

Министерство образования и науки России  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Казанский национальный исследовательский  
технологический университет»

А.Д. Галеев, Е.В. Старовойтова, А.А. Салин, С.И. Поникаров

# **ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ АВАРИЙ**

Учебное пособие

Казань  
КНИТУ  
2017

**УДК 614.8+536.24**

**ББК 35.11**

Основы прогнозирования последствий промышленных аварий: учебное пособие / Галеев А.Д., Старовойтова Е.В., Салин А.А., Поникаров С.И.; Мин-во образования и науки России, Казан.нац.исслед.технол.ун-т.– Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2017.– 213 с.

ISBN

В пособии излагаются основы расчета последствий аварий применительно к объектам химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей отраслей промышленности. Приводятся теоретические положения и основные формулы для расчета последствий аварий. Поскольку в настоящее время находит широкое применение метод численного моделирования, то кроме примеров расчета по стандартным нормативным методикам, в пособии разобран пример расчета поля концентраций токсичного вещества в среде пакета гидродинамического анализа ANSYS FLUENT.

Предназначено для студентов направления подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование», а также аспирантам направления подготовки 20.06.01 «Техносферная безопасность». Будет также полезно студентам других направлений, изучающим вопросы обеспечения безопасности технологических процессов и производств.

Подготовлено на кафедре «Машины и аппараты химических производств» Казанского национального исследовательского технологического университета.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Казанского национального исследовательского технологического университета.

**Рецензенты:** кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики, газоснабжения и вентиляции КазГАСУ Л.Э.Осипова

кандидат технических наук, заместитель начальника управления по производству и техническому обеспечению управления по проектно-конструкторским работам ПАО «Казаньоргсинтез» Е.Б.Татаринов

© Коллектив авторов, 2017

© Изд-во Академии наук РТ, 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                 | 6  |
| ГЛАВА 1 МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ<br>РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ .....      | 12 |
| 1.1 Возможные конфигурации оборудования и схемы его разрушения .                               | 13 |
| 1.2 Возможные стадии развития аварийной ситуации .....                                         | 16 |
| 1.3 Определение расхода стабильной жидкости из отверстия .....                                 | 25 |
| 1.4 Истечение газа через отверстие из сосуда высокого давления.....                            | 27 |
| 1.5 Истечение сжиженного газа из отверстия.....                                                | 32 |
| 1.6 Примеры расчетов по Главе 1 .....                                                          | 36 |
| ГЛАВА 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ИСПАРЕНИИ<br>ПРОЛИВА СТАБИЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ .....       | 44 |
| 2.1 Основные закономерности парообразования при аварийных<br>выбросах .....                    | 44 |
| 2.2 Физико-химические особенности процесса испарения с поверхности<br>аварийного пролива ..... | 45 |
| 2.3 Расчет интенсивности испарения стабильной жидкости .....                                   | 50 |
| 2.4 Стефановский поток.....                                                                    | 55 |
| 2.5 Испарение растворов и смесей .....                                                         | 58 |
| 2.6 Примеры по Главе 2 .....                                                                   | 60 |
| ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ АВАРИЙНОМ<br>ВЫБРОСЕ СЖИЖЕННОГО ГАЗА.....            | 63 |
| 3.1 Мгновенное вскипание жидкости.....                                                         | 63 |
| 3.2 Парообразование при кипении пролива сжиженного газа.....                                   | 65 |
| 3.3 Образование аэрозолей при выбросах в атмосферу .....                                       | 70 |
| 3.4 Расчет парообразования при аварийном выбросе<br>однокомпонентного сжиженного газа .....    | 71 |
| 3.5 Расчет парообразования при аварийном выбросе<br>многокомпонентного сжиженного газа .....   | 73 |
| 3.6 Примеры по главе 3 .....                                                                   | 75 |

|                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ГЛАВА 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ВЕЩЕСТВА В АТМОСФЕРЕ .....                                                                     | 81  |
| 4.1 Рассеяние газообразного вещества в атмосфере.....                                                                                              | 81  |
| 4.1.1 Атмосферная турбулентность .....                                                                                                             | 81  |
| 4.1.2 Температурная стратификация атмосферы .....                                                                                                  | 84  |
| 4.1.3 Образование и распространение тяжелых газов .....                                                                                            | 87  |
| 4.1.4 Влияние шероховатости и препятствий на распространение газа.....                                                                             | 89  |
| 4.2 Модели рассеяния газообразного вещества в атмосфере.....                                                                                       | 90  |
| 4.3 Особенности численного моделирования рассеяния газообразного вещества с использованием пакетов вычислительной гидродинамики (CFD пакеты) ..... | 102 |
| 4.4 Примеры по главе 4 .....                                                                                                                       | 111 |
| ГЛАВА 5 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ВЫБРОСА В АТМОСФЕРЕ .....                                                                        | 122 |
| 5.1 Механизмы образования аэрозолей при аварийных выбросах.....                                                                                    | 122 |
| 5.2 Закономерности распределения частиц по размерам.....                                                                                           | 124 |
| 5.3 Моделирование переноса дисперсной фазы в рамках Эйлера-Лагранжева подхода.....                                                                 | 127 |
| 5.4 Примеры по главе 5 .....                                                                                                                       | 131 |
| ГЛАВА 6 ОЦЕНКА ЗОН ДЕЙСТВИЯ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ ПРИ АВАРИЯХ НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ.....                                              | 133 |
| 6.1 Классификация аварий.....                                                                                                                      | 133 |
| 6.1.1 Классификация взрывов .....                                                                                                                  | 134 |
| 6.1.2 Классификация пожаров .....                                                                                                                  | 138 |
| 6.2 Поражающие факторы при авариях .....                                                                                                           | 139 |
| 6.3 Пожаровзрывоопасность веществ и материалов .....                                                                                               | 142 |
| 6.4 Поведение веществ при наличии источников зажигания .....                                                                                       | 145 |
| 6.5 Математические модели для расчета зон действия поражающих факторов .....                                                                       | 147 |

|                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------|-----|
| 6.5.1 Взрыв паровоздушного облака на открытой площадке ..... | 147 |
| 6.5.2 Пожар-вспышка.....                                     | 149 |
| 6.5.3 Взрыв резервуара с перегретой жидкостью.....           | 150 |
| 6.5.4 Взрыв сосуда со сжатым инертным газом .....            | 151 |
| 6.5.5 Огненный шар .....                                     | 152 |
| 6.5.6 Пожар пролива .....                                    | 153 |
| 6.5.7 Факельное горение .....                                | 156 |
| 6.6 Примеры по Главе 6 .....                                 | 157 |
| ЛИТЕРАТУРА.....                                              | 165 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....                                           | 172 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....                                           | 206 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 3 .....                                           | 211 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....                                            | 212 |

## ВВЕДЕНИЕ

Современная Россия – это страна с интенсивно развивающейся промышленностью. Каждый год повсеместно завершаются проекты по модернизации уже существующих производств и созданию новых. В качестве примера можно привести такую отрасль промышленности, как нефтепереработка. Добыча нефти в России стабильно увеличивается и на сегодняшний день составляет более 290 млн. тонн/год. Глубина переработки, которая отражает уровень эффективности технологического процесса, также растет. Она в среднем составляет 74,3% и достигает максимальных значений на современных заводах, например:

- АО «ГАЗПРОМНЕФТЬ-Омский НПЗ» – 92% (97% к 2020 году);
- ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез» – 98% после запуска нового комплекса по переработке нефтяных остатков в ноябре 2015 года;
- АО «Антипинский НПЗ» – 98% после запуска комбинированной двухсекционной установки глубокой переработки мазута в октябре 2016 года.

Всего же в России по данным Росстата на 2015 год более 16000 предприятий и организаций, связанных с химической и нефтеперерабатывающей промышленностью, а также производством различных полимеров.

Современные заводы представляют собой производственные комплексы, сосредотачивающие на своей территории огромные количества веществ. В частности, нефтеперерабатывающий завод мощностью 10-15 млн. тонн/год может хранить на своей территории до 500 тысяч тонн сырья, промежуточных продуктов и продукции, что эквивалентно 5 мегатоннам в тротиловом эквиваленте.

Столь большое количество опасных производств, огромные объемы сопутствующих им взрывоопасных и ядовитых веществ, обращающихся на транспорте, а также повсеместный износ основных фондов и применение

новых технологических процессов, для которых еще нет статистики аварий, – все это вызывает серьезные опасения по поводу возможных аварий и их последствий.

Крупные пожары, выбросы токсичных и/или взрывоопасных веществ в атмосферу способны приводить к многочисленным жертвам и серьезным разрушениям.

Приведем некоторые примеры крупномасштабных аварий:

- 21 сентября 1921 года произошел взрыв смеси нитрата и сульфата аммония массой 4500 т на предприятии BASF в Оппау (Германия); погиб 561 человек, более 1500 получили ранения, 75% зданий в Оппау были разрушены;

- 13 декабря 1926 года в Сент-Обане (Франция) образовалось разлитие 24 т хлора; погибло 19 человек;

- 24 декабря 1939 года в Зарнешти (Румыния) произошла утечка хлора; погибло 60 человек;

- 16 апреля 1947 года в Техас-Сити (США) в результате пожара и ошибочных действий экипажа судна произошел взрыв корабля, перевозившего нитрат аммония; позднее из-за «эффекта домино» пострадали склады на пристани, нефтехранилище близлежащего химического предприятия и соседние суда; за два дня погибло 552 человека, пострадало более 5000 и 200 пропали без вести;

- 28 июля 1948 года в Людвигсхафене (Германия) в результате железнодорожной аварии произошла разгерметизация цистерны с диметиловым эфиром, что впоследствии привело к взрыву парового облака; погибло 207 человек, 3808 пострадало;

- 10 февраля 1973 года на острове Статен (штат Нью-Йорк, США) произошел взрыв резервуара, ранее использовавшегося для хранения СПГ с последующим пожаром, причиной аварии считается нарушение противопожарной безопасности при проведении ремонтных работ и

возгорание изоляционного материала; погибло 40 человек;

– 13 июля 1973 года в Потчеструме (ЮАР) на заводе удобрений в результате разрушения резервуара произошла утечка аммиака; погибло 18 человек, пострадало более 65;

