вдоль земной поверхности. Ближняя зона, где отсутствует слияние фронтов, называется зоной регулярного отражения, а дальняя зона, в которой распространяется головная волна, - зоной нерегулярного отражения. В ближней зоне при умеренной высоте взрыва давление в ударной волне очень велико, но размеры зоны порядка высоты, на которой произошел взрыв.

Математическая модель неустановившегося одномерного движения газа в переменных Эйлера формулируется в сферической системе координат[1]. Модель включает уравнение сохранения импульса, уравнение неразрывности, уравнение сохранения энергии.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial r} + \rho \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{2\rho u}{r} = 0,$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial r} + \gamma p \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{2\gamma p u}{r} = 0$$

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

$$t = \frac{t'}{t^0} \alpha_0^{1/3}, \quad r = \frac{r'}{r^0} \alpha_0^{1/3}, \quad \rho = \frac{\rho'}{\rho_1}, \quad p = \frac{p'}{p_1}, \quad u = \frac{u'}{c_1} \sqrt{\gamma},$$

где t' – время, r' – радиальная переменная, 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.

Система уравнений математической модели дополняется условием адиабатичности течения и краевыми условиями. Граничное условие в центре ($r = 0$) имеет вид $u = 0$. Граничное условие на фронте ударной волны ($r = \varphi(t)$):

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

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

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

где D – скорость ударной волны.

Для решения уравнений используется метод конечных разностей, который удовлетворительно описывает процесс неустановившегося одномерного движения газа, за исключением

начальных стадий взрыва. Поэтому для определения характеристик движения газа на начальной стадии взрыва используется линеаризованное решение. При больших временах используются асимптотические законы затухания ударных волн.

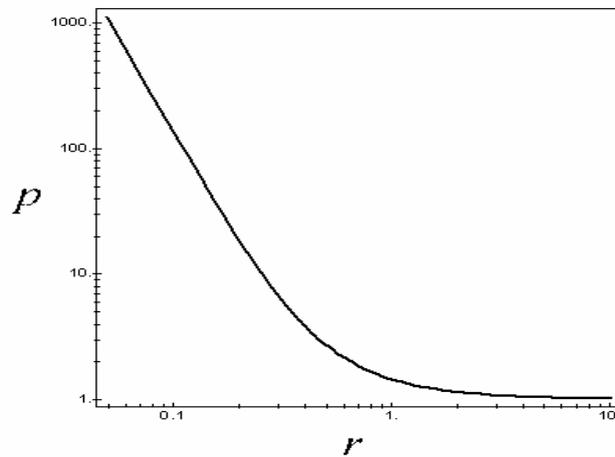


Рис.3.2. Зависимость безразмерного давления на фронте ударной волны p от безразмерного расстояния r при точечном взрыве

В результате решения приходим к пространственно-временным газодинамическим функциям точечного взрыва, которые характеризуют распространение ударной волны в атмосфере. В частности, находим функцию избыточного давления на фронте ударной волны в зависимости от расстояния от места взрыва. Результаты численного решения данной задачи представлены в литературе. Например, в работе [2]. На рис. 3.2 изображена зависимость безразмерного давления на фронте ударной волны от безразмерного расстояния r при точечном взрыве. По известным значениям энергии взрыва и атмосферному давлению определяется безразмерное давление и безразмерный радиус для заданных условий. Для конкретных условий взрыва можно выполнить

переход в размерные единицы. Например, если масса взрывчатого вещества 49 тонн, тротилловый эквивалент 1.2, то зависимость избыточного давления на фронте ударной волны от расстояния от места взрыва отвечает данным таблицы 3.1.

Таблица 3.1

**Избыточное давление на фронте ударной волны при взрыве
(масса ВВ – 49 тонн, тротилловый эквивалент 1.2)**

Положение фронта ударной волны от точки взрыва, м	Избыточное давление на фронте ударной волны	
	кПа	кг/см ²
30	3906,2	39,8
40	1794,2	18,3
50	1000,1	10,2
100	188,3	1,9
200	47,07	0,48
300	23,97	0,24
400	15,63	0,16
500	11,48	0,12
1000	4,846	0,049
1500	3,056	0,031
2000	2,230	0,023
2500	1,755	0,018
3000	1,447	0,015
3500	1,231	0,013
4000	1,071	0,011

Для аппроксимации избыточного давления на фронте ударной волны $\Delta p(R)$ и удельного импульса I , определяемого для фазы сжатия ($0 < t < t_+$) по формуле,

$$I(R) = \int_0^{t_+} \Delta P(t) dt, \quad (3.2)$$

можно воспользоваться выражениями $\Delta P(R)$ и $I(R)$, предложенными М.А.Садовским [3].

$$\Delta P(R) = \frac{0,084}{R_n} + \frac{0,27}{R_n^2} + \frac{0,7}{R_n^3}, \quad \text{мПа} \quad (3.3)$$

$$I(R) = 0,4 * C^{2/3} / R, \quad \text{кПа * с} \quad (3.4)$$

$$R_n = R / \sqrt[3]{C}, \quad (3.5)$$

где С - тротиловый эквивалент, кг. Мощность контактного взрыва на неразрушаемой преграде удваивается в связи с формированием полусферической волны. Поэтому величина тротилового эквивалента заряда ВВ увеличивается в два раза. При взрыве на грунте величина тротилового эквивалента увеличивается в 1.2 - 1.8 раза, в зависимости от свойств грунта. Для песчаной подложки коэффициент 1.2. Для утрамбованной глины - 1.8.

Таблица 3.2

Энергия взрыва Q [кДж/кг] промышленных ВВ

ВВ	Q [кДж/кг]	ВВ	Q [кДж/кг]
Тротил (ТНТ)	4240, 4184	Тринитрохлорбензол	4240
Гексоген	5540	Нитрогуанидин	3020
Тэн	5880	Дымный порох	2790
Динитробензол	3650	Пироксилин (N=13.3%)	4370
Тринитробензол	4520	Аммотол 80/20	4200
Пикрат аммония	3360	Октоген	5420
Тринитроанилин	4160	Глигольдинитрат	6640
Аммонийная селитра	1440		

Тротиловый эквивалент ВВ может быть определен в зависимости от энергии взрыва по данным таблицы 3.2, как

отношение энергии взрыва ВВ к энергии взрыва тринитротолуола (тротил, ТНТ).

3.2.2. Оценка последствий точечного взрыва

Избыточное давление на фронте ударной волны может быть сопоставлено с величиной перепада давления, отвечающего определенной степени разрушения. То есть из решения системы (3.1) можно получить зависимость избыточного давления ΔP на фронте волны и сопоставить с данными таблицы 3.3, где приведена зависимость степени разрушения различных объектов от давления. Зависимость избыточного давления на фронте ударной волны от расстояния можно восстановить по графику, представленному на рисунке 3.2.

Сведения представленные в таблице 3.3 в основном отвечают обработке экспериментальных данных по разрушению соответствующих объектов (фактически представлены математические ожидания избыточных давлений, отвечающих определенной степени разрушения).

В таблице 3.4. представлена общая характеристика воздействия избыточного давления на человека.

Для более точной оценки последствий взрыва используется модель ущерба при взрыве $U(\Delta P) = \Phi(\text{Pr})$, где $\Phi(z)$ - нормальная функция распределения:

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp(-t^2/2) dt = \frac{1 + \text{erf}(z/\sqrt{2})}{2}, \quad (3.6)$$

отвечающая вероятности поражения человека (летальный исход) при воздействии избыточного давления. Pr – пробит функция, которая может быть определена, например, в виде:

$$\text{Pr} = -77.1 + 6.91 \cdot \ln \Delta p, \quad (3.7)$$

или

$$Pr = -2,44 \cdot \ln(7380 / \Delta p + 1,9 \cdot 10^9 / (I \cdot \Delta p)), \quad (3.8)$$

где Δp – избыточное давление (Па), I - импульс ($\text{Н/м}^2\text{с}$).

Таблица 3.3

Избыточное давление (кПа), отвечающее определенной степени разрушения

Объект	Степень разрушения		
	Высокая	Средняя	Низкая
Основные промышленные сооружения	40 – 50	30 – 40	20 – 30
Складские здания (кирпичная кладка)	30 – 40	20 – 30	10 – 20
Трансформаторные подстанции (кирпичная кладка)	40 – 60	20 – 40	10 – 20
Линии электропередачи высокого напряжения	80 – 120	50 – 70	30 – 50
Трубопроводы, заглубленные в землю на глубину не менее 20 см		250 – 350	
Деревянные одноэтажные здания (жилые дома)	12 – 20	8 – 12	6 – 8
Одно- двухэтажные каменные здания	25 – 35	15 – 25	8 – 15
Отдельно стоящие деревья. Средняя высота 20–24 м, диаметр 18–27 см		10 – 15	
Лесной массив. Средний возраст деревьев 45–50 лет. Средняя высота 20–24 м, диаметр 18–27 см		5 – 10	

Сопоставляя избыточное давление на фронте ударной волны, с давлением, отвечающим определенной степени разрушения, по данным таблицы 3.3, определяются границы зон разрушений. Уровень поражения человека в зависимости от избыточного давления на фронте ударной волны, может быть оценен по данным таблицы 3.4.

Вероятность поражения человека (локальная оценка риска относительно летального исхода для человека) может быть определена с использованием модели ущерба.

Таблица 3.4

Воздействие избыточного давления на человека

Избыточное давление, бар	Уровень поражения человека
5 – 8	Летальный исход
3,5 – 5	Летальный исход в 50% случаев
2 – 3	Пороговое значение для летального исхода
1,3 – 2 < 2 1,3 – 1,5	Тяжелая степень поражения легких, 50% разрыв барабанных перепонок: - возраст до 20 лет - возраст свыше 20 лет

Таблица 3.5

Вероятность поражения человека при взрыве заряда ВВ 49 тонн и тротиловом эквиваленте равном 1.2

Расстояние от места взрыва, м	Значение пробит-функции	Вероятность поражения человека
50	18,36589353	1
60	15,16950665	1
70	12,55027268	1
80	10,34961541	1
90	8,465106068	1
100	6,82680132	1
120	4,102671184	0,99997957
140	1,912736112	0,97210915
160	0,100837681	0,5401604
180	-1,432175374	0,07604686
200	-2,752701287	0,00295535
300	-7,416287409	6,0729E-14
400	-10,37253832	0
500	-12,50175498	0
700	-15,49825019	0
1000	-18,46260295	0

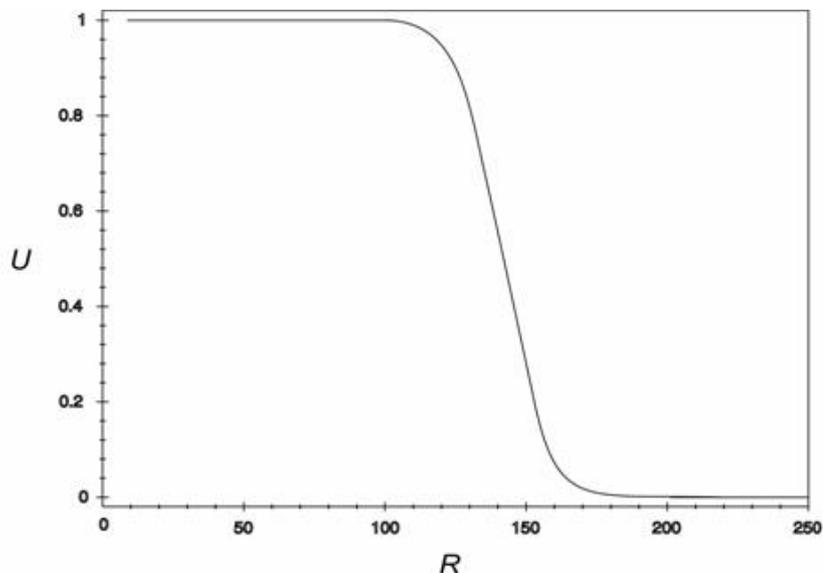


Рис. 3.3. Функция ущерба U в зависимости от расстояния R , м от места взрыва (39 тонн ВВ, Тротиловый эквивалент 1.2).

Таблица 3.6

Границы зон 100% и 50% поражения человека, м

Масса ВВ, т	Граница 100%, м	Граница 50%, м
49	110	161
48	109	160
25	90	129
10	70	95
4	50	70

Например, если избыточное давление на фронте ударной волны при взрыве ВВ (масса ВВ 49 тонн, тротиловый эквивалент 1.2) отвечает данным, представленным в таблице 3.1, то значения пробит функции и вероятность поражения человека, будут отвечать данным, представленным в таблице 3.5. Графическое представление зависимости вероятности поражения человека от расстояния от места взрыва, представлено на рисунке 4.3.

Данные таблицы 3.6 иллюстрируют результаты расчетов радиусов границ зон 100% и 50% поражения людей от массы ВВ (тротиловый эквивалент 1.2).