– 1 июня 1974 года в Фликсборо (Великобритания) на предприятии фирмы «Нурго» началась утечка циклогексана, что привело к его возгоранию и взрыву; погибло 28 человек, 89 человек пострадало, большинство зданий предприятия были разрушены;

– 10 июля 1976 года в итальянском городе Савезо произошел выброс в атмосферу диоксина; пострадало более тысячи человек, была заражена местность, отмечался массовый падеж скота;

– 8 марта 1979 года загорелся нефтеналивной танкер в заливе Бантри (Ирландия), что стало причиной взрыва; погибло 50 человек, судно было полностью разрушено, пристань повреждена;

– 3 декабря 1984 года произошла крупнейшая химическая катастрофа 20-го века в индийском городе Бхопал: в атмосферу было выброшено 42 тонны метилизоцианата; погибло более 3 тысяч человек; пострадало более 200 тысяч;

– 1 февраля 1988 года в ходе железнодорожной аварии в городе Ярославль произошел разлив 740 литров гептила, последствия аварии ликвидировало около 2 тысяч человек, население в зоне возможного заражения было эвакуировано;

– 20 марта 1989 года в литовском городе Ионава на заводе химических удобрений «Азот» в 1989 году произошел разлив 7 тысяч тонн жидкого аммиака, возгорание складов нитрофоски (минеральных удобрений); число погибших и пострадавших было минимальным благодаря метеорологической обстановке (ярко выраженная конвекция и ветер, направленный в сторону незаселенных районов);

– 2 июня 1989 года под городом Уфа случился разрыв трубопровода,

что привело к утечке нескольких тысяч тонн пропан-бутановой смеси, впоследствии это привело к взрыву при прохождении двух встречных поездов; погибло 575 человек, пострадало более 600;

- железнодорожная катастрофа в Мексике в августе 1991 года: в результате схода с рельсов 32 цистерн со сжиженным хлором произошел выброс в атмосферу 300 тонн хлора; погибло около 17 человек, пострадало более 500;

- выброс хлора на заводе «Каустик» (г. Волгоград) 30 июля 2000 года: в результате аварии в цехе производства хладона произошел выброс хлора; два человека погибло, пострадало – 16;

- выброс хлора на ОАО «Химпром» (г. Новочебоксарск) 27-28 апреля 2011 года: в результате двойной аварии пострадало 5 человек;

- разрыв аммиакопровода на заводе «Стирол» (Горловка, Донецкая область) 8 августа 2013 года: в результате аварии на аммиакопроводе произошел выброс аммиака в атмосферу, погибло 12 человек, пострадало – 26.

Естественно, в условиях постоянной угрозы аварий возникает необходимость использования научно-обоснованных подходов для обеспечения безопасности людей. Составной частью управления промышленной безопасностью является анализ риска аварий, который предполагает получение количественных оценок потенциальной опасности промышленных объектов. Основу методологии риска составляет определение последствий и вероятности нежелательных событий.

Ответственным этапом анализа риска аварий является прогнозирование последствий возможных аварий. Процедура прогнозирования последствий аварий схематично показана на рисунке 1.

Прогноз последствий аварийных событий базируется на использовании математических моделей и методов математического моделирования. При

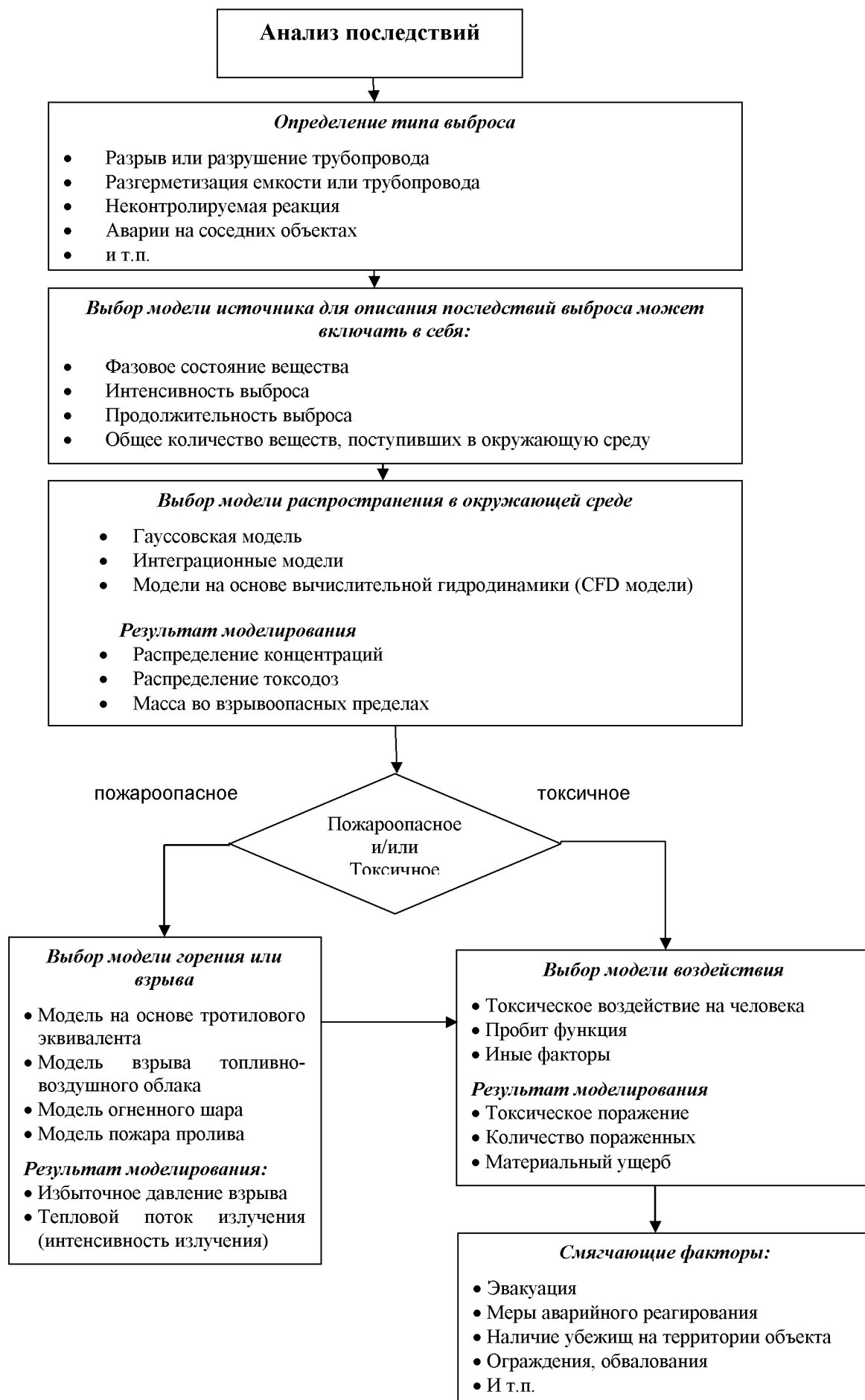


Рисунок 1. Процедура анализа последствий

этом большое значение придается правильному выбору моделей источников: модели истечения вещества, растекания жидких веществ по поверхности, модели мгновенного вскипания и парообразования из пролива. Эти модели позволяют охарактеризовать источники, вызывающие образование облака паров опасных веществ. Модели полей поражающих факторов включают модели концентрационных полей токсичных веществ, температурных полей, возникающих в случае пожаров и взрывов, распространения давления и осколков при взрывах. Для корректного определения количества опасного вещества, участвующего в аварии, и распределения полей поражающих факторов аварий в пространстве и времени необходимо понимание сути физических явлений, сопровождающих процесс аварийного выброса.

Прогнозирование последствий аварийных выбросов играет важную роль в управлении рисками и имеет важное значение:

- для принятия эффективных управленческих решений по обеспечению промышленной безопасности;
- для обоснования мер защиты людей и окружающей среды от последствий крупных аварий;
- выявления приоритетов при распределении финансовых, материальных и людских ресурсов на обеспечение безопасности (заниженная оценка опасности может привести к возрастанию неплановых потерь, а завышенная - к снижению экономической эффективности производства);
- решения вопросов размещения объектов (установок) на ограниченной территории (действующие нормы нередко завышают безопасные расстояния, что вызывает экономические трудности);
- информирования общественности, обеспокоенной размещением источников опасности вблизи селитебных зон;
- при страховании гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда.

## **ГЛАВА 1 МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ**

Авария начинается с инцидента, представляющего собой снижение герметичности и неконтролируемого истечения вещества из оборудования в окружающую среду. Наиболее типичны случаи разрыва или разрушения трубопровода, образования отверстия в резервуаре или в трубе, неконтролируемые реакции или внешнее возгорание.

В зависимости от варианта развития аварийной ситуации выбирается модель источника для математического описания процесса поступления вещества в окружающую среду. Это может быть истечение газа, испарение пролива, кипение жидкости, мгновенное вскипание и т.д. в зависимости от соотношения термодинамических условий внутри оборудования, соответствующих параметров окружающей среды и свойств подстилающей поверхности.

Моделирование процесса истечения позволяет прогнозировать скорость и продолжительность поступления, общее количество вещества, а также его фазовое состояние (твердое вещество, жидкость, пары или их сочетание). Результаты моделирования источника легковоспламеняющихся выбросов являются исходными данными для моделей пожара и взрыва, которые позволяют определить потенциалы энергетической опасности, такие как тепловое излучение и избыточное давление взрыва.

Расчетная интенсивность поступления вещества в окружающую среду используется в качестве исходных данных при описании процесса распространения поступающего вещества в атмосфере и определении концентрационных полей, необходимых для прогнозирования влияния последствий развития аварии на людей с помощью «Моделей воздействия», принимая в учет смягчающие факторы.

## 1.1 Возможные конфигурации оборудования и схемы его разрушения

1. Для емкости с газом или жидкой фазой возможно мгновенное разрушение (разрыв) емкости и выброс всего содержимого в окружающую среду (сценарий 1 или сценарий 3; в соответствии с рисунками 1.1, 1.2).

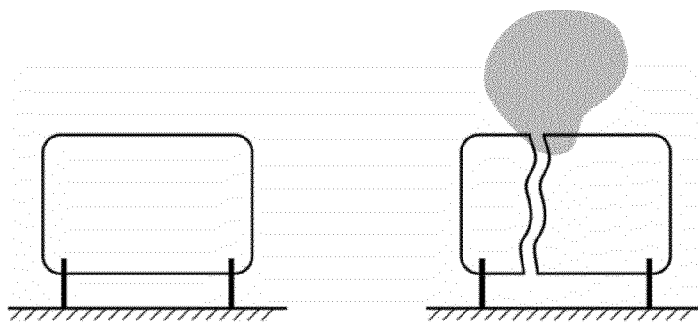


Рисунок 1.1. Мгновенное разрушение емкости с газовой фазой (сценарий 1)

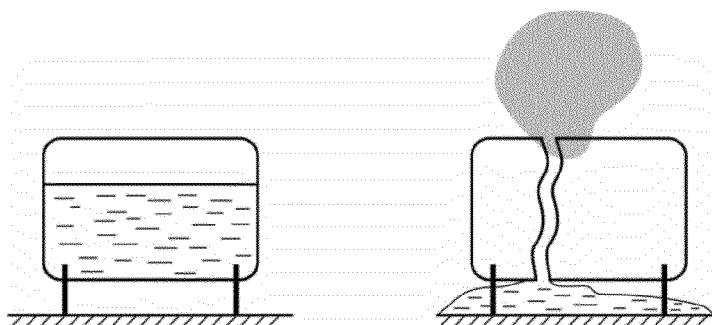


Рисунок 1.2. Мгновенное разрушение емкости с жидкой фазой (сценарий 3)

2. Для емкости с газом или жидкой фазой возможно образование аварийного отверстия (разгерметизации) в стенке емкости и последующее истечение газа и (или) жидкости в окружающую среду (сценарий 2 или сценарий 4). При разгерметизации емкости с жидкой фазой возможно образование отверстия как выше, так и ниже уровня жидкости (в соответствии с рисунками 1.3 — 1.5).

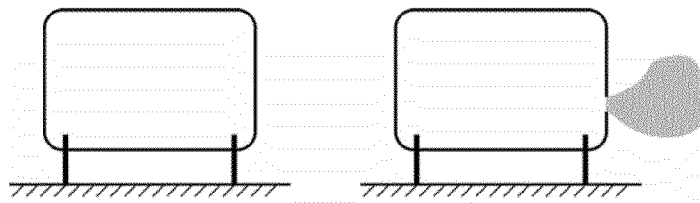


Рисунок 1.3. Разгерметизация емкости с газом (сценарий 2)

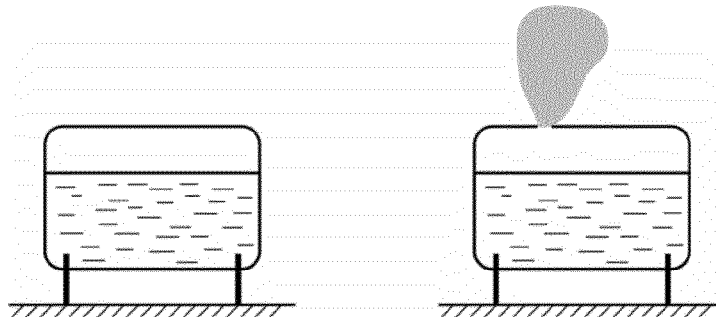


Рисунок 1.4. Разгерметизация емкости с жидкой фазой выше уровня жидкости (сценарий 4)

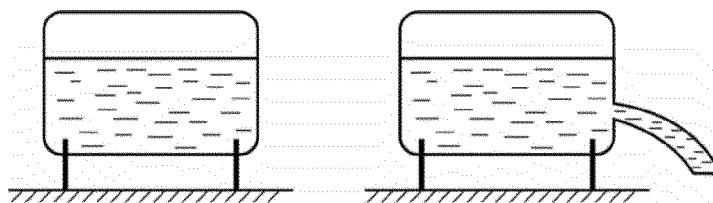


Рисунок 1.5. Разгерметизация емкости с жидкой фазой ниже уровня жидкости (сценарий 4)

3. Для емкости с газом или жидкой фазой с присоединенным трубопроводом возможно образование аварийного отверстия (разгерметизации) в стенке трубопровода либо полный разрыв трубопровода на некотором расстоянии от емкости (сценарий 2 или сценарий 4). При этом трубопровод может быть оснащен запорной арматурой, которая при срабатывании изолирует разгерметизированный (разрушенный) участок трубопровода от емкости. В этом случае в окружающую среду поступают газ и (или) жидкость и (или) двухфазный поток. На рисунках 1.6 – 1.8 отсекаемый участок аварийного трубопровода обозначен 1 и расположен справа от задвижки, которая, в свою очередь, расположена на трубопроводе около емкости.

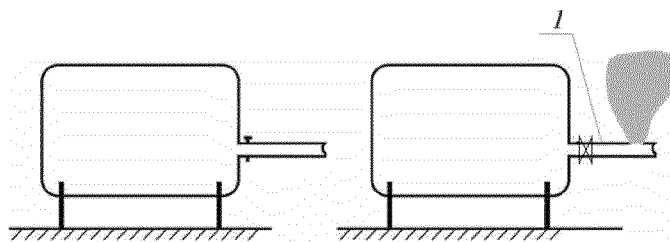


Рисунок 1.6. Разгерметизация трубопровода с газом, присоединенного к емкости (1 – отсекаемый участок аварийного трубопровода) (сценарий 2)

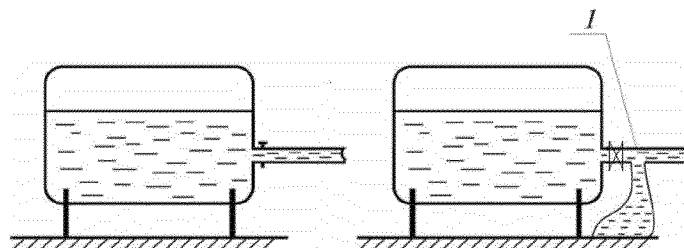


Рисунок 1.7. Разгерметизация трубопровода с жидкой фазой, присоединенного к емкости (1 – отсекаемый участок аварийного трубопровода) (сценарий 4)

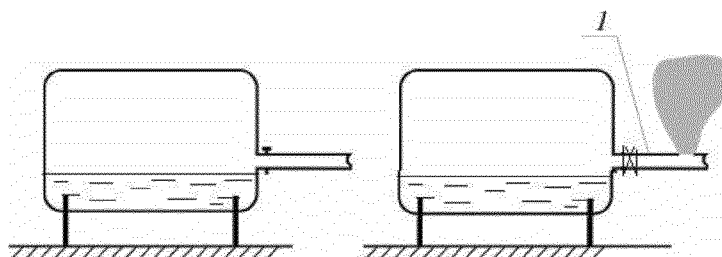


Рисунок 1.8. Разгерметизация трубопровода с газовой фазой, присоединенного к емкости (1 – отсекаемый участок аварийного трубопровода) (сценарий 4)

4. Для трубопровода с газом или жидкой фазой с нагнетающим компрессором или насосом возможно образование аварийного отверстия (разгерметизации) в стенке трубопровода либо полный разрыв трубопровода на некотором расстоянии от компрессора (насоса) (сценарий 2 или сценарий 4). Возможны также разрушения (разгерметизации) самих компрессоров, насосов, в том числе по причине выдавливания сальников у электронасосов, неисправности запорной арматуры (вентилей) и т.д. При этом трубопровод может быть оснащен запорной арматурой, которая при срабатывании

изолирует разгерметизированный (разрушенный) участок трубопровода от компрессора (насоса). В этом случае в окружающую среду поступают газ и (или) жидкость и (или) двухфазный поток. На рисунках 1.9, 1.10 отсекаемый участок аварийного трубопровода обозначен 1 и расположен справа от задвижки, которая, в свою очередь, расположена на трубопроводе около компрессора (насоса).

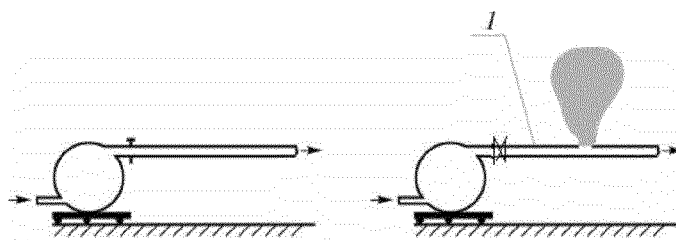


Рисунок 1.9. Разгерметизация трубопровода с газом, присоединенного к компрессору (1 – отсекаемый участок аварийного трубопровода)  
(сценарий 2)

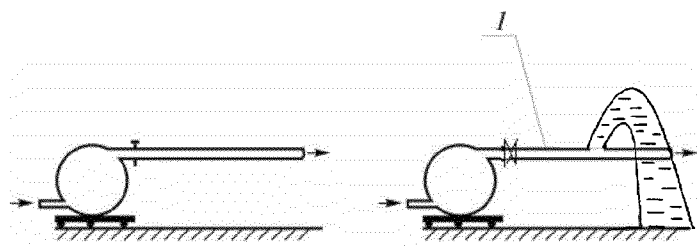


Рисунок 1.10. Разгерметизация трубопровода с жидкой фазой, присоединенного к насосу (1 – отсекаемый участок аварийного трубопровода) (сценарий 4)

## 1.2 Возможные стадии развития аварийной ситуации

В общем случае можно выделить восемь возможных стадий развития аварийной ситуации:

- разрушение оборудования и образование первичного облака;
- истечение жидкой фазы до отсечения аварийного участка;
- истечение жидкой фазы из аварийного участка после его отсечения;
- истечение газа при наличии пролива жидкой фазы и испарение с

пролива;

- истечение газа из разрушенного оборудования при отсутствии пролива жидкой фазы;
- испарение с пролива при отсутствии истечения жидкости или газа из разрушенного оборудования;
- испарение из емкости при отсутствии пролива;
- ликвидация аварийного отверстия (разгерметизации) и пролива.

Каждая из вышеперечисленных стадий вносит свой вклад в суммарную массу выброса опасного вещества.

На каждой стадии аварии формируются первичное и вторичное облака опасного вещества в атмосфере.

В зависимости от сценария, конфигурации оборудования, характера разрушения, свойств опасного вещества и действий по ликвидации аварии, отдельные стадии из приведенных выше, могут либо присутствовать, либо отсутствовать в той или иной аварийной ситуации.