Таблица 3.7

Параметры для определения радиусов поражения R при взрыве

Характеристика действия ударной волны		I^* , Па*с	P^* , Па	k , Па ² *с
Разрушение зданий				
R ₁	Полное разрушение зданий	770	70100	886100
R ₂	Граница области частичного разрушения: 50% -75% стен разрушено или находится на грани разрушения	520	34500	541000
R ₃	Граница области значительных повреждений: повреждение некоторых конструктивных элементов, несущих нагрузку	300	14600	119200
R ₄	Граница области минимальных повреждений: разрыв соединений и расчленение конструкций	100	3600	8950
R ₅	Полное разрушение оконных стекол	0	7000	0
R ₇	50% разрушение оконных стекол	0	2500	0
R ₈	10% разрушение оконных стекол	0	2000	0
Выживание человека при поражении органов дыхания				
R ₉	50% выживания	440	2.43*10 ⁵	1.44*10 ⁸
R ₁₀	Порог выживания	100	6.59*10 ⁴	1.62*10 ⁷

Для оценки зон поражения при взрыве могут быть использованы кривые равновероятного разрушения (поражения) в координатах Δr - I : где $\Delta r(R)$ - максимальное избыточное давление

на фронте ударной волны; $I(R)$ - импульс фазы сжатия на расстоянии R от места взрыва. Радиусы соответствующих зон поражения R_i определяются решением уравнения[4]:

$$\frac{k}{\Delta P(R) - P^*} = I(R) - I^*, \quad (3.9)$$

где I^* , P^* асимптотические значения импульса и давления; k - числовой коэффициент.

Значения этих параметров для кривых разрушения зданий и выживания человека при частичном поражении органов дыхания приведены в таблице 3.7.

Зависимости максимального избыточного давления на фронте ударной волны от расстояния - $\Delta p(R)$ и зависимость импульса фазы сжатия от расстояния - $I(R)$ могут быть определены по формулам (3.3), (3.4).

3.2.3. Примеры решения задач

Задача №1.

На каком расстоянии от места взрыва будут разрушены кирпичные здания (деревянные здания), если энергия взрыва соответствует 20 тоннам взрывчатого вещества (ВВ)?

1. Взрыв на бетонной подложке, ВВ – ТНТ;
2. Взрыв на грунте, ВВ – дымный порох.

Решение.

Исходные данные задачи по варианту 1:

- объекты разрушения – кирпичное здание (деревянное здание);
- взрывчатое вещество – ТНТ;
- поверхность, на которой возникает взрыв – бетонная подложка;
- масса взрывчатого вещества – 20 тонн.

Функция избыточного давления на фронте ударной волны зависит от расстояния (от места взрыва до объекта разрушения).

По таблице 3.3 определяем, что избыточное давление для разрушения кирпичного здания (разрушение средней степени) составляет 20-30 кПа.

Зависимость избыточного давления от расстояния представлена выражением (3.3): $\Delta P(R) = \frac{0,084}{R_n} + \frac{0,27}{R_n^2} + \frac{0,7}{R_n^3}$,

где $\Delta P(R)$ - избыточное давление, R_n – приведенное расстояние, которое можно определить по формуле 4.5: $R_n = R/\sqrt[3]{C}$. Тротильный эквивалент C будет равен массе взрывчатого вещества, так как исходное взрывчатое вещество ТНТ, то есть тротил. Но поскольку взрыв происходит на бетонной подложке, то следует учесть коэффициент 2, то есть $C = 40$ т.

Подставляя числовые данные в формулу давления, получаем уравнение третьей степени, которое удобно решить, например, в электронной таблице Excel. Фрагмент электронной таблицы представлен на рисунке 3.4.

В столбце C вычисляется численное значение выражения $\Delta P(R) = \frac{0,084}{R_n} + \frac{0,27}{R_n^2} + \frac{0,7}{R_n^3}$. В ячейке $C11$ значение этого

выражения приближенно равно нулю. Следовательно, что при $\Delta P = 20$ кПа $R = 235$ м; при $\Delta P = 30$ кПа $R = 185$ м. Единицы измерения, принятые в задаче: давление - МПа, тротильный эквивалент – кг, расстояние – м.

Деревянные здания (средняя степень разрушения) разрушаются при избыточном давлении 8-12 кПа. Изменяя исходные данные в Excel-таблице, приходим к оценке расстояния, при котором будут разрушены деревянные здания, - 330-440 м.

	A	B	C	D
1	ΔP , МПа			
2	0,02			
3	C, кг			
4	40000			
5	R , м	$R_x = R/\sqrt[3]{C}$	$\Delta P(R) - \frac{0,084}{R_x} - \frac{0,27}{R_x^2} - \frac{0,7}{R_x^3} = 0$	
6	10	0,292		-31,425
7	15	0,439		-9,871
8	20	0,585		-4,413
9
10	230	6,725		-0,001
11	235	6,871		0,000
12	240	7,018		0,001
13	245	7,164		0,001
14
15				

Рис. 3.4. Фрагмент электронной таблицы с решением задачи №1.

Ответ (вариант 1): кирпичные здания будут разрушены на расстоянии 185-235 м, деревянные – 330-440 м.

В варианте 2 задачи 1 следует обратить внимание на определение тротилового эквивалента. Взрывчатым веществом является дымный порох. Из таблицы 4.2 следует, что энергия взрыва дымного пороха составляет 2790 кДж/кг, а у ТНТ – 4240 кДж/кг. Составляя пропорцию $20 / 4240 = C / 2790$, приходим к величине тротилового эквивалента $C = 13,16 \text{ т} \times 1,8 = 23,689 \text{ т}$. Коэффициент 1,8 учитывает, что взрыв происходит на грунте (для грунта этот коэффициент 1,2 – 1,8; для оценок использовано максимальное значение). Дальнейшее решение выполняется аналогично варианту 1.

Ответ (вариант 2): кирпичные здания будут разрушены на расстоянии 150-195 м, деревянные – 280-370 м.

Задача №2.

Вдоль дороги, по которой перевозят ВВ установлена зона безопасности, ограниченная расстоянием в 25 м от дороги. Под зоной безопасности будем понимать территорию, на которой вероятность поражения человека (летальный исход) должна быть не более 0,005. Какова предельная масса гексогена, которую можно перевозить по дороге?

Решение.

Исходные данные задачи:

- расстояние от места взрыва до человека $R = 25$ м;
- взрывчатое вещество – гексоген;
- вероятность поражения человека $P \leq 0,005$.

Фактически задача сводится к решению нелинейного уравнения $F(M) - 0.005 = 0$, где M – масса ВВ. Для решения уравнения можно воспользоваться одним из методов численного решения нелинейных уравнений, или использовать процедуру подбора.

Подберем массу ВВ. Энергетический эквивалент гексогена составляет 5540 кДж/кг (таблица 3.2). Для величины тротилового эквивалента, имеем $C = (M * 5540 / 4240) * 2$. Коэффициент 2 учитывает отражение ударной волны от дороги (бетонная подложка). Для определенности зададим в k -ом столбце n -ой строки численное значение $M = 200$ кг. В последующих столбцах последовательно рассчитывается тротильный эквивалент, приведенное расстояние при $R=25$ м, избыточное давление на фронте ударной волны – P , значение пробит функции на расстоянии 25 м от дороги $Pr = -77.1 + 6.91 \cdot \ln \Delta P$, вероятность поражения человека

$$\Phi(Pr) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr} \exp(-t^2/2) dt .$$

В следующем столбце вычисляем значение выражения $F = \Phi(Pr) - 0.005$. Все вычисления повторяются в последующих строках, но уменьшается масса гексогена. Эти вычисления повторяются до тех пор, пока в одной строке функция $F = \Phi(Pr) - 0.005 > 0$, а в следующей строке $F = \Phi(Pr) - 0.005 < 0$, то есть

функция меняет знак. Чем меньше интервал изменения ΔM при котором функция меняет знак, тем точнее найдено значение массы гексогена, перевозка которой допущена по дороге.

Задача №2. Вдоль дороги, по которой перевозят ВВ установлена зона безопасности, ограниченная расстоянием в 25 м от дороги. Под зоной безопасности будем понимать территорию, на которой вероятность поражения человека (летальный исход) должна быть не более 0,005.							
Какова предельная масса гексогена, которую можно перевозить по дороге?							
Исходные данные задачи:							
расстояние от места взрыва до человека $R = 25$ м;							
взрывчатое вещество – гексоген;							
вероятность поражения человека $P \leq 0,005$.							
M, kg	C, kg	Rn	dP, Мпа	Pr	$\Phi(M)$	$F=\Phi(M)-0.005$	
200	522.64	3.110127	0.07818986	0.754246	0.774649	0.7696493	
100	261.32	3.917609	0.050676098	-2.24252	0.012464	0.0074638	
90	235.19	4.057498	0.04758161	-2.67791	0.003704	-0.001296	
95	248.25	3.985099	0.049140602	-2.45513	0.007042	0.0020416	
94	245.64	3.999167	0.048830744	-2.49884	0.00623	0.00123	
93	243.03	4.013435	0.048519932	-2.54297	0.005496	0.0004958	
92	240.42	4.02791	0.048208149	-2.58751	0.004834	-0.000166	
92.5	241.72	4.020647	0.048364163	-2.56519	0.005156	0.000156	
Ответ: По дороге можно перевозить не более 92.5 кг гексогена.							

Рис. 3.5. Фрагмент электронной таблицы с решением задачи №2.

Задача №3.

Какова вероятность поражения человека при взрыве 10 тонн октогена на бетонной подложке, если расстояние от места взрыва 50 метров, 100 метров?

Решение.

Исходные данные:

- взрывчатое вещество – октоген;
 - масса взрывчатого вещества – 10 т;
 - поверхность, на которой происходит взрыв – бетонная подложка;
 - расстояние от места взрыва до человека (R) – 50 м., 100 м.
- Необходимо определить вероятность поражения человека (Ф).

$$\Phi(\text{Pr}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\text{Pr}} \exp(-t^2 / 2) dt .$$

$$\text{Pr} = -77.1 + 6.91 \cdot \ln \Delta P .$$

То есть, решение задачи первоначально сводится к определению избыточного давления на фронте ударной волны ΔP . Для расчета избыточного давления можно воспользоваться приближением Садовского (3.3):

$$\Delta P(R) = \frac{0,084}{R_n} + \frac{0,27}{R_n^2} + \frac{0,7}{R_n^3},$$

$$R_n = R / \sqrt[3]{C} .$$

Для значения R=50 м. Подставляя исходные данные в соответствующие формулы, приходим к численному значению избыточного давления 0,28638 МПа. Численное значение избыточного давления, выраженное в Па, позволяет рассчитать значение пробит-функции:

$$\text{Pr} = -77.1 + 6.91 \cdot \ln \Delta P .$$

В результате получаем значение $\text{Pr} = 9,7249$. Для расчета вероятности $\Phi(\text{Pr})$ можно воспользоваться функцией «НОРМСТРАСП» (т.е. нормальное стандартное распределение) программного продукта Excel.

Результатом будет являться значение 1 (или 100%), то есть в пределах данного расстояния (< 50 м) летальный исход для человека в результате аварии составляет 100%. Напомним, что под выражением летальный исход для человека понимается гибель человека с вероятностью 50%. Это следует из определения данной пробит-функции.

Аналогичный расчет для значения R=100 м приводит к летальному исходу для человека с вероятностью 34,1%.

Задача №4.

На каком расстоянии от места взрыва будут разрушены (средняя степень разрушения) деревянные здания при взрыве 20 тонн тринитротолуола (ТНТ) на бетонной подложке. Деревянные здания (средняя степень разрушения) разрушаются при избыточном давлении 8-12 кПа. Представить график зависимости избыточного давления на фронте ударной волны от расстояния, с указанием давления, отвечающего разрушению.

Пояснения к решению:

Зависимость избыточного давления ΔP на фронте ударной волны от расстояния R , выраженного в метрах, представлена

выражением
$$\Delta P(R) = \frac{0,084}{R_n} + \frac{0,27}{R_n^2} + \frac{0,7}{R_n^3},$$
 где $\Delta P(R)$ -

избыточное давление в Мпа, R_n – приведенное расстояние, которое можно определить по формуле $R_n = R/\sqrt[3]{C}$. Тротиловый эквивалент C будет равен массе взрывчатого вещества, выраженной в кг, так как исходное взрывчатое вещество ТНТ. Но поскольку взрыв происходит на бетонной подложке, то следует учесть коэффициент 2, то есть $C = 40000$ кг.

Для решения задачи используем вычислительную среду MatLab.

```
r=[100:5:450];  
C=40000;  
Rn=r./C^0.333;
```

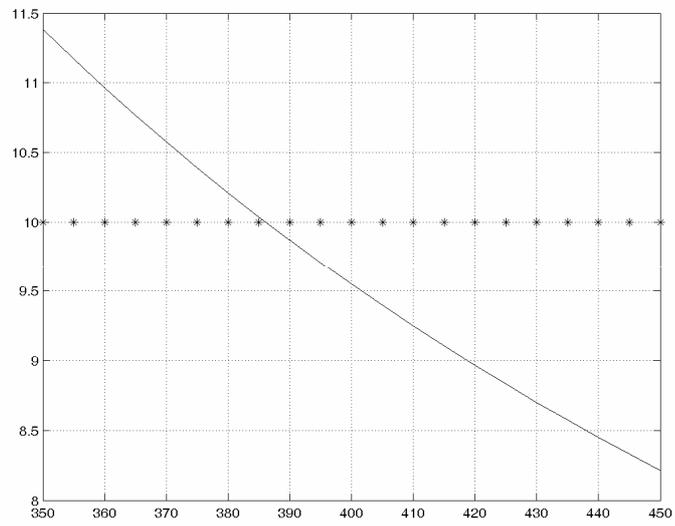
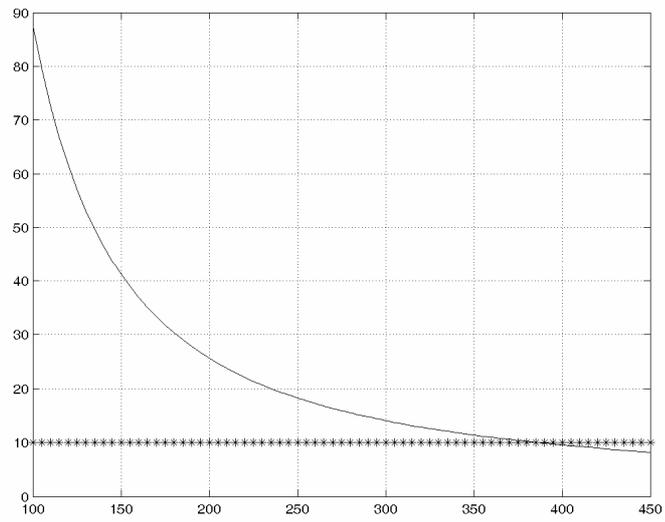


Рис. 3.6. Графики, отвечающие решению задачи 4.

```

Rn2=Rn.^2;
Rn3=Rn.^3;
DP=(0.084./Rn+0.27./Rn2+0.7./Rn3)*1000;
plot(r,DP,'k-',r,10,'k*'); grid on;
xlabel('r,m');
ylabel('P, kPa');
title('P=f(r)').

```

Результат работы программы представлен на верхнем рисунке 3.6. Здесь знаком '*' выделено среднее значение давления, отвечающее разрушению деревянных зданий. Для уточнения ответа изменим диапазон изменения переменной r – расстояние от точки $r = 350$ м до точки $r = 450$ м. $r = [350:5:450]$;

График, отвечающий решению задачи, представлен на нижнем рисунке 3.6. Этот график позволяет достаточно точно выделить решение задачи, как точку пересечения графиков.

Ответ: деревянные здания при взрыве 20 тонн тринитротолуола (ТНТ) будут разрушены (средняя степень разрушения) на расстоянии 385 м от места взрыва.

3.2.4. Задачи для самостоятельного решения

1. На каком расстоянии от места взрыва будет повален лес, если произошел взрыв 30 тонн тринитробензола?
2. Произошел взрыв 15 тонн гексогена. На каком минимальном расстоянии от места взрыва вероятность гибели человека составляет менее 0,002? Взрыв происходит на бетонной подложке.
3. На каком расстоянии от места взрыва вероятность поражения человека составит 0.5; взрывчатое вещество – гексоген.
4. На каком расстоянии от техногенного объекта можно прокладывать подземный трубопровод, если на объекте возможен взрыв 10 тонн аммонийной селитры?

5. На каком расстоянии от техногенного объекта вероятность поражения человека ударной волной не превышает значения 0.0001, если на объекте возможен взрыв 20 тонн пикрата аммония?
6. Каковы границы зон 100% и 50% поражения человека при взрыве 20 тонн гексогена на бетонной подложке.

3.3. Список литературы к главе 3

1. Неустановившиеся движения сплошной среды / Станюкевич К. П. М., “Наука”, 1971.
2. Точечный взрыв. (Методы расчета. Таблицы). / Кестенбойм Х. С., Росляков Г. С., Чудов Л. А., М., “Наука”, 1974.
3. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Книга 1 / В.А. Котляревский, К.Е. Кочетков, А.А. Носач, А.В. Забегаев и др. Под ред.: К.Е. Кочеткова, В.А. Котляревского и А.В. Забегаева, — М., Издательство АСВ, 1995. — 320 с.
4. 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. — РАО “ГАЗПРОМ”. М.: 1996

4. Прогнозирование последствий объемных взрывов

4.1. Общие сведения о газопаровоздушных смесях

В зависимости от давления P и температуры T вещество может находиться в различных агрегатных состояниях (рис. 4.1). Для сжиженных газов их охлаждают и сжимают до параметров, соответствующих жидкой фазе, которые в общем случае могут отличаться от давления и температуры окружающей среды. Участок кривой АВ отвечает условию равновесия двух фаз – жидкости и пара (линия насыщенного пара). Тройная точка А фиксирует одновременное равновесие трех фаз. В критической точке В пропадает различие между жидкостью и паром. Резкой границы между паром и газом не существует. Поэтому их обычно обозначают как газопаровоздушные смеси (ГПВС).

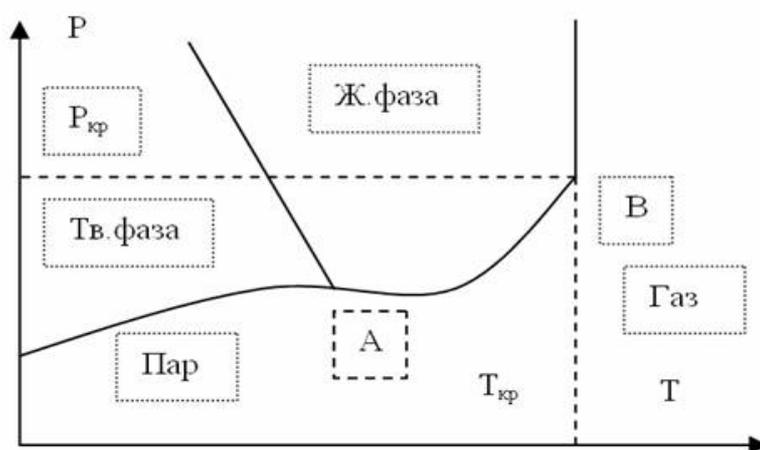


Рис. 4.1. Диаграмма состояния.

В теплоизолированных сосудах и резервуарах при отрицательных температурах хранят сжиженные газы (метан, азот, кислород), которые называют криогенными веществами. Критическая температура таких веществ ниже, чем температура

окружающей среды. При аварийном разрушении емкости с криогенной жидкостью происходит выброс, вскипание с быстрым испарением и образуется облако с ГПВС. Для горючих жидкостей воспламенение облака ГПВС происходит при наличии источника зажигания.

Вещества другой характерной группы (пропан, бутан, аммиак, хлор) хранят в жидком состоянии под давлением в сосудах при температуре окружающей среды. Они в состоянии перегретой жидкости.

Таблица 4.1

Значения критических параметров и плотности $\rho_{сж}$ в сжиженном состоянии некоторых веществ

Вещество	$T_{кипения}, ^\circ C$ при $P=0.1$ МПа	$T_{кр}, ^\circ C$	$P_{кр}, Мпа$	$\rho_{сж}, кг/м^3$
Водород H_2	-252	-240	1.28	
Азот N_2	-196	-147	3.40	
Кислород O_2	-183	-118	5.05	
Метан CH_4	-164	-82	4.65	
Этилен C_2H_4	-103.7	9.5	5.02	567
Этан C_2H_6	-88.6	32.1	4.83	546
Пропилен C_3H_6	-47.7	91.4	4.55	608
Пропан C_3H_8	-42.17	96.8	4.21	582
Хлор Cl	-34.5	144	7.7	
Аммиак CH_3	-33.35	132.4	11.3	682
Бутан C_4H_{10}	-0.6	153	3.7	601
Двуокись углерода CO_2	-78.52	31		1180
Вода	100	374	21.8	1000

Взрывы газопаровоздушных смесей (ГПВС) образуют класс объемных взрывов. Составы газопаровоздушных смесей при взрыве могут быть самые разнообразные. Статистика 150 аварий России и стран СНГ в период 1970.-.1989 годы показывает, что при взрыве участвовали: 42.5% - углеводородные газы; 15.5% - пары легковоспламеняющихся жидкостей; 18% - водород.

Сразу после поджига взрывоопасной смеси скорость взрыва ничтожна - всего полметра в секунду. Однако газовая смесь, разогретая пламенем, вскоре расширяется в 8 раз, и скорость пламени достигает величины около пяти метров/сек. А затем фронт взрыва на открытых пространствах разгоняется до 150 м/сек... Для справки: скорость урагана, когда сносит крыши, людей и технику, - всего 30 м/сек....

Последствия, вызванные такими взрывами, хорошо известны. Например, катастрофа (1989 г.) на перегоне Улу-Теляк - Аша в момент встречи двух пассажирских поездов (воспламенились пары пропан-бутан-бензина). В общей сложности пострадали 1800 человек, из них около 550 скончались.

Как разгорается газовая смесь при медленном взрыве в помещении? А происходит там вот что. Скажем, забыли закрыть газовую конфорку. Спустя какое-то время возникает невидимое облако взрывоопасной смеси. При появлении открытого огня возможно следующее. Первое. Сразу вылетает старая оконная рама со стеклами, а вместе с ней и еще не сгоревшая до конца газовая взрывчатка. Все ограничивается достаточно безобидным хлопком. Вариант №2 - худший. У вас стоят новенькие, только что купленные окна, герметичные, прочные. При взрыве газа будет подниматься давление. Когда в результате дефлаграции наберется всего 0.1 атм. - можно уже не беспокоиться ни о чем. Ни один бункер не выдержит этого давления. Дальше начинают рушиться стены и перекрытия...

Отсюда следует практический вывод - при любых обстоятельствах, во всех зданиях и помещениях, где возможны аварийные взрывы газа, предусмотреть заблаговременный сброс внутреннего давления. Как? С помощью люков, специальных оконных рам, что распахиваются автоматически наружу при взрыве, особых сортов стекол и так далее.

Сгорание ГПВС может проходить как в режиме детонации, так и в режиме дефлаграции. Эти два режима различаются по механизму инициирования и распространения фронта горения. При детонации происходит самовоспламенение за счет интенсивного

сжатия смеси сверхзвуковой ударной волной. При дефлаграции воспламенение слоев смеси перед фронтом горения происходит за счет радиационно-конвективного нагрева до температуры воспламенения. Скорость распространения фронта горения при дефлаграции (кроме смесей с водородом и ацетиленом) около 0,4 метров в секунду.

Основными характеристиками взрывного сгорания являются: величина избыточного давления; импульсы фазы сжатия и разрежения. В 'ближней' зоне избыточное давление при детонации значительно превышает избыточное давления при дефлаграции. В «дальней» зоне различия в величинах избыточного давления могут быть незначительны.

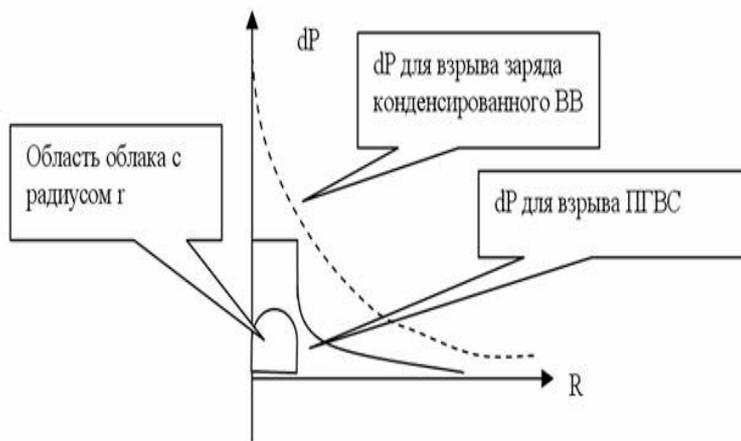


Рис. 4.2. Изменение давления в точке при взрыве ГПВС и конденсированного ВВ.

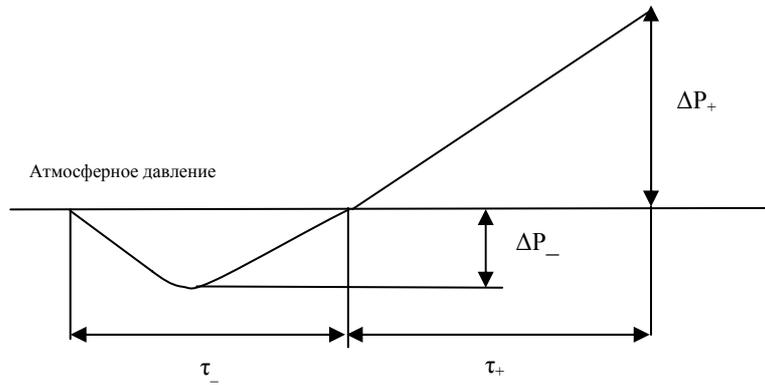


Рис. 4.3. Характерный профиль ударной волны.

4.2. Детонация газопаровоздушной смеси

В таблицах 4.2, 4.3 представлены некоторые характеристики ГПВС. Детонация возможна если размер и концентрация в облаке ГПВС отвечает данным указанных таблиц.