**Сценарий 1.** Разрушение оборудования с выбросом всего объема опасного вещества, образование первичного облака, рассеяние первичного облака и воздействие на окружающую среду (в соответствии с рисунком 1.1).

**Сценарий 2.** Разгерметизация оборудования и истечение газа из поврежденного оборудования при отсутствии пролива жидкой фазы; рассеяние облака и воздействие на окружающую среду (в соответствии с рисунками 1.3, 1.6, 1.9).

При истечении газа из поврежденного трубопровода возможно отсечение аварийного участка трубопровода (либо в результате использования запорной арматуры, либо в результате остановки компрессоров, подающих опасного вещества в трубопровод, либо в результате и того и другого) и истечение опасного вещества из него.

Возможно прекращение выброса путем ликвидации аварийного отверстия (разгерметизации).

**Сценарий 3.** Разрушение оборудования с жидким опасным веществом, выброс опасного вещества в окружающую среду, при наличии перегрева у жидкой фазы, возможно ее вскипание с образованием в атмосфере газокапельного облака (в соответствии с рисунком 1.2). Часть жидкой фазы может пролиться на подстилающую поверхность - либо в обвалование, либо на неограниченную площадь. Если температура кипения жидкости при этом меньше температуры поверхности, то произойдет вскипание жидкости при ее соприкосновении с подстилающей поверхностью. Из газовой фазы, содержащейся в оборудовании, из образовавшейся при вскипании за счет перегрева жидкой фазы газокапельной фазы и из газа, образующегося при кипении пролива, образуется первичное облако, которое рассеивается в атмосфере, воздействуя на окружающую среду.

Из пролива происходит испарение опасного вещества, в результате чего образуется вторичное облако, которое также рассеивается в атмосфере, воздействуя на окружающую среду.

Возможно прекращение поступления опасного вещества в окружающую среду путем ликвидации пролива.

**Сценарий 4(а).** Аварии на емкости. Разгерметизация оболочки емкости выше уровня жидкости и длительное истечение газа из разрушенного оборудования при отсутствии пролива жидкой фазы (если жидкость находится в перегретом состоянии, то происходит вскипание жидкости, в результате которого в дополнение к газовой фазе, содержащейся в емкости на момент начала аварии, добавится газовая фаза, образовавшаяся при кипении), рассеяние газового облака опасного вещества (вторичного) и воздействие его на окружающую среду (в соответствии с рисунками 1.4, 1.5). После спада давления в емкости до атмосферного поступление опасного вещества в окружающую среду будет обусловлено лишь испарением опасного вещества с поверхности жидкости в емкости. При этом в атмосфере образуется вторичное облако, состоящее из газообразного опасного

вещества, поступающего из разгерметизированной емкости за счет испарения опасных веществ из нее. Вторичное облако будет формироваться на месте аварии до тех пор, пока не испарится все опасное вещество из емкости. Возможно прекращение выброса путем ликвидации аварийного отверстия (разгерметизации).

Разрушение оболочки емкости ниже уровня жидкости и истечение жидкой фазы из разрушенного оборудования, образование пролива на месте выброса.

Если жидкость в емкости находилась в перегретом состоянии, то происходит вскипание жидкости сразу после ее выброса из емкости и образование в атмосфере газокапельной взвеси. Затем, если температура кипения меньше температуры поверхности, происходит кипение жидкой фазы (той ее части, что не участвовала в формировании газокапельной взвеси в атмосфере) при проливе ее на подстилающую поверхность. При этом из газа, образовавшегося при кипении пролива, а также из газокапельной взвеси выброса, поступившего из емкости в атмосферу за время кипения пролива, формируется первичное облако, которое рассеивается в атмосфере и воздействует на окружающую среду.

При истечении перегретой жидкости, выброс жидкой фазы вскипает до выпадения на землю, образуя в атмосфере газокапельную взвесь опасного вещества. При этом в атмосфере образуется вторичное облако, состоящее из газообразного опасного вещества, испарившегося с пролива, и (при выбросе перегретой жидкости) из газокапельной взвеси, образующейся при вскипании опасного вещества сразу после выброса. Такое вторичное облако будет формироваться на месте аварии до тех пор, пока будет существовать возможность выброса жидкой фазы, т.е. до момента выброса из оборудования всей жидкой фазы, находившейся выше уровня разгерметизации. Причем, если в емкости находилась перегретая жидкость, и если давление могло опуститься ниже давления насыщенного пара, то по

мере вытекания жидкости возможно вскипание перегретого опасного вещества в самой емкости.

После окончания выброса жидкой фазы из емкости начинается истечение газовой фазы за счет наличия избыточного давления в емкости. При этом на стадии истечения газовой фазы продолжается испарение пролива. В результате в атмосфере образуется вторичное облако опасного вещества, состоящее из газообразного опасного вещества, испарившегося с пролива, и из газообразного опасного вещества, поступающего из разрушенной емкости за счет наличия избыточного давления в емкости. Такое вторичное облако будет формироваться на месте аварии до тех пор, пока будет существовать возможность выброса газовой фазы из емкости за счет избыточного давления в емкости и испарения из пролива. Причем, если в емкости находилась перегретая жидкость, то в формирующееся на месте аварии вторичное облако, будет поступать не только газовая фаза, находившаяся в емкости на начало аварии, но и газовая фаза, образующаяся при вскипании в емкости с перегретой жидкостью.

Если давление в емкости становится равным атмосферному, то газовая фаза из разгерметизированной емкости перестает поступать в окружающую среду за счет избытка давления. Если пролив опасного вещества при этом еще не испарился, то в атмосфере образуется вторичное облако опасного вещества, состоящее из газообразного опасного вещества, испарившегося с пролива. Такое вторичное облако будет формироваться на месте аварии до тех пор, пока будет существовать испарение опасного вещества из пролива.

Если после испарения пролива давление в емкости еще не стало равным атмосферному, то газовая фаза из разгерметизированной емкости продолжает поступать в окружающую среду за счет избыточного давления. В атмосфере при этом образуется вторичное облако опасного вещества, состоящее из газообразного опасного вещества. Такое вторичное облако будет формироваться на месте аварии до тех пор, пока будет существовать

избыточное давление в емкости.

Если пролив опасного вещества на месте аварии испарился, и давление в емкости стало равным атмосферному, то поступление опасного вещества в окружающую среду будет обусловлено лишь испарением опасного вещества с поверхности жидкости в емкости. При этом в атмосфере образуется вторичное облако, состоящее из газообразного опасного вещества, поступающего из разгерметизированной емкости за счет испарения. Вторичное облако будет формироваться на месте аварии до тех пор, пока не испарится все опасное вещество из емкости.

Возможно прекращение поступления опасного вещества в окружающую среду путем ликвидации аварийного отверстия и пролива.

**Сценарий 4(б).** Аварии на трубопроводах, на входе которых стоит емкость. Разрушение трубопровода, выходящего из емкости выше уровня жидкости, и истечение газа из разрушенного оборудования при отсутствии пролива жидкой фазы (в соответствии с рисунками 1.7, 1.8). Если жидкость находится в перегретом состоянии, то при падении давления может происходить вскипание жидкости, в результате которого в дополнение к газовой фазе, содержащейся в емкости на момент начала аварии, добавится газовая фаза, образовавшаяся при кипении. При этом в атмосфере происходит рассеяние вторичного газового облака опасного вещества и воздействие его на окружающую среду. При наличии запорной арматуры возможно отсечение аварийного участка трубопровода и истечение опасного вещества только из этого аварийного участка. Если давление в емкости (или в отсеченном участке трубопровода) уменьшилось и стало равным атмосферному, то поступление опасного вещества в окружающую среду будет обусловлено лишь его испарением с поверхности жидкости в емкости и/или в отсеченном участке трубопровода. При этом в атмосфере образуется вторичное облако, состоящее из газа, поступающего из разгерметизированной емкости и/или отсеченного участка трубопровода за

счет испарения. Вторичное облако будет формироваться на месте аварии до тех пор, пока не испарится все опасное вещество из емкости.

Возможно прекращение выброса путем ликвидации аварийного отверстия (разгерметизации).

При разрушении трубопровода, выходящего из емкости ниже уровня жидкости, стадии аварии будут аналогичны описанным в разделе Аварии на емкости, с двумя отличиями.

Во-первых, при существенном разрушении трубопровода в случае выброса перегретой жидкости, вскипание жидкости может происходить не только в воздухе, но и в самом трубопроводе.

Во-вторых, при наличии на трубопроводе запорной арматуры и срабатывании ее в ходе аварии, появляется этап - истечение из отсеченного участка трубопровода, который полностью совпадает по физической картине с описанным выше выбросом из емкости - Сценарий 4а. Аварии на емкости.

**Сценарий 4(в).** Аварии на трубопроводах, на входе которых стоит насос. При разрушении трубопровода происходит истечение жидкой фазы и образование пролива на месте выброса (в соответствии с рисунком 1.10). Если жидкость в трубопроводе находилась в перегретом состоянии, то происходит вскипание жидкости либо сразу после ее выброса из трубопровода (случай, когда при сильном разрушении трубопровода место выброса находится вблизи насоса и случаи небольших отверстий разгерметизации), либо внутри трубопровода (случай, когда при сильном разрушении трубопровода место выброса находится вдали от насоса).

При выбросе перегретой жидкости в атмосфере образуется газокапельная взвесь, а затем происходит кипение жидкой фазы (той ее части, которая не участвовала в формировании газокапельной взвеси в атмосфере) при проливе на подстилающую поверхность, если температура кипения меньше температуры подстилающей поверхности. При этом из газа, образовавшегося при кипении пролива, а также из газокапельной взвеси

выброса, поступившего из трубопровода в атмосферу за время кипения пролива, формируется первичное облако, которое рассеивается в атмосфере и воздействует на окружающую среду.

Продолжающийся выброс жидкой фазы идет в пролив, с которого происходит испарение опасного вещества. При выбросе перегретой жидкости, часть жидкой фазы вскипает до выпадения на землю, образуя в атмосфере газокпельную взвесь опасного вещества. При этом в атмосфере образуется вторичное облако опасного вещества, состоящее из газообразного опасного вещества, испарившегося с пролива, и (при выбросе перегретой жидкости) из газокпельной взвеси, образующейся при вскипании опасного вещества, либо сразу после выброса, либо в трубопроводе. Такое вторичное облако будет формироваться на месте аварии до тех пор, пока будет существовать возможность выброса жидкой фазы (двухфазной смеси), то есть до момента отсечения аварийного участка трубопровода и выброса из отсеченного участка трубопровода всей жидкой фазы, находящейся в нем выше уровня аварийного отверстия (разгерметизации).

После окончания выброса жидкой фазы из отсеченного участка трубопровода начинается истечение газовой фазы за счет наличия избыточного давления в нем, что возможно только в случае, если в трубопроводе находится перегретая жидкость. При этом на стадии истечения газовой фазы продолжается испарение пролива. В результате в атмосфере образуется вторичное облако, состоящее из газообразного опасного вещества, испарившегося с пролива, и из газообразного опасного вещества, поступающего из разрушенного трубопровода за счет наличия избыточного давления в нем. Такое вторичное облако будет формироваться на месте аварии до тех пор, пока будет существовать возможность выброса газовой фазы из трубопровода за счет избыточного давления в нем и испарения из пролива.

Если давление в отсеченном участке аварийного трубопровода

становится равным атмосферному, то газовая фаза из разгерметизированного трубопровода перестает поступать в окружающую среду за счет избытка давления. Если пролив опасного вещества при этом еще не испарился, то в атмосфере образуется вторичное облако опасного вещества, состоящее из газообразного опасного вещества, испарившегося с пролива. Такое вторичное облако будет формироваться на месте аварии до тех пор, пока будет существовать испарение опасного вещества из пролива.

Если испарился пролив, а давление в отсеченном участке аварийного трубопровода осталось выше атмосферного, то газовая фаза из разгерметизированного трубопровода продолжает поступать в окружающую среду за счет избыточного давления. При этом в атмосфере образуется вторичное облако, состоящее из газообразного опасного вещества, поступающего из отсеченного участка аварийного трубопровода за счет избыточного давления. Такое вторичное облако будет формироваться на месте аварии до тех пор, пока будет существовать избыточное давление в отсеченном участке аварийного трубопровода.

Если пролив опасного вещества на месте аварии испарился, и давление в отсеченном участке аварийного трубопровода стало равным атмосферному, то поступление опасного вещества в окружающую среду будет обусловлено лишь испарением опасного вещества с поверхности жидкости в трубопроводе. В атмосфере при этом образуется вторичное облако, состоящее из газообразного опасного вещества, поступающего из разгерметизированного трубопровода за счет испарения опасного вещества. Такое вторичное облако будет формироваться на месте аварии до тех пор, пока не испарится все опасное вещество из трубопровода.

Возможно прекращение поступления опасного вещества в окружающую среду путем ликвидации аварийного отверстия и пролива в любой момент времени.

### 1.3 Определение расхода стабильной жидкости из отверстия

Рассмотрим истечение жидкости в атмосферу из отверстия в вертикальной стенке (рисунок 1.11).

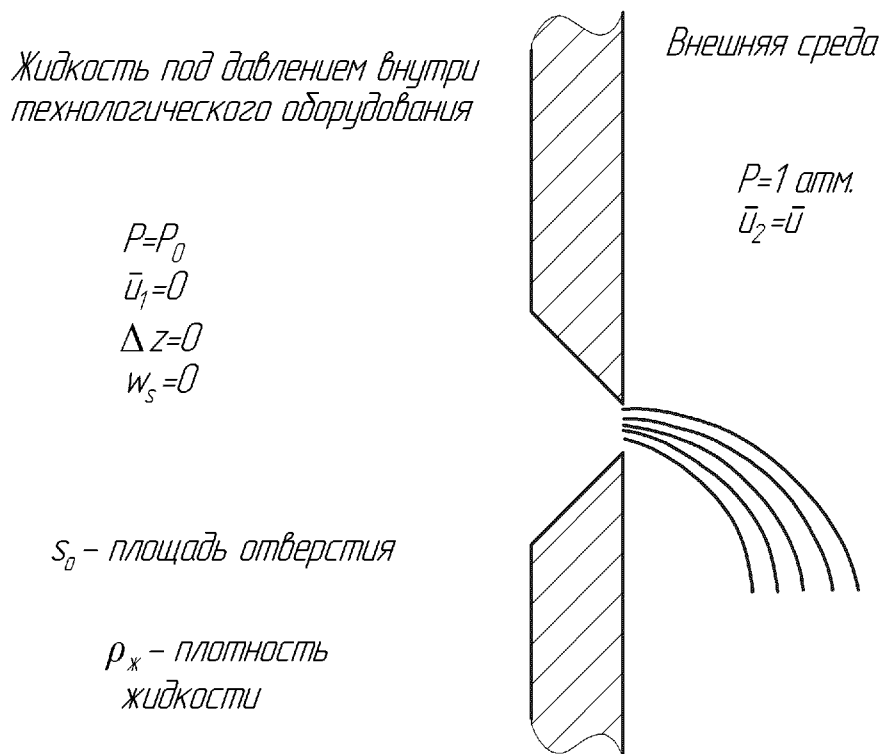


Рисунок 1.11. Расчетная схема истечения жидкости из отверстия

Давление жидкости, находящейся внутри оборудования, преобразуется в кинетическую энергию, как только жидкость просачивается через отверстие утечки. Силы трения между движущейся жидкостью и стенкой с течью преобразуют часть кинетической энергии жидкости в тепловую энергию, что приводит к уменьшению скорости.

Написав уравнение Бернулли для центральной линии тока между точками 0 и 1 и пренебрегая скоростями в резервуаре, получаем

$$z_0 + \frac{P_0}{\rho_j \cdot g} + 0 = z_1 + \frac{P_1}{\rho_j \cdot g} + \frac{V_1^2}{2g}, \quad (1.1)$$

где  $P_0$  – давление в резервуаре, Па;  $P_1$  – давление в окружающей среде ( $P_1=P_a$ ), Па;  $z_0$  и  $z_1$  – геометрические высоты точек 0 и 1 соответственно, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $V_1$  – скорость истечения жидкости из

отверстия, м/с.

При  $z_0=z_1$ , после простых преобразований, учитывая потери на местное сопротивление, получим уравнение для скорости истечения жидкости из отверстия

$$V_1 = \varphi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_{\text{ж}}}}, \quad (1.2)$$

где  $\varphi$  – коэффициент скорости: величина  $\varphi$  изменяется в пределах  $0,94 \div 0,97$  и может быть найдена в справочниках по гидравлике.

Площадь поперечного сечения отверстия не равна площади поперечного сечения струи. Векторы скоростей частиц жидкости в тот момент, когда струя вырывается из отверстия, не параллельны друг другу, а имеют компонент, направленный к центру потока, т.е. струя сужается. Пройдя небольшое расстояние, струя перестает сжиматься, и частицы вновь движутся параллельно друг другу. Таким образом, полный поток равен произведению скорости на площадь именно в том месте, где сжатие струи прекратилось.

Массовый расход жидкости из отверстия с учетом потерь на местное сопротивление и сжатие струи равен

$$G = \rho_{\text{ж}} \cdot V_1 \cdot S_0 = \varepsilon \cdot \varphi \cdot S_0 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P \cdot \rho_{\text{ж}}} = C_D \cdot S_0 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P \cdot \rho_{\text{ж}}}, \quad (1.3)$$

где  $S_0$  – площадь отверстия,  $\text{м}^2$ ;  $\varepsilon$  – коэффициент сжатия струи;  $C_D$  – коэффициент расхода.

Для случая, если вещество в емкости содержится под избыточным давлением, то

$$G = \rho_{\text{ж}} \cdot C_D \cdot S_0 \cdot \sqrt{2 \cdot (P_0 - P_a) / \rho_{\text{ж}} + 2 \cdot g \cdot (h_0 - h_{\text{отв}})}, \quad (1.4)$$

где  $P_a$  – атмосферное или давление окружающей среды (Па);  $P_0$  – давление в аппарате (Па);  $h_0$  – уровень жидкости в резервуаре, м;  $h_{\text{отв}}$  – высота отверстия, м.

При хранении сжиженного газа в резервуаре под собственным давлением при температуре в аппарате  $T_0$  в качестве  $P_0$  можно принять

давление насыщенных паров  $P_n$  вещества, которое определяется по следующей зависимости

$$P_n = P_a \cdot \exp(\Delta H \cdot M \cdot \left( \frac{1}{T_{\text{кип}}} - \frac{1}{T_0} \right) / R_0), \quad (1.5)$$

где  $M$  – молярная масса вещества, кг/кмоль;  $\Delta H$  – теплота испарения жидкости, Дж/кг;  $T_{\text{кип}}$  – температура кипения вещества при атмосферном давлении, °C;  $R_0$  – газовая постоянная, Дж/(кг·K).

#### 1.4 Истечение газа через отверстие из сосуда высокого давления

В случае перегретого пара соответствующими уравнениями являются уравнения потока для сжимаемого газа, которые позволяют описать важные явления запираемого или критического потока. Рассмотрим газовую струю, выходящую из трещины в паровоздушное пространство из резервуара для хранения жидкости под давлением. Когда происходит разгерметизация, скорость и массовый расход выходящего потока будет зависеть от внутреннего и наружного давления оборудования. В случае, когда эти давления отличаются значительно, поток становится незапираемым. Однако газ может выйти из трещины только так быстро, как скорость звука, и при больших перепадах давления возникают условия «запираания» на выходе. Запираемый поток просто означает, что газ движется через прокол при максимально возможной скорости, а именно при локальной скорости звука в газе.

Уравнения скорости выхода для идеальной (заметим, что режим неидеального газа можно рассчитывать, когда поток приближается к кривой насыщения) газовой струи хорошо известны. Является ли поток запираемым или нет, зависит от соотношения атмосферного давления к давлению в оборудовании относительно к критическому отношению давления, определяется ниже

$$r_{crit} = \left( \frac{P_a}{P_0} \right)_{crit} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}, \quad (1.6)$$

где  $P_0$  – абсолютное давление (давление торможения) в оборудовании, Н/м<sup>2</sup>;  $P_a$  – абсолютное окружающее атмосферное давление, Н/м<sup>2</sup>;  $\gamma$  – газовое отношение удельной теплоемкости –  $C_p/C_v$  (безразмерная величина).