Таблица 4.2

Минимальная энергия E_{\min} , объемная концентрация топлива C_g и минимальный диаметр облака d инициирования ГПВС в свободном пространстве

Горючий компонент	C_g , %	E_{\min} , Дж	d_{\min} , м
Ацетилен C_2H_2	12.5	$1.3 \cdot 10^2$	3.12
Водород H_2	29.6	$4.2 \cdot 10^6$	109.6
Пропан C_3H_8	5.7	$2.5 \cdot 10^6$	85.8
Пропилен C_3H_6	6.6	$7.6 \cdot 10^5$	58.5
Этан C_2H_6	5.7	$5.1 \cdot 10^6$	109.6
Этилен C_2H_4	9.5	$1.2 \cdot 10^5$	31.2
Метан CH_4	12.3	$2.3 \cdot 10^8$	398.0

Таблица 4.3

**Концентрационные (об.%) пределы детонации и
воспламенения ГПВС в неограниченном пространстве и в
замкнутых объемах**

Горючий компонент	Детонация				Воспламенение	
	Неогр. прост.		Замкн. прост.		Нижн.	Верхн.
	Нижн.	Верхн.	Нижн.	Верхн.		
Ацетилен C ₂ H ₂			4.2	50.0	2.5	80.0
Бутан C ₄ H ₁₀	2.5	5.2	1.98	6.18	1.8	8.4
Водород H ₂			18.3	58.9	4.0	75.0
Пропан C ₃ H ₈	3.0	7.0	2.57	7.37	2.1	9.5
Пропилен C ₃ H ₆	3.5	8.5	3.55	10.4	2.4	11.0
Этан C ₂ H ₆	4.0	9.2	2.87	12.2	3.0	12.4
Этилен C ₂ H ₄			3.32	14.7	2.7	36.0
Бензол C ₆ H ₆			1.6	5.55	1.3	7.9
Ксилол C ₆ H ₁₀					1.1	6.4
Метан CH ₄					5.0	15.0
Аммиак NH ₃					15.5	27.0
Двуокись углерода CO ₂					12.5	74.2
Сероводород H ₂ S					4.3	45.5

Аппроксимация параметров ударной волны при взрыве горючих смесей углеводородов с воздухом или кислородом: избыточное давление на фронте ударной волны dP , Па; удельный импульс I , Па·с [1].

$$dP = P_0 \bar{P}, \quad (4.1)$$

$$\lg \bar{P} = 0.65 - 2.18 \lg R_n + 0.52 (\lg R_n)^2, \quad R_n = R / \sqrt[3]{C}, \quad (4.2)$$

$$I = \bar{I} \cdot \sqrt[3]{C} \quad (4.3)$$

$$\lg \bar{I} = 2.11 - 0.97 \lg R_n + 0.44 (\lg R_n)^2 \quad (4.4)$$

$$C = 2mQ_{m,CTX} / Q_T, \quad m = \rho_{CTX} V_0 \quad (4.5)$$

C - тротиловый эквивалент наземного взрыва полусферического облака ГПВС, кг; m - масса горючего облака, кг; Q_T - теплота взрыва тротила ($3.184 \cdot 10^6$ Дж/кг); P_0 - атмосферное давление, Па.

При взрыве скорость детонационной волны D [м/с] и максимум избыточного давления на фронте детонационной волны (химический пик) ΔP отвечают соотношениям:

$$D = \sqrt{2(\gamma^2 - 1)Q_m} \quad (4.6)$$

$$\Delta P = 4(\gamma - 1)Q_m \rho_{CTX} - P_0 \quad (4.7)$$

где Q_m - теплота взрыва, Дж/кг.

Некоторые характеристики газопаровоздушных смесей представлены в таблице 4.4. В таблице приняты обозначения: D м/с - скорость распространения детонационной волны, $\gamma_{CTX} = C_p/C_v$ - отношение теплоемкостей при постоянном давлении и объеме, μ_r - молекулярный вес; dP_2 - давление в детонационной волне в точке Жуге (точка перехода от адиабаты исходного вещества к адиабате продуктов детонации).

Таблица 4.4

Характеристики газопаровоздушных смесей

Горючий компонент	D , м/с	ρ_{CTX} , кг/м ³	$Q_{m,CTX}$, МДж/кг	$Q_{v,CTX}$, МДж/м ³	γ_{CTX}	μ_r	C_{CTX} , об%	dP_2 , МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Газовоздушные смеси								
Аммиак CH_3	1630	1.18	2.37	2.791	1.25	17	19.7	1.29
Ацетилен C_2H_4	1990	1.278	3.387	4.329	1.26	26	7.75	2.14
Бутан C_4H_{10}	1840	1.328	2.776	3.684	1.27	58	3.13	1.88
Водород H_2	1770	0.933	3.425	3.195	1.25	2	29.59	1.20
Метан CH_4	1750	1.232	2.763	3.404	1.26	16	9.45	1.57

Продолжение таб.4.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Окись углерода CO	1840	1.280	2.93	3.75	1.26	28	29.59	1.82
Пропан C ₃ H ₈	1850	1.315	2.801	3.676	1.26	44	4.03	1.89
Пропилен C ₃ H ₆	1840	1.314	2.922	3.839	1.26	42	4.46	1.87
Этан C ₂ H ₆	1800	1.25	2.797	3.496	1.26	30	5.66	1.69
Этилен C ₂ H ₄	1880	1.285	3.010	3.869	1.26	28	6.54	1.91
Паровоздушные смеси								
Ацетон C ₃ H ₆ O	1910	1.21	3.112	3.766	1.259	42	4.99	1.85
Бензин авиационный	-	1.35	2.973	3.77	-	94	2.10	-
Бензол C ₆ H ₆	1860	1.35	2.937	3.966	1.261	78	2.84	1.96
Ксилол C ₆ H ₁₀	1820	1.355	2.830	3.834	1.259	106	1.96	1.89
Толуол C ₇ H ₈	1830	1.35	2.843	3.838	1.260	92	2.23	1.90

4.2.1. Примеры решения задач

Пример 1.

Каков объем облака ГПВС, если газовая смесь стехиометрического состава с объемной концентрацией $C_{стх}$, молекулярной массой горючей компоненты μ и массой M .

Решение.

Число молей горючей компоненты равно M/μ . Один киломоль идеального газа занимает объем $V_a = 22.4 \text{ м}^3$. В приближении идеального газа, объем горючей компоненты есть $V_a \cdot M/\mu$. Учитывая, что объемная концентрация горючей компоненты $C_{стх}$, для объема облака V имеем

$$V = K \cdot V_a \cdot M / (\mu \cdot C_{\text{стх}}),$$

где коэффициент K принимается в зависимости от способа хранения продукта: $K=1$ - для газов при атмосферном давлении; 0.5 - для газов сжиженных под давлением; 0.1 - для газов сжиженных охлаждением; $0.02-0.07$ - при растекании легко воспламеняющихся жидкости.

Пример 2.

Определить параметры ударной волны на расстоянии $R=200$ м от центра взрыва. Взрыв облака ГПВС, образованного при разрушении резервуара с $M=10^6$ кг сжиженного пропана.

Исходные данные: коэффициент определяемый способом хранения $K=0.5$; $C_{\text{стх}}=4.03\%$; $Q_{\text{м,стх}} = 2.801 \cdot 10^6$ Дж/кг; $\mu_r = 44$; $\rho_{\text{стх}} = 1.315$ кг/м³; $P_0 = 1.013 \cdot 10^5$ Па.

Объем ГПВС по формуле $V = K \cdot V_a \cdot M / (\mu \cdot C_{\text{стх}})$.

$$V = 0.5 \cdot 22.4 \cdot 10^6 / (34 \cdot 0.0403) = 6.316 \cdot 10^6 \text{ м}^3.$$

$$m = \rho_{\text{стх}} V = 1.315 \cdot 6.316 \cdot 10^6 = 8.31 \cdot 10^6 \text{ кг} - \text{масса газового}$$

облака;

$$C = 2mQ_{\text{м,стх}}/Q_T = 2 \cdot 8.31 \cdot 10^6 \cdot 2.801 \cdot 10^6 / (3.184 \cdot 10^6) = 1.11 \cdot 10^7$$

кг - тротильный эквивалент;

$$R_n = 200 / (1.11 \cdot 10^7)^{1/3} = 0.897 \text{ м/кг}^{1/3}.$$

Избыточное давление

$$\lg \bar{P} = 0.65 - 2.18 \lg 0.897 + 0.52 (\lg 0.897)^2 = 0.754.$$

$$\bar{P} = 10^{0.754} = 5.675; \quad dP = 1.013 \cdot 10^5 \cdot 5.675 = 5.76 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

Удельный импульс

$$\lg \bar{I} = 2.11 - 0.97 \lg 0.897 + 0.04 (\lg 0.897)^2 = 2.156.$$

$$\bar{I} = 10^{2.156} = 143.2; \quad I = 143.2 (1.11 \cdot 10^7)^{1/3} = 3.19 \cdot 10^4 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

Ответ: избыточное давление взрыва составляет $5,76 \cdot 10^5$ Па, удельный импульс $3,19 \cdot 10^4$ Па · с.

Пример 3.

По дороге автоцистерной перевозят сжиженный этан. Какая масса этана M может быть перевезена, если вдоль дороги установлена зона безопасности с расстоянием $R=25$ м. Под границей зоны безопасности будем понимать расстояние от дороги, где вероятность поражения человека не превышает величины $\Phi^* = 10^{-4}$.

Исходные данные:

коэффициент определяемый способом хранения сжиженного газа - $K=0.5$;

стехиометрическая концентрация - $C_{\text{СТХ}}=5.66\%$;

теплота взрывного превращения - $Q_{\text{м,СТХ}} = 2.797 \cdot 10^6$ Дж/кг;

молекулярный вес $\mu_r = 30$;

плотность $\rho_{\text{СТХ}} = 1.25$ кг/м³;

атмосферное давление $P_0 = 1.013 \cdot 10^5$ Па.

Решение.

Объем ГПВС по формуле $V = K \cdot V_a \cdot M / (\mu \cdot C_{\text{СТХ}})$

$$V = 0.5 \cdot 22.4 \cdot M / (20 \cdot 0.0566), \text{ м}^3.$$

Масса газового облака - $m = \rho_{\text{СТХ}} V = 1.25 \cdot V$, кг.

Тротиловый эквивалент - $C = 2mQ_{\text{м,СТХ}} / Q_T$, кг.

Безразмерное расстояние R_n м/кг^{1/3}.

Логарифм избыточного давления $\lg \bar{P} = 0.65 - 2.18 \dots$

Избыточное давление $\Delta p = P_0 \cdot \bar{P}$ Па.

Выражение для значения пробит функции

$Pr = -77.1 + 6.91 \cdot \ln \Delta p$, где избыточное давление Δp

выражается в Па.

Для оценки вероятности поражения человека, имеем

$$\Phi(Pr) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr} \exp(-t^2 / 2) dt .$$

Решением задачи является значение массы, при которой функция

$f = \Phi(\text{Pr}) - \Phi^* = \Phi(\text{Pr}) - 10^{-4}$ меняет знак.

На рис. 5.4. представлен фрагмент электронной таблицы с решением задачи №3.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	M, кг	V, м3	m, кг	C, кг	Rn	LgP	P	dP, Па	Pr	Φ	F=Φ-E-4	
2												
3												
4	500	3298.0	4122.5	5511.8	1.419	0.330	2.140	216811.1	7.802	1.00000	0.99990	
5	250	1649.0	2061.2	2755.9	1.788	0.133	1.358	137604.6	4.660	1.00000	0.99990	
6	200	1319.2	1649.0	2204.7	1.926	0.072	1.179	119479.2	3.684	0.99989	0.99979	
7	150	989.4	1236.7	1653.5	2.119	-0.006	0.987	99956.0	2.451	0.99288	0.99278	
8	100	659.6	824.5	1102.4	2.426	-0.112	0.773	78281.4	0.762	0.77707	0.77697	
9	50	329.8	412.2	551.2	3.056	-0.285	0.519	52538.2	-1.993	0.02312	0.02302	
10	40	263.8	329.8	440.9	3.291	-0.339	0.458	46445.8	-2.845	0.00222	0.00212	
11	32	211.1	263.8	352.8	3.545	-0.391	0.406	41162.4	-3.679	0.00012	0.00002	
12	31.5	207.8	259.7	347.2	3.564	-0.395	0.403	40817.0	-3.738	0.00009	-0.00001	
13	31	204.5	255.6	341.7	3.583	-0.398	0.400	40469.4	-3.797	0.00007	-0.00003	
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												
23												
24												
25												

Рис.4.4. Фрагмент электронной таблицы с решением задачи №3.

Ответ: условиям безопасности отвечает масса 31.5 кг.

Пример 4.

По дороге перевозят сжиженный пропан. Представить зависимость допустимой массы пропана M, перевозимой по дороге, от ширины зоны безопасности - R. Под границей зоны безопасности будем понимать расстояние от дороги, где избыточное давление не превышает величины $P_{\max} = 6.5$ бар.

Исходные данные: коэффициент определяемый способом хранения $K=0.5$; $C_{\text{ctx}}=4.03\%$; $Q_{\text{m,ctx}} = 2.801 \cdot 10^6$ Дж/кг; $\mu_r = 44$; $\rho_{\text{ctx}} = 1.315$ кг/м³; $P_0 = 1.013 \cdot 10^5$ Па. (1 бар = 10^5 Па).

Решение задачи представим в виде программы Matlab.

```
R_0=10; dR=10; R_max=100; % Подготовка переменных для цикла по R %
dm=0.5; % Подготовка переменных для цикла по M %
k=1;
K=0.5; Va=22.4;
C_ct=4.03*0.01;
m_g=44;
p_ct=1.315;
p_0=1.013e+5; % Атмосферное давление, Па %
Q_ct=2.801e+6; % Энергия взрывного превращения пропана Дж/кг %
Q_t=4.24e+6; % Энергия взрывного превращения тротила Дж/кг %
P_max=6.5; % Предельное давление для человека, бар %

for R=R_0: dR: R_max,
    m=0.0; P=0; RR(k)=R;
    while P<P_max, m=m+dm;
        V=K*Va*m/(m_g*C_ct); % Объем газа %
        M=p_ct*V; % Масса газа %
        C=2*M*Q_ct/Q_t; %
        Трот.эквалент%
        Rn=R/C^0.333; % Безраз. радиус%
        P=10^(0.65-2.18*log10(Rn)+0.52*(log10(Rn))^2)*1.013; %бар %
        end ;
        MM(k)=m; k=k+1;
    end;
plot(RR,MM);
xlabel('R, m');
ylabel('M, kg');
title('M=f(R)');
grid on.
```

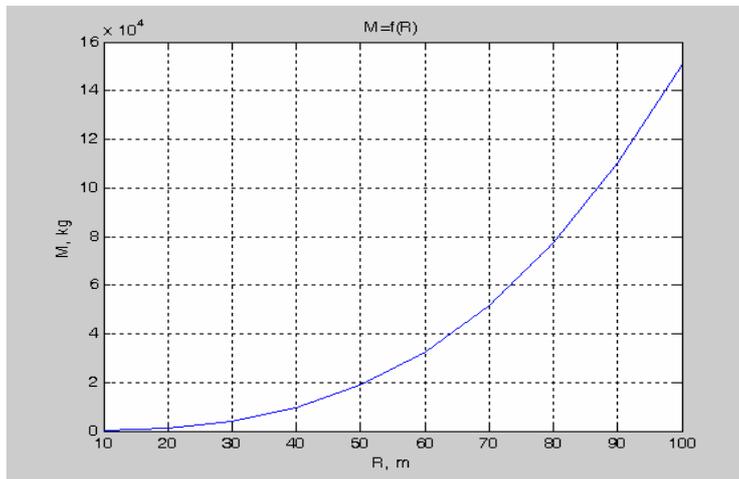


Рис. 4.5. График зависимости допустимой массы пропана от ширины зоны безопасности.

Пример 5.

В закрытом помещении с размерами $L_1 \cdot L_2$ и высотой H находится газовая плита, которая оказалась в неисправном состоянии. В результате бытовой газ стал поступать в помещение с массовым расходом q . Неисправность была обнаружена через временной интервал t с момента возникновения неисправности в плите.

Вариант 1 $L_1=3$ м., $L_2=3$ м., $H = 2.7$ м., $q = 5 \cdot 10^{-4}$ м³/с., $t = 30$ мин.

Вариант 2 $L_1=5$ м., $L_2=5$ м., $H = 2.7$ м., $q = 5 \cdot 10^{-4}$ м³/с., $t = 30$ мин.

Вариант 3 $L_1=5$ м., $L_2=5$ м., $H = 2.7$ м., $q = 5 \cdot 10^{-4}$ м³/с.

1. Оценить возможность взрыва газа в помещении при возникновении искры – P_{ex} и возможные последствия в отношении человека – вероятность гибели человека – Φ (вариант 1,2).

2. При каком значении t возникают условия для взрывного превращения, если $L_1 = L_2 = 5$ м. (вариант 3).

Решение.

Природный газ состоит на 98% из метана (CH_4), на остальную долю приходится более тяжёлые алканы, такие как этан (C_2H_6), пропан (C_3H_8), бутан (C_4H_{10}). Природный газ коксуют и газифицируют, после чего его удельная теплота сгорания повышается от начальных 16 МДж/м³ до 35 МДж/м³. Затем в газ добавляют присадки, для придания ему резкого запаха. Этот бытовой городской газ поступает в газовые плиты.

$$\text{Объем помещения: } V = L_1 * L_2 * H.$$

$$\text{Объем газа в помещении: } V_g = Q * T.$$

$$\text{Концентрация газа в помещении: } c = V_g / V.$$

По таблице 4.3 определяем, что дифлаграционный механизм взрывного превращения возможен, если концентрация газа в помещении находится в интервале от 5 до 15 % по объему. Учитывая, что в некоторых литературных источниках для природного газа приведено значение нижнего предела 2 % по объему, имеем для условия взрыва

$$2 < 100 * V_g / V < 15.$$

Энергетический эквивалент взрывного превращения, если объем газа – м³.

$$Q = 35 * V_g \text{ МДж.}$$

В тротиловом эквиваленте, с учетом данных таблицы 4.2 –

$$C = 35 * 1000 * V_g / 4240, \text{ кг.}$$

Для оценки давления на фронте ударной волны используем приближение (3.3)

$$\Delta P(R) = \frac{0,084}{R_n} + \frac{0,27}{R_n^2} + \frac{0,7}{R_n^3}, \quad \text{Мпа.}$$

Размер облака соизмерим со средним размером комнаты - $\langle L \rangle$. Давление, оказываемое на стены, соизмеримо с давлением в точке $\langle L \rangle$. Тогда, для оценки безразмерного радиуса имеем

$$R_n = R / \sqrt[3]{C} = \langle L \rangle / \sqrt[3]{C}.$$

Выражение для значения пробит функции

$$Pr = -77.1 + 6.91 \cdot \ln \Delta p,$$

где избыточное давление ΔP выражается в Па.

Для оценки вероятности поражения человека, имеем

$$\Phi(\text{Pr}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\text{Pr}} \exp(-t^2/2) dt .$$

Ответ: Взрывное превращение имеет место в варианте N=1, поражение человека с вероятностью $\Phi=1$.

Условия для взрывного превращения для случая $L_1=L_2=5$ м возникают, если временной интервал истечения газа t отвечает условию $45 \text{ мин.} \leq t \leq 335 \text{ мин.}$

Пример 4.¶
 В закрытом помещении с размерами $L_1 \times L_2$ и высотой H находится газовая плита, которая оказалась в неисправном состоянии. В результате бытового газ стал поступать в помещение с массовым расходом q . Неисправность была обнаружена через временной интервал t с момента возникновения неисправности в плите.¶
 1. Оценить возможность взрыва газа в помещении при возникновении искры E_{ign} .¶
 2. Оценить возможные последствия в отношении человека \rightarrow вероятность гибели человека Φ .¶
 3. При каком значении t возникают условия для взрывного превращения, если $L_1=L_2=5$ м.¶

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
	N	L1,	L2,	H,	q, м3/с	t,	Vg, м3	Vg, м3	c (об.%)	Pex	Q, мДж	C, кг	Rn	dP, Мпа	Pr	Φ
10		м	м	м		мин										
11	1	3.0	3.0	2.7	5.0E-04	30	24.3	9.0E-01	3.7E+00	1	31.5	7.5	1.5	0.4	11.92	1
12	2	5.0	5.0	2.7	5.0E-04	30	67.5	9.0E-01	1.3E+00	0	-	-	-	-	-	-
13																
14	3															
15		5.0	5.0	2.7	5.0E-04	40	67.5	1.2E+00	1.8E+00	0	-	-	-	-	-	-
16		5.0	5.0	2.7	5.0E-04	45	67.5	1.4E+00	2.0E+00	1	47.3	11.2	1.9	0.2	8.00	1
17		5.0	5.0	2.7	5.0E-04	120	67.5	3.6E+00	5.33E+00	1	126	29.9	1.4	0.5	13.32	1
18		5.0	5.0	2.7	5.0E-04	240	67.5	7.2E+00	1.07E+01	1	252	59.7	1.1	0.9	17.31	1
19		5.0	5.0	2.7	5.0E-04	300	67.5	9.0E+00	1.33E+01	1	315	74.6	1.0	1.0	18.63	1
20		5.0	5.0	2.7	5.0E-04	335	67.5	1.0E+01	1.49E+01	1	352	83.4	1.0	1.1	19.29	1
21		5.0	5.0	2.7	5.0E-04	340	67.5	1.0E+01	1.51E+01	0	-	-	-	-	-	-
22																

Рис.4.6. Фрагмент электронной таблицы с решением задачи №5.

4.2.2. Задачи для самостоятельного решения

1. В помещении объемом V хранится баллон с газом масса которого m . Возможен ли взрыв, воспламенение ПГВС, если баллон не герметичен?

Горючий компонент	$V, \text{ м}^3$	$m, \text{ кг}$
Ацетилен C_2H_2	100	5
	1000	5
	100	20
	1000	20
Пропан C_3H_8	100	5
	1000	5
	100	20
	1000	20

2. Какая масса тротила может вызвать инициирование облака с парами ацетилена, пропана, метана, если размер и концентрация газа отвечает критическим параметрам детонации?

3. Оценить возможность взрыва при 'травлении' метана из трубопровода (неограниченное пространство)

4.3. Методика прогнозирования последствий взрывов топливно-воздушных смесей

Методика оценки последствий аварийных взрывов[2], разработанная НТЦ "Промышленная безопасность", позволяет провести количественную оценку основных параметров воздушных ударных волн и определить степени вероятного

поражения людей и повреждений зданий при авариях с взрывами топливно-воздушных смесей (ТВС).

Методика рекомендуется для использования:

- при разработке декларации безопасности промышленных объектов;
- при проведении анализа опасностей и рисков взрывопожароопасных промышленных объектов;
- при разработке планов локализации и ликвидации последствий аварий;
- при разработке иных мероприятий, уменьшающих риск для персонала опасных промышленных объектов и проживающего вблизи населения.

Предполагается, что в смеси с воздухом участвует индивидуальный горючий газ, в противном случае (для смеси горючих газов) характеристики ТВС, используемые при расчетах параметров ударных волн, определяются отдельно.

Исходными данными для расчета параметров ударных волн при взрыве облака ТВС являются:

- характеристики горючего газа, содержащегося в облаке ТВС;
- агрегатное состояние ТВС (газовая или гетерогенная);
- средняя концентрация горючего газа в смеси (C_r);
- стехиометрическая концентрация горючего газа с воздухом ($C_{ст}$);
- масса горючего газа, содержащегося в облаке (M_r);
- удельная теплота сгорания горючего газа (q_r);
- информация об окружающем пространстве.

Основными структурными элементами алгоритма расчетов являются:

- определение эффективного энергозапаса ТВС;
- определение ожидаемого режима взрывного превращения ТВС;

- расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных ударных волн для различных режимов;
- определение дополнительных характеристик взрывной нагрузки;
- оценка поражающего воздействия взрыва ТВС.

4.3.1. Прогнозирование режима взрывного превращения

Определение эффективного энергозапаса ТВС

Эффективный энергозапас горючей смеси, определяется по соотношению:

$$\begin{aligned} E &= M_{\Gamma} q_{\Gamma}, & \text{при} & \quad C_{\Gamma} \leq C_{\text{ст}} \\ E &= M_{\Gamma} q_{\Gamma} C_{\text{ст}}/C_{\Gamma}, & \text{при} & \quad C_{\Gamma} > C_{\text{ст}} \end{aligned} \quad (4.8)$$

E – эффективный энергозапас ТВС, МДж;

M_{Γ} – масса горючего газа в облаке ТВС, кг;

q_{Γ} – удельная теплота сгорания газа, МДж/кг;

C_{Γ} – концентрация газа в смеси, кг/м³;

$C_{\text{ст}}$ – стехиометрическая концентрация вещества в смеси с воздухом, кг/м³.

При расчете параметров взрыва облака, лежащего на поверхности земли, величина эффективного энергозапаса удваивается. Для оценки объема газового облака ТВС можно воспользоваться соотношением: $V = M_{\Gamma}/C_{\text{ст}}$.

Примечания:

1) стехиометрическая концентрация горючего в ТВС определяется из справочных данных или рассчитывается отдельно. Для перевода концентрации из объемных долей в единицы [кг/м³] используется соотношение $C[\text{кг/м}^3] = 0,01 \cdot C[\% \text{ об.}] \rho_{\Gamma}$

2) в случае, если определение концентрации горючего газа в смеси затруднено, в качестве величины C_{Γ} в соотношении (4.8)

принимается концентрация, соответствующая нижнему концентрационному пределу воспламенения горючего газа.

3) теплота сгорания горючего газа q_r в ТВС берется из справочных данных или оценивается по формуле: $q_r = 44 \beta$, (МДж/кг), где корректировочный параметр β наиболее распространенных в промышленном производстве опасных веществ определяется из таблицы 4.5.

Классификация окружающей территории

В связи с тем, что характер окружающего пространства в значительной степени определяет скорость взрывного превращения облака ТВС и, следовательно, параметры ударной волны, геометрические характеристики окружающего пространства разделены на виды в соответствии со степенью их загроможденности.

Вид 1. Наличие длинных труб, полостей, каверн, заполненных горючей смесью, при сгорании которой возможно ожидать формирование турбулентных струй продуктов сгорания с размером не менее трех размеров детонационной ячейки данной смеси. Если размер детонационной ячейки для данной смеси неизвестен, то минимальный характерный размер турбулентных струй принимается равным 5 см для веществ класса 1, 20 см – для веществ класса 2, 50 см – для веществ класса 3 и 150 см – для веществ класса 4.

Вид 2. Сильно загроможденное пространство: наличие полузамкнутых объемов, высокая плотность размещения технологического оборудования, лес, большое количество повторяющихся препятствий.

Вид 3. Средне загроможденное пространство: отдельно стоящие технологические установки, резервуарный парк.

Вид 4. Слабо загроможденное и свободное пространство.