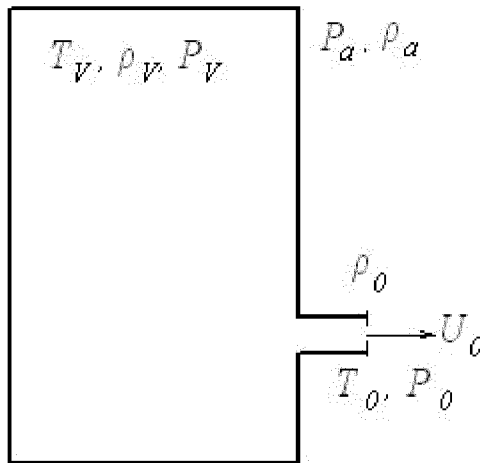


Рисунок 1.12. Расчетная схема истечения сжатого газа из отверстия

Рассмотрим истечение из резервуара через насадку газа, имеющего температуру  $T_V$ , давление  $P_V$  и плотность  $\rho_V$  (рисунок 1.12). Размеры резервуара достаточно велики, так что скорость газа в нем можно считать равной нулю, поэтому  $T_V$ ,  $P_V$  и  $\rho_V$  – параметры торможения. Пусть истечение газа происходит в окружающую среду, где поддерживается постоянное давление  $P_a$  (оно называется противодавлением) и где плотность газа равна  $\rho_a$ . Температуру, давление и плотность газа в выходном сечении обозначим  $T_0$ ,  $P_0$  и  $\rho_0$  соответственно.

Пока скорость газа в выходном сечении  $U_0$  меньше скорости звука  $a$  в этом сечении (число Маха  $M < 1$ ), возмущение может распространяться вверх по течению, и если, например,  $P_0 > P_a$ , то «известие» об этом (т.е. о том, что нарушен баланс энергии и не выполняются условия, описываемые уравнением Бернулли) достигает резервуара. В результате скорость газа возрастает до значения, при котором в соответствии с уравнением Бернулли  $P_0 = P_a$ ,  $\rho_0 = \rho_a$ , т.е. до значения

$$U_0 = \sqrt{\frac{2\gamma}{\lambda-1} \left( \frac{P_V}{\rho_V} - \frac{P_0}{\rho_0} \right)} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left( \frac{P_V}{\rho_V} - \frac{P_a}{\rho_a} \right)}. \quad (1.7)$$

Таким образом, уменьшая противодействие  $P_a$  при фиксированном  $P_V$ , можно увеличивать скорость газа, на первый взгляд, до значения  $U = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{P_V}{\rho_V}}$ . В действительности, когда при некотором противодействии  $P_a^*$  выходная скорость  $U_0$  достигает скорости звука  $a$  (число Маха  $M=1$ ), при дальнейшем понижении противодействия  $P_a$  известие о несоответствии между  $P_a$  и  $P_0=P_0^*$  не может достигнуть резервуара, так как оно распространяется со скоростью звука  $a < U$  и «сносится» потоком вниз по течению. В результате резервуар с отверстием оказывается как бы изолированным от окружающей среды, а процесс истечения определяется лишь условиями в резервуаре (параметрами торможения) и равенством выходной скорости звука в выходном сечении. Это явление называют запиранием потока в насадке.

Для того чтобы установить закономерность изменения скорости газа на выходе из насадки, рассмотрим зависимость массового расхода  $G$  от давления в выходном сечении насадки  $P_0$ :

$$G = \rho_0 \cdot U_0 \cdot S_0, \\ G = \rho_0 \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left( \frac{P_V}{\rho_V} - \frac{P_0}{\rho_0} \right)} \cdot S_0. \quad (1.8)$$

Считаем, что течение газа адиабатическое, тогда, используя адиабату Пуассона

$$\frac{P_V}{\rho_V^\gamma} = \frac{P_0}{\rho_0^\gamma} = c^\gamma, \quad (1.9)$$

где  $c$  – постоянная.

Исключаем из (1.8) плотность газа  $\rho = P^{1/\gamma}/c$  и получаем

$$G = \frac{1}{c} \rho_0^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left( c P_V^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - c P_0^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)} \cdot S_0. \quad (1.10)$$

Из выражения (1.8) следует, что  $G = 0$  при  $P_0=0$  и при  $P_0=P_V$ . В первом случае массовый расход равен нулю из-за того, что при  $P_0=0$  плотность газа  $\rho_0=0$ , а во втором случае скорость газа равна нулю, так как давление в резервуаре, из которого газ вытекает, и давление в камере, куда он втекает, равны между собой. Очевидно, массовый расход на интервале  $(0, P_V)$  должен иметь хотя бы один максимум. Продифференцировав выражение (1.10) по  $P_0$  и приравняв  $\partial G/\partial P_0$  нулю, найдем, что  $G$  имеет один максимум при

$$P_0^{\max} = P_V \cdot \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}. \quad (1.11)$$

Для значения  $\gamma=1,4$  найдем

$$P_0^{\max} \cong 0,528 P_V.$$

Подставив (1.11) в (1.10), найдем максимальный расход из насадки

$$G^{\max} = \sqrt{P_V \cdot \rho_V} \cdot \sqrt{\gamma \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \cdot S_0. \quad (1.12)$$

Как показывают эксперименты, зависимость  $G$  от  $P_0$  в виде (1.10) хорошо аппроксимирует опытные точки для значений  $P_{\text{вых}}$ , лежащих в интервале  $(P_0^{\max}, P_V)$ . Для того, чтобы выяснить, каким будет истечение при значении  $P_0$  в интервале  $(0, P_0^{\max})$  согласно (1.11):

$$\begin{aligned} U_0^{\max} &= \frac{G^{\max}}{\rho_0 \cdot S_0} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left( \frac{P_V}{\rho_V} - \frac{P_0}{\rho_0} \right)} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left( c P_V^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - c P_0^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)} = \\ &= \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left( c P_V^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - c P_0^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \frac{2\gamma}{\gamma+1} \right)} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} c P_V^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \left( 1 - \frac{2\gamma}{\gamma+1} \right)} = \\ &= \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{P_V}{\rho_V} \frac{\gamma-1}{\gamma+1}} = \sqrt{\frac{P_V}{\rho_V} \frac{2\gamma}{\gamma+1}} = \sqrt{R_0 T_0 \frac{2\gamma}{\gamma+1}} = a_0 \sqrt{\frac{2}{\gamma+1}} = a^*. \end{aligned}$$

Таким образом, при максимальном расходе  $G^{\max}$  скорость газа  $U_0$  в

выходном сечении становится равной скорости звука  $a^*$  в нем. Следовательно, при противодавлении  $P_V = P_0^{\max}$  в выходном сечении происходит описанное выше явление запираания потока, и при дальнейшем уменьшении  $P_a$  влияние противодавления исключается, а массовый расход  $G$  при значении  $P_a$  в интервале  $(0, P_0^{\max})$  остается постоянным и равным  $G^{\max}$ .

Из изложенного выше следует, что при истечении из резервуара через насадку в выходном сечении скорость течения газа не может быть больше скорости звука.

Для типичных газов значения  $\gamma$  находится в диапазоне от 1,1 до 1,5, а значения  $r_{\text{crit}}$  от 0,5 до 0,59. Таким образом, высвобождение большинства двухатомных газов ( $\gamma = 1.4$ ) будет запираемым или критическим потоком при критическом отношении давлений 0,528 (то есть давление в оборудовании выше почти в два раза атмосферного давления). Для идеального газа, выходящего через насадку при изоэнтропических условиях, массовый расход газа определяется как:

докритическое истечение

$$\text{при } \frac{P_a}{P_V} \geq \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}};$$

$$G = S_0 \cdot C_D \left[ P_V \cdot \rho_V \cdot \left( \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \right) \cdot \left( \frac{P_a}{P_V} \right)^{\frac{2}{\gamma}} \cdot \left( 1 - \left( \frac{P_a}{P_V} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right) \right]^{1/2}, \quad (1.13)$$

сверхкритическое истечение

$$\text{при } \frac{P_a}{P_V} < \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}};$$

$$G = S_0 \cdot C_D \left[ P_V \cdot \rho_V \cdot \gamma \cdot \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}} \right]^{1/2}, \quad (1.14)$$

где  $G$  – массовый расход, кг/с;  $P_a$  – атмосферное давление, Па;  $P_V$  – давление газа в резервуаре, Па;  $\gamma$  – показатель адиабаты газа;  $S_0$  – площадь отверстия,

$\text{м}^2$ ;  $C_D$  – коэффициент истечения (при отсутствии данных допускается принимать равным 0,8);  $\rho_v$  – плотность газа в резервуаре при давлении  $P_v$ ,  $\text{кг/м}^3$ .

### 1.5 Истечение сжиженного газа из отверстия

В зависимости от геометрии резервуара, высоты отверстия относительно уровня жидкости, физико-химических свойств вещества возможно возникновение различных типов истечения. Если отверстие находится над поверхностью жидкости, и его площадь намного меньше площади горизонтального сечения резервуара, то происходит однофазное истечение паров вещества, и аэрозольное облако не образуется. Данный случай хорошо описывается стандартными моделями истечения газа с учетом «подпитки» за счет испарения находящейся в резервуаре жидкости.

В случае, когда площадь отверстия достаточно велика, происходит резкое падение давления в резервуаре, что приводит к бурному вскипанию и вспениванию жидкости в объеме резервуара. В результате, несмотря на то, что отверстие расположено выше поверхности жидкости, истечение происходит в двухфазном режиме и в атмосферу выбрасывается смесь паров вещества и жидких капель.

В другом возможном случае, когда отверстие находится ниже уровня жидкости, вещество начинает поступать из резервуара в жидком состоянии. Если жидкость из резервуара попадает в канал, соединяющийся с атмосферой, в канале происходит вскипание жидкости, а на уровне выходного отверстия реализуются условия «запирания» потока. Для условий хранения насыщенной жидкости, когда  $P_0 = P(T_0)$ , расход запираемого потока может быть выражен как

$$G = \left( \frac{-1}{d\rho/dP} \right)^{1/2}, \quad (1.15)$$

где  $v$  – удельный объем двухфазной среды:

$$v = (1 - x)v_{жс} + xv_{жг} = v_{жг}x + v_{жс}, \quad (1.16)$$

где  $v_{жг}$  – разница в удельном объеме между жидкостью и паром при температуре  $T_0$ , м<sup>3</sup>/кг;  $v_{жс}$  – удельный объем жидкости;  $x$  – массовая доля пара.