Таблица 4.5

Классификация горючих смесей по степени чувствительности

Класс 1 Особо чувствительные вещества (размер детонационной ячейки менее 2 см)		Класс 2 Чувствительные вещества (размер детонационной ячейки в пределах от 2 до 10 см)		Класс 3 Средне чувствительные вещества (размер детонационной ячейки в пределах от 10 до 40 см)		Класс 4 Слабо чувствительные вещества (размер детонационной ячейки более 40 см)	
1		2		3		4	
	β		β		β		β
ацителен	1,1	акрилонитрил	-	ацетальдегид	0,56	аммиак	0,42
винилацетелен	1,03	акролеин	0,62	ацетон	0,65	бензол	0,88
водород	2,73	бутан	1,04	бензин	1	декан	1
гидразин	0,44	бутилен	1	винилацетат	0,51	дизтопливо	1
изопропилнитрат	0,41	бутадиен	1	винилхлорид	0,42	о-дихлорбензол	0,42
метилацетелен	1,05	1,3 пентадиен	1	гексан	1	бензол додекан	1
нитрометан	0,25	пропан	1,05	генераторный газ	-	керосин	1
окись пропилена	-	пропилен	1,04	изооктан	1	метан	1,14
окись этилена	0,62	сероуглерод	0,32	метиламин	0,7	метилбензол	1
этилнитрат	0,3	этан	1,08	метилацетат	-	метилмеркаптан	0,53
		этилен	1,07	метилбутилкетон	-	метилхлорид	-
		окись пропилена	0,7	метилпропилкетон	-	нафталин	0,91
		ШФЛУ	1	метилэтилкетон	-	окись углерода	0,23
		эфиры:		октан	-	фенол	-
		диметиловый	0,66	пиридин	0,77	хлорбензол	-
		дивиниловый	0,77	сероводород	0,34	этилбензол	-
		метилбутиловый	-	спирты:		дихлорэтан	0,25
		диэтиловый	0,77	метиловый	0,52	трихлорэтан	0,14
		диизопропиловый	0,82	этиловый	0,62		
				пропиловый	0,69		
				амиловый изобутиловый	0,79		
				изопропиловый	-		
				циклогексан	1		

1		2		3		4	
	β		β		β		β
				этилформиат	-		
				этилхлорид	-		
				СПГ (сжиженный природный газ)	1		
				кумол	0,84		
				печной газ	0,09		
				циклопропан	1		
				этиламин	0,8		

Классификация ожидаемого режима взрывного превращения

Для оценки параметров действия взрыва возможные режимы взрывного превращения ТВС разбиты на шесть диапазонов по скоростям их распространения, причем 5 из них приходится на процессы дефлаграционного горения ТВС.

Ожидаемый диапазон скоростей взрывного превращения определяется с помощью экспертной таблицы 4.6, в зависимости от класса топлива и вида окружающего пространства.

Таблица 4.6

Экспертная таблица для определения режима взрывного превращения

Класс смеси	Вид окружающего пространства			
	1	2	3	4
	Ожидаемый диапазон скорости взрывного превращения			
1	1	1	2	3
2	1	2	3	4
3	2	3	4	5
4	3	4	5	6

Ниже приводится разбиение режимов взрывного превращения ТВС по диапазонам скоростей.

Диапазон 1: Детонация или горение со скоростью фронта пламени 500 м/с и больше;

Диапазон 2: Дефлаграция, скорость фронта пламени 300-500 м/с;

Диапазон 3: Дефлаграция, скорость фронта пламени 200-300 м/с;

Диапазон 4: Дефлаграция, скорость фронта пламени 150-200 м/с;

Диапазон 5: Дефлаграция, скорость фронта пламени определяется соотношением:

$$V_{\Gamma} = k_1 \cdot M_{\Gamma}^{1/6}, \quad k_1 = 43. \quad (4.9)$$

Диапазон 6: Дефлаграция, скорость фронта пламени определяется соотношением:

$$V_{\Gamma} = k_2 \cdot M_{\Gamma}^{1/6}, \quad k_2 = 26. \quad (4.10)$$

Оценка агрегатного состояния ТВС

Для дальнейших расчетов необходимо оценить агрегатное состояние топлива смеси. Предполагается, что смесь гетерогенная, если более 50% топлива содержится в облаке в виде капель, в противном случае ТВС считается газовой. Провести такие оценки можно исходя из величины давления насыщенных паров топлива при данной температуре и времени формирования облака. Для летучих веществ, таких как пропан при температуре +20°C, смесь можно считать газовой, а для веществ с низким давлением насыщенного пара (распыл дизтоплива при +20°C) расчеты проводятся в предположении гетерогенной топливно-воздушной смеси.

4.3.2. Расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных ударных волн

После того, как определен вероятный режим взрывного превращения, рассчитываются основные параметры воздушных ударных волн (избыточное давление ΔP и импульс фазы сжатия I) в зависимости от расстояния от центра облака.

Детонация газовых и гетерогенных ТВС

Для вычисления параметров воздушной ударной волны на заданном расстоянии от центра облака R при детонации облака ТВС предварительно рассчитывается соответствующий безразмерный радиус R_x по соотношению:

$$R_x = R/(10E/P_0)^{1/3}. \quad (4.11)$$

Примечание: все соотношения также могут быть записаны в функциях аргумента $\lambda = R_0/E^{1/3}$ (используемом обычно для описания взрывов конденсированных ВВ). В принятых в методике допущениях между R_x и λ существует простая связь $\lambda=2,15 R_x$.

Далее рассчитываются безразмерное давление P_x и безразмерный импульс фазы сжатия I_x .

В случае детонации облака газовой ТВС расчет производится по следующим формулам:

$$\ln(P_x) = -1,124 - 1,66 \ln(R_x) + 0,26 (\ln(R_x))^2, \quad (4.12)$$

$$\ln(I_x) = -3,4217 - 0,898 \ln(R_x) - 0,0096 (\ln(R_x))^2. \quad (4.13)$$

Эти зависимости справедливы для значений R_x , больших величины $R_x=0,2$, в противном случае величина P_x полагается равной 18, а в выражение (4.13) подставляется значение $R_x=0,142$.

В случае детонации облака гетерогенной ТВС расчет производится по следующим формулам:

$$P_x = 0,125/R_x + 0,137/R_x^2 + 0,023/R_x^3, \quad (4.14)$$

$$I_x = 0,022/R_x. \quad (4.15)$$

Зависимости (4.14) и (4.15) справедливы для значений R_x , больших величины $R_k=0,25$, в случае если $R_x < R_k$, величина P_x полагается равной 18, а величина $I_x=0,16$.

Дефлаграция газовых и гетерогенных ТВС

В этом случае к параметрам, влияющим на величины избыточного давления и импульса положительной фазы, добавляются скорость видимого фронта пламени (V_f) и степень расширения продуктов сгорания (σ). Для газовых смесей принимается $\sigma = 7$, для гетерогенных – $\sigma = 4$. Для расчета параметров ударной волны при дефлаграции гетерогенных облаков величина эффективного энергозапаса смеси домножается на коэффициент $\chi = (\sigma-1)/\sigma$.

Безразмерные давления P_{x1} и импульс фазы сжатия I_{x1} определяются по соотношениям:

$$P_{x1} = (V_f/C_0)^2((\sigma-1)/\sigma)(0,83/R_x - 0,14/R_x^2), \quad (4.16)$$

$$I_{x1} = (V_f/C_0)((\sigma-1)/\sigma)(1-0,4(\sigma-1)V_f/\sigma C_0)(0,06/R_x + 0,01/R_x^2 - 0,0025/R_x^3). \quad (4.17)$$

Последние два выражения справедливы при $R_x > R_{кр}$, $R_{кр} = 0,34$, в противном случае $R_x = R_{кр}$.

Далее вычисляются величины (P_{x2}) и (I_{x2}), которые соответствуют режиму детонации и для случая детонации газовой смеси рассчитываются по соотношениям (4.12) и (4.13), а для детонации гетерогенной смеси – по соотношениям (4.14) и (4.15). Окончательные значения P_x и I_x выбираются из условия:

$$P_x = \min(P_{x1}, P_{x2}); \quad I_x = \min(I_{x1}, I_{x2}). \quad (4.18)$$

После определения безразмерных величин давления и импульса фазы сжатия, вычисляются соответствующие им размерные величины:

$$\Delta P = P_x \cdot P_0, \quad (4.19)$$

$$I = 100 \cdot I_x \cdot (0,1P_0)^{2/3} \cdot E^{1/3} / C_0. \quad (4.20)$$

4.3.3. Определение дополнительных характеристик взрыва ТВС

Импульсные характеристики проходящих и отраженных волн не зависят от скорости взрывного превращения. Характеристики волн рассчитываются по эмпирическим соотношениям.

Параметры падающей волны при детонации облака газовой смеси рассчитываются по следующим соотношениям:

Амплитуда фазы сжатия

$$\ln(\Delta P_+ / P_0) = 0,299 - 2,058 \cdot \ln \lambda + 0,26(\ln \lambda)^2. \quad (4.21)$$

Амплитуда фазы разрежения

$$\ln(\Delta P_- / P_0) = -1,46 - 1,402 \cdot \ln \lambda + 0,079(\ln \lambda)^2. \quad (4.22)$$

Длительность фазы сжатия

$$\ln(\tau_+ / E^{1/3}) = 0,106 + 0,448 \cdot \ln \lambda - 0,026(\ln \lambda)^2. \quad (4.23)$$

Длительность фазы разрежения

$$\ln(\tau_- / E^{1/3}) = 1,299 + 0,412 \cdot \ln \lambda - 0,079(\ln \lambda)^2. \quad (4.24)$$

Импульс фазы сжатия

$$\ln(I_+ / E^{1/3}) = -0,843 - 0,932 \cdot \ln \lambda - 0,037(\ln \lambda)^2. \quad (4.25)$$

Импульс фазы разрежения

$$\ln(I_- / E^{1/3}) = -0,873 - 1,25 \cdot \ln \lambda + 0,132(\ln \lambda)^2. \quad (4.26)$$

Форма падающей волны с описанием фаз сжатия и разрежения в наиболее опасном случае детонации газовой смеси может быть описана соотношением

$$\Delta P(t, \lambda) = \Delta P_+ (\sin[\pi (t - \tau_+)/\tau_-] / \sin[-\pi \tau_+/\tau_-]) \exp(-K_i t / \tau_+) \quad (4.27)$$

Декремент затухания в падающей волне рассчитывается по соотношению:

$$K_i = 0,889 - 0,356 \cdot \ln \lambda + 0,105 (\ln \lambda)^2 \quad (4.28)$$

Для расчета параметров отраженной волны при ее нормальном падении на преграду используются соотношения:

$$\text{Амплитуда отраженной волны давления} \\ \ln(\Delta P_{r+}/P_0) = 1,264 - 2,056 \cdot \ln \lambda + 0,211 (\ln \lambda)^2 \quad (4.29)$$

$$\text{Амплитуда отраженной волны разрежения} \\ \ln(\Delta P_{r-}/P_0) = -0,673 - 1,043 \cdot \ln \lambda + 0,252 (\ln \lambda)^2 \quad (4.30)$$

$$\text{Длительность отраженной волны давления} \\ \ln(\tau_{r+}/E^{1/3}) = -0,109 + 0,983 \cdot \ln \lambda - 0,23 (\ln \lambda)^2 \quad (4.31)$$

$$\text{Длительность отраженной волны разрежения} \\ \ln(\tau_{r-}/E^{1/3}) = 1,265 + 0,857 \cdot \ln \lambda - 0,192 (\ln \lambda)^2 \quad (4.32)$$

$$\text{Импульс отраженной волны давления} \\ \ln(I_{r+}/E^{1/3}) = -0,07 - 1,033 \cdot \ln \lambda + 0,045 (\ln \lambda)^2 \quad (4.33)$$

$$\text{Импульс отраженной волны разрежения} \\ \ln(I_{r-}/E^{1/3}) = -0,052 - 0,462 \cdot \ln \lambda - 0,27 (\ln \lambda)^2 \quad (4.34)$$

$$\text{Общее время действия отраженных волн на мишень} \\ \ln((\tau_{r+} + \tau_{r-})/E^{1/3}) = 1,497 + 0,908 \cdot \ln \lambda - 0,404 (\ln \lambda)^2 \quad (4.35)$$

Форма отраженной волны с описанием фаз сжатия и разряжения может быть описана соотношением

$$\Delta P_r(t, \lambda) = \Delta P_{r+} \left(\frac{\sin[\pi (t - \tau_{r+}) / \tau_{r-}]}{\sin[-\pi \tau_{r+} / \tau_{r-}]} \right) \exp(-K_r t / \tau_{r+}). \quad (4.36)$$

Декремент затухания в отраженной волне рассчитывается по соотношению:

$$K_r = 0,978 - 0,554 \cdot \ln \lambda + 0,26 (\ln \lambda)^2. \quad (4.37)$$

В соотношениях (4.21 – 5.37) все параметры времени измеряются в мсек, давления – в атм, импульса – в атм·мсек.

4.4. Оценка поражающего воздействия

При взрывах ТВС существенную роль играет такой поражающий фактор, как длительность действия ударной волны и связанный с ней параметр – импульс взрыва. На диаграмме импульс – давление можно выделить область, отвечающую той или иной степени поражения. Например, разрушение промышленных зданий, поражение человека и т.д. Область поражения не имеет четкой границы: при приближении параметров волны к границе опасной области вероятность заданного уровня поражения нарастает от 0% до 100%. Эта особенность диаграмм поражения может быть отражена представлением вероятности достижения того или иного уровня ущерба с помощью функции «пробит» - P_{r_i} . При расчете функции «пробит» давление и импульс измеряются соответственно в Па и Па·с.