Изменение в удельном объеме по отношению к давлению может быть выражено как

$$\frac{dv}{dP} \approx v_{жг} \frac{dx}{dP} \approx -v_{жг} \frac{C_{P,жс}}{\Delta H} \frac{dT}{dP} \approx \frac{v_{жг}^2}{\Delta H^2} T \cdot C_{P,жс}, \quad (1.17)$$

где  $C_{P,жс}$  – удельная теплоемкость жидкости;  $\Delta H$  – скрытая теплота парообразования. Уравнение (1.17) справедливо в случае выполнения следующего неравенства

$$x < \frac{Pv_{жг}}{\Delta H^2} T \cdot C_{P,жс}. \quad (1.18)$$

Подставляя уравнение (1.17) в уравнение (1.15), получим следующее выражение для определения массового расхода запираемого потока

$$G \approx \frac{\Delta H}{v_{жг}} \left( \frac{1}{TC_{P,жс}} \right)^{1/2} \approx \frac{dP}{dT} \left( \frac{T}{C_{P,жс}} \right)^{1/2}. \quad (1.19)$$

В общем случае объемный расход двухфазной смеси (пар+жидкость) через единицу площади выходного сечения

$$G = 0.6S_0 \sqrt{2Hg\rho_{жс}^2 + 2\rho_{жс}(P - P_n(T)) + \frac{1}{K} \frac{\Delta H^2 \rho^2(T, P_n(T))}{C_P T_{кип}}}, \quad (1.20)$$

где  $H$  – высота столба жидкости над отверстием разгерметизации;  $P_n(T)$  – давление насыщенных паров жидкости при температуре  $T$ ;  $\rho(T, P_n(T))$  – плотность газообразного вещества при температуре  $T$  и давлении  $P_n(T)$ ;  $K$  – функция, учитывающая потери от трения и зависящая от  $L$  – длины участка трубопровода от входа до места разгерметизации;  $C_P$  – удельная теплоемкость жидкости;  $T_{кип}$  – температура кипения при атмосферном давлении.

Функция  $K$  определяется следующим образом

$$K = \begin{cases} \frac{\Delta H^2 \rho^2(T, P_n(T))}{2\rho_{ж}(P_n(T) - P) C_P T_{кин}} + \frac{L}{D_{тр}}, 0 \leq L \leq D_{тр} \\ 1.18, 30 \leq L \leq 50 D_{тр} \\ 1.33, 50 \leq L \leq 100 D_{тр} \\ 1.54, 100 \leq L \leq 200 D_{тр} \\ 1.82, 200 \leq L \leq 400 D_{тр} \\ 2.1, 400 < L \end{cases}, \quad (1.21)$$

где  $D_{тр}$  – диаметр трубопровода.

Когда длина канала очень короткая, жидкость выходит из емкости настолько быстро, что не успевает установиться термодинамическое равновесие. Эксперименты показали, что равновесный поток достигается при длине канала более 0,1 м. Для длин канала  $< 0,1$  м, расход среды сильно увеличивается с уменьшением длины и при длине, равной нулю, из отверстия истекает только жидкость. В работе [8] предложена интерполяционная формула, связывающая равновесную и неравновесную модели для скорости истечения насыщенной жидкости.

Этот неравновесный эффект можно оценить путем введения параметра  $N$  в уравнение (1.22)

$$G \approx \frac{\Delta H}{v_{жс}} \left( \frac{1}{NT_c} \right)^{1/2} \approx \frac{dP}{dT} \left( \frac{T}{N_c} \right)^{1/2}, \quad (1.22)$$

где  $N$  находится из

$$N = \frac{\Delta H^2}{2\Delta P \rho_{жс} c_D^2 v_{жс}^2 T_c} + L / L_c \text{ для } 0 \leq L \leq L_c = 0.1 \text{ м}, \quad (1.23)$$

где  $L$  – длина потока, м.

Уравнение (1.23) отражает только тот факт, что степень неравновесности изменяется прямо пропорционально от времени пребывания жидкости, от длины канала.

Для  $L/D = 0$ , уравнения (1.22) и (1.23) сводятся к хорошо известному уравнению через насадку (уравнению Бернулли) для несжимаемого потока, то

есть

$$G_{c,L} = C_D (2(P_n - P_a) / v_{жн})^{1/2}, \quad (1.24)$$

где  $C_D$  – коэффициент расхода (безразмерный и обычно равен 0,6 для насадки);  $P_n$  – давление пара при температуре хранения  $T_0 = P(T_0)$ , Н/м<sup>2</sup>;  $P_a$  – атмосферное давление, Н/м<sup>2</sup>;  $v_{жн}$  – удельный объем жидкости при условии насыщения.

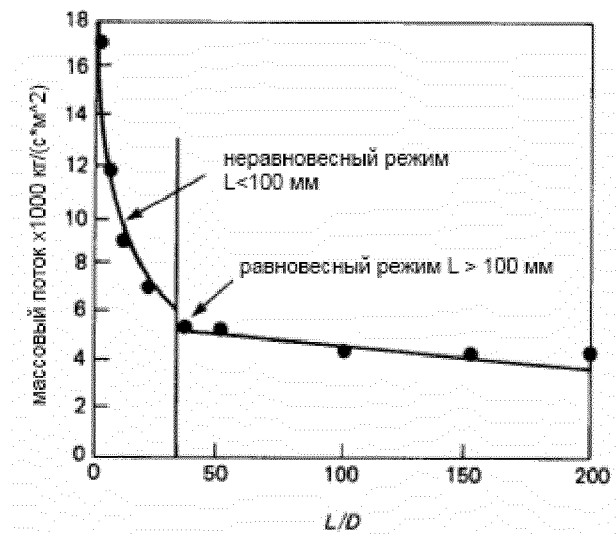


Рисунок 1.13. Изменение массового потока насыщенного F-11 в зависимости от отношения длины канала  $L$  к диаметру отверстия  $D = 3,2$  мм

Если отверстие непосредственно соединяет объем резервуара с внешней атмосферой, то результатом станет образование жидкостной струи. Скорость истечения жидкости может быть определена из уравнения Бернулли

$$G = C_D S_0 \sqrt{2(P_0 - P_a) \rho_{жс}}. \quad (1.25)$$

## 1.6 Примеры расчетов по Главе 1

### **Пример 1.1 Рассчитать количество жидкости, вытекшей из резервуара, работающего при атмосферном давлении**

*Исходные данные:*

Цилиндрическая емкость высотой 6 м и диаметром 2,5 метра используется для хранения бензола. Бак заполняется азотом до постоянного давления  $P_0=0,1$  МПа с целью предотвращения взрыва. Уровень жидкости в резервуаре составляет  $h_0=5,2$  метра.

Определить расход жидкости  $G$  при истечении из отверстия разгерметизации диаметром  $d_{отв}=12,5$  мм на уровне  $h_{отв}=1,5$  метров от земли и максимальный объем бензола  $V_{ист}$ , который может вытечь из отверстия.

*Решение:*

Плотность бензола  $\rho_{ж}$  принимаем равной  $878,6$  кг/м<sup>3</sup> (справочная величина). Площадь поперечного сечения емкости определяется по известной формуле определения площади круга  $S=\pi \cdot d^2/4$  и будет равна

$$S_{сеч} = \frac{3,14 \cdot 2,5^2}{4} = 4,9 \text{ м}^2.$$

Тогда объем бензола  $V_{ист}$ , который может вытечь из отверстия, будет равен произведению площади поперечного сечения емкости  $S_{сеч}$  на толщину слоя жидкости  $H=(h_0-h_{отв})$ , находящегося выше отверстия в емкости:

$$V_{ист} = 4,9 \cdot (5,2 - 1,5) = 18,13 \text{ м}^3.$$

Масса бензола, содержащаяся выше отверстия, равна

$$m_{ж} = \rho_{ж} \cdot V_{ист};$$

$$m_{ж} = 878,6 \cdot 18,13 = 15929,02 \text{ кг}.$$

Площадь сечения отверстия

$$S_0 = \frac{3,14 \cdot 0,0125^2}{4} = 0,000123 \text{ м}^2.$$

Расход жидкости (при атмосферном давлении) при истечении из отверстия в резервуаре определяется по формуле (1.6) и равен

$$G = 0,61 \cdot 0,000123 \cdot 878,6 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot (5,2 - 1,5)} = 0,56 \text{ кг/с}.$$

**Пример 1.2 Рассчитать количество жидкости (сжиженного газа), вытекшей из резервуара, работающего при избыточном давлении**

*Исходные данные:*

В шаровом резервуаре диаметром 16 м под избыточном давлением собственных паров содержится сжиженный газ – пропан при температуре 38°C с уровнем жидкости  $h_0=13$  м. В результате сквозной коррозии в оболочке образуется отверстие диаметром  $d_{\text{отв}}=25$  мм на высоте  $h_{\text{отв}}=4$  м от нижней точки резервуара.

Определить объем жидкости, находящийся в резервуаре выше отверстия, и расход вещества при истечении под давлением. Физические свойства веществ и материалов представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Физические свойства веществ и материалов

| Параметр                                                                    | Значение |
|-----------------------------------------------------------------------------|----------|
| Плотность сжиженного пропана $\rho_{\text{ж}}$ , кг/м <sup>3</sup>          | 480      |
| Теплота испарения жидкости $\Delta H$ , Дж/кг                               | 434200   |
| Температура кипения жидкости при атмосферном давлении $T_{\text{кип}}$ , °C | -42,05   |
| Молярная масса вещества $M$ , кг/кмоль                                      | 44       |
| Универсальная газовая постоянная $R_0$ , Дж/(кмоль·К)                       | 8310     |

Решение:

Объем жидкости в резервуаре равен

$$V_0 = \pi \cdot h^2 \cdot \left(R - \frac{1}{3} \cdot h\right),$$

где  $h_0$  – высота слоя жидкости в аппарате;  $R$  – радиус сферы.