Оценка вероятности повреждения промышленных зданий от взрыва облака ТВС

Вероятность повреждения стен промышленных зданий, при которых возможно восстановление зданий без их сноса, может оцениваться по соотношению:

$$Pr_1 = 5 - 0,26 \ln V_1, \quad (4.38)$$

где фактор V_1 рассчитывается с учетом перепада давления в волне и импульса статического давления по соотношению

$$V_1 = (17500/\Delta P)^{8.4} + (290/I)^{9.3}. \quad (4.39)$$

Вероятность разрушений промышленных зданий, при которых здания подлежат сносу, оценивается по соотношению

$$Pr_2 = 5 - 0,22 \ln V_2. \quad (4.40)$$

В этом случае фактор V_2 берется по

$$V_2 = (30000/\Delta P)^{7.4} + (360/I)^{11.3}. \quad (4.41)$$

Оценка вероятности поражения людей при взрыве облака ТВС

Вероятность длительной потери управляемости у людей (состояние нокдауна), попавших в зону действия ударной волны при взрыве облака ТВС, может быть оценена по величине функции «пробит»:

$$Pr_3 = 5 - 5,74 \ln V_3. \quad (4.42)$$

Фактор опасности V_3 рассчитывается по соотношению

$$V_3 = 4,2/\leftrightarrow p + 1,3/\leftrightarrow i, \quad (4.43)$$

где безразмерное давление $\leftrightarrow p$ и безразмерный импульс $\leftrightarrow i$ задаются выражениями

$$\leftrightarrow p = 1 + \Delta P/P_0 \quad \text{и} \quad \leftrightarrow i = I/(P_0^{1/2} \cdot m^{1/3}), \quad (4.44)$$

где m – вес тела живого организма в кг, давление и импульс (здесь и ниже) – в единицах СИ.

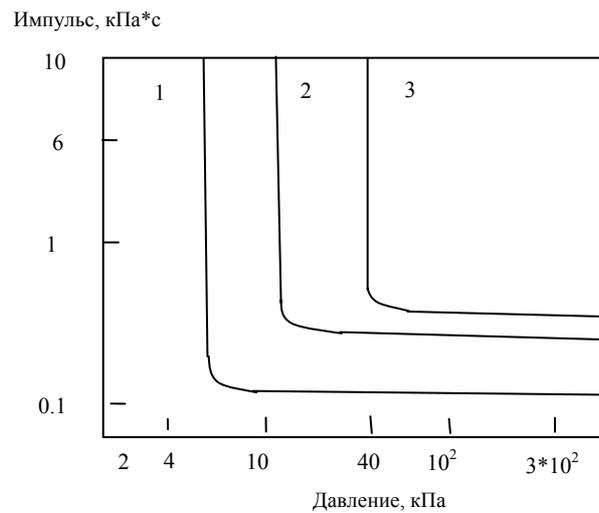


Рис. 4.7. P-I диаграмма для оценки уровня разрушения промышленных зданий (1- граница минимальных разрушений, 2- граница значительных повреждений, 3- разрушение зданий).

Оценка вероятности поражения людей при взрыве облака ТВС

Вероятность длительной потери управляемости у людей (состояние нокдауна), попавших в зону действия ударной волны при взрыве облака ТВС, может быть оценена по величине функции «пробит»:

$$Pr_3 = 5 - 5,74 \ln V_3. \quad (4.42)$$

Фактор опасности V_3 рассчитывается по соотношению

$$V_3 = 4,2/\leftrightarrow p + 1,3/\leftrightarrow i, \quad (4.43)$$

где безразмерное давление $\leftrightarrow p$ и безразмерный импульс $\leftrightarrow i$ задаются выражениями

$$\leftrightarrow p = 1 + \Delta P / P_0 \quad \text{и} \quad \leftrightarrow i = I / (P_0^{1/2} \cdot m^{1/3}), \quad (4.44)$$

где m – вес тела живого организма в кг, давление и импульс (здесь и ниже) – в единицах СИ.

Зависимость вероятности разрыва барабанных перепонки у людей от уровня перепада давления в воздушной волне, может описываться пробит-функцией

$$Pr_4 = -12,6 + 1,524 \ln \Delta P. \quad (4.45)$$

Вероятность отброса людей волной давления может оцениваться по величине «пробит»

$$Pr_5 = 5 - 2,44 \ln V_5. \quad (4.46)$$

Здесь фактор V_5 рассчитывается из соотношения

$$V_5 = 7,38 \cdot 10^3 / \Delta P + 1,3 \cdot 10^9 / \Delta P \cdot I. \quad (4.47)$$

Связь функции Pr_i с вероятностью той или иной степени поражения может быть определена по таблице 4.7.

Таблица 4.7

Связь вероятности поражения с функцией «пробит»

P %	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		2.67	2.95	3.12	3.25	3.38	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.81	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
99	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.75	7.88	8.09

Оценки последствий взрывов ТВС

Для определения радиусов зон поражения при взрыве ТВС можно использовать метод, основанный на численном решении уравнения (3.9), который в совокупности с данными таблицы 3.7, позволяет сделать оценки радиусов. Необходимые для расчетов функции избыточного давления на фронте волны и импульс определяются соотношениями (3.16) и (3.17).

Для “грубой” оценки последствий взрывов ТВС можно использовать соотношения, используемые, как правило, для оценки последствий взрывов конденсированных ВВ, но, с известными допущениями. Так для оценки радиусов зон поражений можно использовать соотношение:

$$R = KW^{1/3} / (1 + (2180/W)^2)^{1/6}, \quad (4.48)$$

где коэффициент К определяется из таблицы 4.8, а W – тротильный эквивалент взрыва

$$W = 0,044 M_T q_T / 4,6, \quad (4.58)$$

где q_T – теплота сгорания газа.

Таблица 4.8

Уровни разрушения зданий

Категория повреждения	Характеристика повреждения здания	Избыточное давление, Па	Коэффициент К
А	Полное разрушение здания	> 70000	3,8-5,6
В	Тяжелые повреждения, здание подлежит сносу	33000	5,6-9,6
С	Средние повреждения, возможно восстановление здания	25000	9,6-28
Д	Разбито 90% остекления	4000	28-56
Е	Разбито 50% остекления	200	>56

Для определения радиуса смертельного поражения человека в соотношении (4.48) следует подставлять величину $K = 3,8$.

4.5. Примеры решения задач

Пример 1.

Произошел взрыв автоцистерны с сжиженным пропаном на открытой местности в безветренную погоду. Масса газа $M_r = 8$ т, средняя концентрация пропана $C_r = 140$ г/м³, объем облака - $V = 57000$ м³. Взрывной режим превращения. Оценить параметры воздушной ударной волны (избыточное давление и импульс фазы сжатия) на расстоянии 100 м от места аварии?

Исходные данные.

Тип топлива	Пропан
Агрегатное состояние	Газовая
Окружающее пространство	Открытое (вид 4)
Концентрация горючего	$C_r = 0.14$ кг/м ³
Масса топлива	$M_r = 8000$ кг
Стехиометрическая концентрация этилена с воздухом	$C_{СТХ} = 0.077$ кг/м ³
Удельная теплота сгорания	$q_z = 46,4$ Мдж/кг

Эффективный энергозапас ($C_r > C_{СТХ}$).

$$E = 2 \cdot M_r \cdot q_z \cdot C_{СТХ} / C_r = 2 \cdot 8000 \cdot 46,4 \cdot 0,077 / 0,14 = 4,1 \cdot 10^5 \text{ Мдж}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{СТХ} [\text{кг/м}^3] = 0.01 \cdot C [\% \text{ об}] \cdot \rho_r = 0.01 \cdot 4.03 \cdot 1.315 = \\ 0.053 \text{ кг/м}^3 \end{array} \right\}.$$

По таб. 4.5 пропан относится ко второму классу опасности. По таб.5.6 ожидаемый режим взрывного превращения - дефлаграция с диапазоном видимой скорости фронта пламени 150 - 200 м/с. Для проверки рассчитываем скорость фронта пламени $V_r = k_1 \cdot M^{1/6} = 43 \cdot 8000^{1/6} = 192$ м/с.

Для $R = 100$ м безразмерный радиус
 $R_x = R/(10E/P_0)^{1/3} = 100/(10 \cdot 4,1 \cdot 10^5 / 1)^{1/3} = 0.63$.

Параметры взрыва при скорости горения $V_r = 200$ м/с. По (4.16) – (4.17) рассчитываем

$$P_{x1} = (V_r / C_0)^2 ((\sigma - 1) / \sigma) (0.83 / R_x - 0.14 / (R_x)^2) = (200/340)^2 \cdot 6/7 \cdot (0.83/0.63 - 0.14/(0.63)^2) = 0.29,$$

$$I_{x1} = (V_r / C_0) ((\sigma - 1) / \sigma) (1 - 0.4(\sigma - 1) \cdot V_r / \sigma C_0) \cdot (0.06 / R_x + 0.01 / (R_x)^2 - 0.0025 / (R_x)^3) = (200/340) \cdot 6/7 \cdot (1 - 0.4 \cdot 6 \cdot 200 / (7 \cdot 340)) \cdot (0.06/0.63 + 0.01/(0.63)^2 - 0.0025/(0.63)^3) = 0.0427.$$

Так как ТВС газовая, то P_{x2} , I_{x2} рассчитываются по соотношениям (4.12) – (4.13):

$$P_{x2} = \exp(-1.124 - 1.66 \cdot \ln(R_x) + 0.26 \cdot (\ln(R_x))^2) = 0.74 \pm 10 \%,$$

$$I_{x2} = \exp(-3.4217 - 0.898 \cdot \ln(R_x) - 0.0096 \cdot (\ln(R_x))^2) = 0.049 \pm 15 \%.$$

Определяем

$$P_x = \min(P_{x1}, P_{x2}) = \min(0.29, 0.74) = 0.29,$$

$$I_x = \min(I_{x1}, I_{x2}) = \min(0.0427, 0.049) = 0.0427.$$

По (4.19) – (4.20)

$$\Delta P = P_x \cdot P_0 = 0.28 \text{ атм.},$$

$$I = 100 \cdot I_x (0.1 \cdot P_0)^{2/3} \cdot E^{1/3} / C_0 = 0.201 \text{ атм} \cdot \text{с}.$$

Значения пробит-функций

$$Pr_1 = 6.06, Pr_2 = 4.47, Pr_3 = -1.93 \text{ (масса человека } m=80),$$

$$Pr_4 = 3.06, Pr_5 = 2.78.$$

(86% поврежденных и 30% разрушенных зданий, 2.5% разрыв барабанных перепонок у людей и 1% вероятности отброса людей волной давления).

Пример 2.

В цехе, загроможденном трубопроводами, произошел выброс 100 кг этилена. Концентрация этилена в облаке $C_r = 80 \text{ г/м}^3$. Оценить характеристики взрывного превращения. Определить степень разрушения здания цеха, расположенного в 150 м при взрыве облака.

Исходные данные.

Горючий газ	Этилен
Агрегатное состояние	Газовая
Окружающее пространство	Загроможденное
Концентрация горючего	$C_r = 0.08 \text{ кг/м}^3$
Масса топлива	$M_r = 100 \text{ кг}$
Стехиометрическая концентрация этилена с воздухом	$C_{СТХ} = 0.09 \text{ кг/м}^3$
Удельная теплота сгорания	$q_r = 46,4 \text{ Мдж/кг}$

$$\{ C_{СТХ} [\text{кг/м}^3] = 0.01 C [\% \text{ об}] \rho_r = 0.01 \cdot 6.54 \cdot 1.285 = 0.084 \text{ кг/м}^3 \}$$

Эффективный энергозапас ($C_r < C_{СТХ}$)
 $E = 2 \cdot M_r \cdot q_r = 2 \cdot 100 \cdot 46,4 = 9200 \text{ Мдж}$.

По таб. 4.5 этилен относится ко второму классу опасности. Окружающее пространство - к виду 1. По таб. 4.6 ожидаемый режим взрывного превращения – 1, то есть детонация.

Для $R = 150 \text{ м}$ определяем безразмерное параметрическое расстояние

$$\lambda = R/E^{1/3} = 150/(9200)^{1/3} = 7.16.$$

Определяем параметры волны при детонации облака газовой смеси.

Амплитуда волны давления по (4.21)

$(\Delta P_+ / P_0) = \exp(0.299 - 2.058 \cdot \ln \lambda + 0.26 \cdot (\ln \lambda)^2) = 0.064$, так как $P_0 = 1$ атм., то $\Delta P_+ = 0.064$ атм.

Амплитуда волны разрежения по (4.22)

$(\Delta P_- / P_0) = \exp(-1.46 - 1.402 \cdot \ln \lambda + 0.079 \cdot (\ln \lambda)^2) = 0.02$, так как $P_0 = 1$ атм., то $\Delta P_- = 0.02$ атм.

Длительность фазы сжатия $\tau_+ = 50.9$ мсек.

Длительность фазы разрежения $\tau_- = 127.3$ мсек.

Импульс фазы сжатия и фазы разрежения $I_+ \sim I_- = 1.247$ атм•мсек.

Форма проходящей волны для случая детонации газовой смеси

$\Delta P(t) = 0.064(\sin[\pi(t - 50.9)/127.3] / (\sin[-\pi \cdot 50.9 / 127.3]) \exp(-0.6t/50.3)$.

Значения пробит-функций

$Pr_1 = 2.69$, $Pr_2 = 1.69$, $Pr_3 = -11.67$ (масса человека $m=80$),
 $Pr_4 = 0.76$, $Pr_5 = -13.21$.

(1% разрушенных зданий).

По соотношениям для отраженной волны.

Амплитуда отраженной волны давления

$(\Delta P_{r+} / P_0) = 0.14$, так как $P_0 = 1$ атм., то $\Delta P_{r+} = 0.14$ атм.

Амплитуда отраженной волны разрежения

$(\Delta P_{r-} / P_0) = 0.174$, так как $P_0 = 1$ атм., то $\Delta P_{r-} = 0.174$ атм.

Длительность отраженной волны давления $\tau_{r+} = 53.4$ мсек.

Длительность отраженной волны разрежения

$\tau = 190.6$ мсек.

Импульс отраженной волны давления и разрежения

$I_{r+} = 3.04$ атм•мсек,

$I_{r-} = 2.81$ атм•мсек,

Форма отраженной волны при взаимодействии со стеной

$$\Delta P(t) = 0.14(\sin[\pi(t - 53.4) / 190.6] / (\sin[-\pi 53.4 / 190.6]) \exp(-0.89 t / 53.4)).$$

Значения пробит-функций

$Pr_1 = 4.49$, $Pr_2 = 3.28$, $Pr_3 = -7.96$ (масса человека $m=80$),

$Pr_4 = 1.95$, $Pr_5 = -9.35$.

(20% поврежденных и 4% разрушенных зданий).

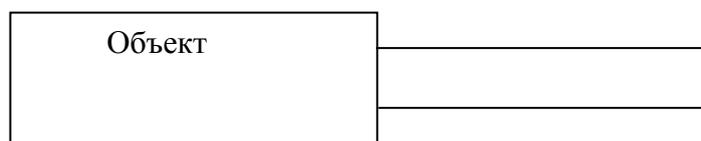
4.6. Задачи для самостоятельного решения

1. На каком расстоянии будут полностью разрушены производственные здания и на каком расстоянии вероятность поражения людей достигнет величины 10%, если произойдет разлитие сжиженного пропилена из автоцистерны? Масса газа 16 тонн.

2. На каком расстоянии от цеха, где возможен выброс этилена, начинается зона безопасности. В цехе теоретически возможен выброс 500 кг этилена. Размеры цеха - 50x25x4 м. (Под зоной безопасности понимается территория, где вероятность поражения человека не превышает фоновых значений.)

3. По автодороге, проходящей по ровной местности с отдельно стоящими деревьями, автоцистернами перевозят сжиженный пропан. Масса газа в автоцистерне 6 тонн. Оценить размер полосы, идущей вдоль дороги, где возможно поражение людей, разрушение зданий, при аварии на дороге.

4. На объекте с подъездными путями в технологическом процессе используется метан. Метан в сжиженном состоянии подвозится автоцистернами по 12 тонн. Характерные размеры производственного объекта 50x25x4 метра. На объекте одновременно может находиться не более двух автоцистерн. Показать расположение зоны безопасности.



4.7. Список литературы к главе 4

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Книга 1 / В.А. Котляревский, К.Е. Кочетков, А.А. Носач, А.В. Забегаев и др. Под ред.: К.Е. Кочеткова, В.А. Котляревского и А.В. Забегаева, — М., Издательство АСВ, 1995. — 320 с.

2. Сборник методик №1. / Госгортехнадзор России, НТЦ «Промышленная безопасность», 1999, 112 с.



5. Тепловое излучение огненного шара

5.1. Характеристики теплового излучения

При аварийном вскрытии газопроводов, емкостей с углеводородами, обогащенное топливо интенсивно горит, образуя огненный шар. Концентрационные пределы воспламенения шире пределов детонации. Поражающее действие связано с тепловым излучением.

Возникновение огненных шаров возможно при разрушении резервуаров и сосудов с горючими жидкими перегретыми продуктами (углеводородные газы, аммиак, хлор, фреоны), содержащихся при повышенном давлении.

Взрывной характер процесса объясняется быстрым разрушением резервуаров. Например, разрушение сосуда объемом $V \sim 100 \text{ м}^3$ при давлении 1 Мпа происходит ~ 7 мс.

Время образования парового облака

$$\tau_0 = 0.78 \sqrt[3]{V \cdot (k \cdot n - 1) / a},$$

V - объем жидкого продукта, м^3 , $n = \rho_{\text{сж}} / \rho$, $\rho_{\text{сж}}$ – плотность жидкости ρ – плотность паровой фазы при расширении до объема с предельным радиусом R_c , соответствующего атмосферному давлению; a – скорость звука, м/с с которой смещается внешняя граница облака до размера $R_c = a \cdot \tau_0$. k – доля быстроиспаряющейся жидкости при температуре T .

Таблица 5.1

Доля быстроиспаряющейся жидкости при температуре T

	Сжиженный этилен		Сжиженный пропан		Сжиженный хлор, аммиак		Сжиженный бутан	
T	-50	-10	-40	30	-30	30	0	30
k	0.27	0.58	0	0.4	0	0.2	0	0.18

Например, при $V=100 \text{ м}^3$ сжиженного под давлением пропана $n=582/1.3=448$, при $T=20 \text{ С}$ $k=0.38$; $a=300 \text{ м/с}$.

$$\tau_0 = 0.78 \sqrt[3]{100 \cdot (0.38 \cdot 448 - 1)} / 300 = 0.067 \text{ с}.$$

Аппроксимация опытных данных по радиусам R_0 и времени существования t_s огненных шаров

$$R_0 = 0.5 \cdot A_1 \cdot M^\alpha, \quad t_s = A_2 \cdot M^\beta.$$

M – масса испарившегося продукта, кг.

Для различных энергоносителей (жидкие ракетные топлива, сжиженный нефтяной газ) значения коэффициентов близки:

$$A_1 = 3.76 \dots 3.86; \quad A_2 = 0.258 \dots 0.299;$$

$$\alpha = 0.325 \dots 0.320; \quad \beta = 0.349 \dots 0.320.$$

Для небольших огненных шаров, образуемых при взрывах пропана, пентана и октана в воздухе ($M < 10 \text{ кг}$) экспериментально были получены значения:

$$A_2 = 1.07; \quad \beta = 0.18.1.$$

Аппроксимация экспериментальных данных по огненному шару от сгорания выбросов сжиженного нефтяного газа из емкостей:

$$R_0 = 29 \cdot M^{1/3}, \quad t_s = 4.5 \cdot M^{1/3}.$$

Здесь M – половина емкости по массе, т.

Оценки численных значений радиусов R_0 и времён существования t_s огненных шаров при промышленных авариях приводят к значениям $M \sim 50 \text{ т}$. $R \sim 100 \text{ м}$. $t_s \sim 14 \text{ с}$.

Аппроксиманта зависимости приведенный радиус R_\wedge - приведенное время t_\wedge

$$R_\wedge = 44.3 \cdot t_\wedge / (1.11 + t_\wedge).$$

$$R_\wedge = R^3 \sqrt{\theta / M}, \quad t_\wedge = 10^{-10} \cdot t \cdot \sqrt[3]{\theta^{10} / M}.$$

Время t , с; температура Θ в К, масса M в кг.

Температура огненного шара Θ зависит от вещества. Например, для ракетного топлива $\Theta \sim 2500 \text{ }^\circ\text{К}$, для горючих газов $\Theta \sim 1350 \text{ }^\circ\text{К}$. Поражающее действие определяется величиной теплового потока q , Вт/м². Зависимость теплового потока от расстояния r определяется выражением

$$q = \Theta^4 * [G(2R_0/r)^2] / [F+(2R_0/r)^2].$$

$G = 5.26 * 10^{-5}$; $F = 161.7$ - константы.

Величина тепловой энергии (доза или импульс теплового излучения), падающей на единицу поверхности Q , Дж/м² определяется интегрированием по времени функции q . Принимая R_0, Θ за константы, приходим к выражению:

$$Q = bG * (M * \Theta^2)^{1/3} * (2R_0/r)^2 / [F+(2R_0/r)^2], \quad \text{где} \quad bG = 2.04 * 10^4.$$

В общем случае $Q = q * t_s$.

Аппроксиманта потока излучения, падающего от шара на мишень q , кВт/м²

$$q = E * F * T_p.$$

E - мощность поверхностной эмиссии огненного шара, кВт/м², F - учет фактора угла падения, T_p - коэффициент, учитывающий проводимость воздуха. Для баллонов и цилиндрических резервуаров $E = 270$ кВт/м², для сосудов шарообразной формы $E = 200$ кВт/м².

$$F = (R_0)^2 r / [(R_0)^2 + r^2]^{3/2}, \quad T_p = 1 - 0.058 * \ln r.$$

$r > 2R_0$ - расстояние по горизонтали от хранилища до мишени.

5.2. Оценки последствий теплового излучения

Воспламенение различных материалов зависит от теплового импульса и его длительности. Данные, характеризующие воспламенение некоторых материалов, представлены в таблице 5.2.

Болевой температурный порог для кожи человека соответствует $T_{п} \sim 44$ С. При $T > T_{п}$, степень поражения определяется величиной тепловой энергии Q и длительности облучения τ . Без болевых ощущений кожа выдерживает тепловой поток интенсивностью $q \sim 21$ кВт/м² в течение 2 с. При стационарном потоке $Q \sim 42$ кДж/м².

Предельно безопасный радиус (радиус эвакуации) для человека $\sim (2.1 \dots 3.6) * R_0$.

Величина ущерба при термическом воздействии

$$U(I,t) = \Phi(Pr), \quad Pr = -14.9 + 2.56 \cdot \ln(I^{4/3} \cdot t \cdot 10^{-4}).$$

I – действующий тепловой поток (Дж/м²с), t – длительность воздействия, с.

Таблица 5.2

Импульсы теплового излучения, МДж/м², длительностью τ , вызывающие воспламенение материалов

Материал	$\tau, \text{с}$			
	1.56	3.16	8.71	24.0
Древесина сухая (сосна)	0.58	0.67	0.88	1.00
Доски после распиловки (сосна, ель)	1.67	1.76	1.88	2.10
Кровля мягкая (толь, рубероид)	0.54	0.59	0.67	0.84
Черепица красная (оплавленная)	0.84	1.05	1.26	1.67
Стружка, сено, бумага темная	0.12	0.17	0.21	0.25
Сукно серое, брезент, кожа коричневая	0.62	0.70	0.84	1.26

5.3. Примеры решения задач

Задача 1.

Рассчитать диаметр и время существования огненного шара t_s при аварии с автоцистерной, перевозившей 68 тонн сжиженного газа, в предположении, что при аварии весь сжиженный газ выльется из автоцистерны.

Решение.

Диаметр $D = 2 \cdot R_0$ и время существования огненного шара t_s дается соотношениями:

$$D = 2 \cdot R_0 = 2 \cdot (0.5 \cdot A_1 \cdot M^{\alpha} = 2 \cdot (0.5 \cdot 3.81 \cdot 68000^{0.3225}) = 2 \cdot 68.9254 \approx 138 \text{ м,}$$

$$t_s = A_2 \cdot M^{\beta} = (0.258 + 0.299) \cdot 0.5 \cdot 68000^{0.335} = 11.58 \text{ с.}$$

Ответ: при разливе автоцистерны сжиженного газа 68 т образуется огненный шар диаметром 138 м, со временем существования ≈ 12 с.

Задача 2.1.

Рассчитать поток и дозу теплового излучения в точке, отстоящей на $r=300$ метров при аварийном вскрытии вертикального резервуара емкостью 100 т.

Решение.

Радиус огненного шара $R_0 = 29 \cdot M^{1/3} = 29 \cdot (100/2)^{1/3} = 107$ м,

Временной интервал существования огненного шара $t_s = 4.5 \cdot M^{1/3} = 4.5 \cdot (100/2)^{1/3} = 16.6$ с.

Коэффициент, учитывающий фактор угла падения $F = (R_0)^2 r / [(R_0)^2 + r^2]^{3/2} = 107^2 \cdot 300 / [(107^2 + 300^2)^{3/2}] = 0.106$.

Коэффициент, учитывающий проводимость воздуха $T_p = 1 - 0.058 \cdot \ln r = 1 - 0.058 \cdot \ln 300 = 0.67$.

Поток излучения $q = E \cdot F \cdot T_p = 270 \cdot 0.106 \cdot 0.67 = 19.2$ кВт/м².

Доза (импульс) теплового излучения $Q = q \cdot t_s = 19.2 \cdot 16.6 = 317$ кДж/м².

Ответ: при вскрытии вертикального резервуара поток излучения на расстоянии 300 м - 19.2 кВт/м², доза теплового излучения - 317 кДж/м².

Задача 2.2.

Рассчитать поток и дозу теплового излучения в точке, отстоящей на $r=600$ метров при аварийном вскрытии вертикального резервуара емкостью 1000 т.

Ответ: $R_0 = 230$ м, $t_s = 35.7$ с. $F = 0.12$, $T_p = 0.629$;

$q = 20.4$ кВт/м²

$Q = 728.3$ кДж/м².

5.4. Задачи для самостоятельного решения

1. Рассчитать диаметр и время существования огненного шара при сгорании выбросов сжиженного нефтяного газа из емкости, если в емкости хранилось 50 т.

2. Рассчитать диаметр и время существования огненного шара при сгорании выброса пропана, если вес пропана в “выбросе” составлял 5 кг.

Колодкин Владимир Михайлович

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙ И
РИСКОВ

Учебное пособие

Подписано в печать 15.01.08. Формат 60x84 ¹/₁₆.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 5,5. Уч.- изд.л. 6,3.

Тираж 75 экз. Заказ № 41.

Типография ГОУВПО «Удмуртский государственный
университет».

426034, Ижевск, Университетская, 1, корп.4.