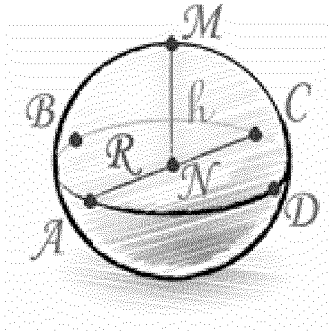


Рисунок 1.14. Сфера, рассеченная плоскостью

- до начала аварии  $V_0 = 3,14 \cdot 13^2 \cdot (16/2 - \frac{1}{3} \cdot 13) = 1946 \text{ м}^3$ ;

- ниже отверстия  $V_n = 3,14 \cdot 4^2 \cdot (16/2 - \frac{1}{3} \cdot 4) = 335 \text{ м}^3$ .

Объем жидкости, который потенциально может вытечь из емкости (находящийся выше места утечки)

$$V_{\text{ост}} = 1946 - 335 = 1611 \text{ м}^3.$$

Так как хранение сжиженного газа в резервуаре осуществляется под собственным давлением насыщенных паров, то принимаем давление в аппарате  $P_0$ , равное давлению насыщенных паров  $P_n$ .

Давление насыщенных паров сжиженного газа при температуре окружающей среды равной  $38^\circ\text{C}$  определяется по формуле (1.5)

$$P_n = 101325 \cdot \exp\left(\frac{434200 \cdot 44}{8310} \left(\frac{1}{(-42,05 + 273,15)} - \frac{1}{(38 + 273,15)}\right)\right) = 1309896 \text{ Па}.$$

Площадь сечения отверстия равно

$$S_{\text{сеч}} = \frac{3,14 \cdot 0,025^2}{4} = 0,0005 \text{ м}^2.$$

Поскольку давление в емкости в несколько раз превышает атмосферное, то расход определяется по зависимости (1.4)

$$G = 480 \cdot 0,61 \cdot 0,0005 \cdot \sqrt{2 \cdot (1309896 - 101325) / 480 + 2 \cdot 9,81 \cdot (13 - 4)} = 10,57 \text{ м}^3/\text{с}.$$

**Пример 1.3 Определить количество газа, поступившее через отверстие из сосуда под избыточным давлением (докритическое истечение)**

*Исходные данные:*

Определить массовый расход водорода при истечении из отверстия диаметром  $d_{\text{отв}}=5$  мм в результате повреждения емкости, работающей при давлении  $P_0=0,15$  МПа и температуре равной  $26^\circ\text{C}$ .

Физические свойства веществ и материалов представлены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Физические свойства веществ и материалов

| Параметр                                              | Значение |
|-------------------------------------------------------|----------|
| Молярная масса водорода $M$ , кг/кмоль                | 2        |
| Показатель адиабаты водорода $\gamma$                 | 1,41     |
| Универсальная газовая постоянная $R_0$ , Дж/(кмоль·К) | 8310     |

*Решение:*

Сначала определяем режим истечения газа. Давление внутри сосуда, при котором скорость истечения газа из него будет критической находится по уравнению (1.6)

$$\frac{P_a}{P_0} = \left( \frac{2}{1,41 + 1} \right)^{\frac{1,41}{1,41 - 1}} = 0,5266;$$

$$P_{\text{crit}} = 101325 / 0,5266 = 192413 \text{ Па} = 0,19 \text{ МПа}.$$

Поскольку давление водорода в аппарате в данном случае не превышает критическое ( $P_0 < P_{\text{crit}}$ ), то режим истечения газа является докритическим.

Площадь сечения отверстия

$$S_o = \frac{\pi \cdot d_{отв}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,005^2}{4} = 0,0000196 \text{ м}^2.$$

Плотность водорода по формуле

$$\rho_z = \frac{M}{22,4} \cdot \frac{273}{T} \cdot \frac{P_0}{P_a};$$
$$\rho_z = \frac{2}{22,4} \cdot \frac{273}{(273 + 26)} \cdot \frac{150000}{101325} = 0,12 \text{ кг/м}^3.$$

Расход газа определяется по формуле (1.13) и будет равен

$$G = 1,96 \cdot 10^{-5} \cdot 0,8 \cdot \left[ 150000 \cdot 0,12 \cdot \left( \frac{2 \cdot 1,41}{1,41 - 1} \right) \left( \frac{101325}{150000} \right)^{\frac{2}{1,41}} \left( 1 - \left( \frac{101325}{150000} \right)^{\frac{1,41 - 1}{1,41}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} = 0,0014 \text{ кг/с}.$$

**Пример 1.4 Определить количество газа, поступившее через отверстие из сосуда высокого давления (сверхкритическое истечение)**

*Исходные данные:*

Определить массовый расход газа при истечении из отверстия диаметром  $d_{отв}=50$  мм. В емкости находится аммиак под давлением  $P_0=1,4$  МПа и при температуре  $15^\circ\text{C}$ . Физические свойства веществ и материалов представлены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Физические свойства веществ и материалов

| Параметр                                              | Значение |
|-------------------------------------------------------|----------|
| Молярная масса аммиака $M$ , кг/кмоль                 | 17       |
| Показатель адиабаты аммиака $\gamma$                  | 1,313    |
| Универсальная газовая постоянная $R_0$ , Дж/(кмоль·К) | 8310     |

*Решение:*

Определим давление внутри сосуда, при котором скорость истечения

газа из него будет критической по уравнению (1.6)

$$\frac{P_a}{P_{crit}} = \left( \frac{2}{1,313+1} \right)^{\frac{1,313}{1,313-1}} = 0,544;$$

$$P_{crit} = 101325 / 0,544 = 186259 \text{ Па} = 0,18 \text{ МПа}.$$

Поскольку давление в аппарате превышает критическое ( $P_0 > P_{crit}$ ), то истечение газа будет сверхкритическим.

Площадь сечения отверстия  $S_o = \frac{3,14 \cdot 0,05^2}{4} = 0,00196 \text{ м}^2$ ; плотность

аммиака  $\rho_e = \frac{17}{22,4} \cdot \frac{273}{(273+15)} \cdot \frac{1400000}{101325} = 10,05 \text{ кг/м}^3$ .

Расход газа по формуле (1.14) будет равен

$$G = 0,00196 \cdot 0,8 \cdot \left[ 1400000 \cdot 10,05 \cdot 1,313 \cdot \left( \frac{2}{1,313+1} \right)^{\frac{1,313+1}{1,313-1}} \right]^{\frac{1}{2}} = 3,944 \text{ кг/с}.$$

**Пример 1.5 Определить количество вещества, поступившее из резервуара под давлением (сжиженный газ)**

*Исходные данные:*

На объекте хранения опасного вещества имеется горизонтальный цилиндрический резервуар с геометрическим объемом  $V=100 \text{ м}^3$  и диаметром  $D=3000 \text{ мм}$ , который на 80% (коэффициент заполнения емкости  $\alpha=0,8$ ) заполнен сжиженным аммиаком под давлением. Аммиак в емкости имеет температуру окружающей среды  $+30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Определить:

а) массу газовой фазы опасного вещества в емкости;

б) массу жидкого аммиака в емкости;

в) расход опасного вещества при аварийной разгерметизации, в частности при разрушении трубопровода диаметром 100 мм, выходящего из нижней части емкости на все сечение. Длина участка трубопровода от

резервуара до отверстия разгерметизации равна 10м.

Физические свойства веществ и материалов представлены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Физические свойства веществ и материалов

| Параметр                                                               | Значение |
|------------------------------------------------------------------------|----------|
| Молярная масса $M$ , кг/кмоль                                          | 17       |
| Универсальная газовая постоянная $R_0$ , Дж/(кмоль·К)                  | 8310     |
| Плотность жидкой фазы аммиака $\rho_{ж}$ , кг/м <sup>3</sup>           | 681      |
| Теплота испарения аммиака $\Delta H$ , Дж/кг                           | 1370000  |
| Температура кипения аммиака при атмосферном давлении<br>$T_{кип}$ , °С | -33,4    |
| Теплоемкость жидкого опасного вещества $C_{p,ж}$ , Дж/кг/К             | 4750     |

*Решение:*

Высоту столба жидкости опасного вещества в оборудовании над уровнем отверстия можно определить исходя из коэффициента заполнения горизонтального аппарата  $H = \alpha \cdot D = 0,8 \cdot 3 = 2,4$  м, а площадь аварийного отверстия в рассматриваемом случае определяется из диаметра трубопровода и составляет  $S = \pi \cdot d_{тр}^2 / 4 = 3,14 \cdot 0,1^2 / 4 = 0,00785$  м<sup>2</sup>.

По коэффициенту заполнения, объёму ёмкости и плотности жидкого аммиака определяем массу жидкости в емкости

$$m_{ж} = \alpha \cdot V \cdot \rho_{ж} ; \quad (1.30)$$

$$m_{ж} = 0,8 \cdot 100 \cdot 681 = 54480 \text{ кг} .$$

Давление насыщенных паров аммиака при температуре окружающей среды равной 30°С определяется по формуле (1.5)

$$P_{н} = 101325 \cdot \exp \left( \frac{1370000 \cdot 17}{8310} \left( \frac{1}{(-33,34 + 273,15)} - \frac{1}{(30 + 273,15)} \right) \right) = 1168087 \text{ Па} .$$

Плотность газообразного аммиака

$$\rho_z = \frac{17}{22,4} \cdot \frac{273}{(273 + 30)} \cdot \frac{1168087}{101325} = 7,9 \text{ кг/м}^3.$$

Тогда масса газовой фазы в емкости до разгерметизации будет равна произведению незанятого жидкостью объема аппарата на плотность газовой фазы

$$m_T = (1 - \alpha) \cdot V \cdot \rho_T; \quad (1.31)$$
$$m_T = (1 - 0,8) \cdot 100 \cdot 7,9 = 158 \text{ кг}.$$

В случае, если истечение происходит из трубопровода на входе которого стоит емкость (при условии, что величина поперечного сечения отверстия превосходит 0,25 от площади трубопровода), либо истечение происходит непосредственно из емкости, то расход определяется по формуле (1.20).

При длине участка трубопровода длиной 10 м и диаметре 100 мм, в уравнении (1.20) функция  $K$  (согласно формуле 1.21) равна 1,33. Поскольку давление в аппарате принимаем равным давлению насыщенных паров опасного вещества, второе слагаемое в подкоренном выражении (1.20) будет равно нулю.

Таким образом, расход опасного вещества равен

$$G = 0,6 \cdot 0,00785 \cdot \sqrt{2 \cdot 2,4 \cdot 9,81 \cdot 681^2 + \frac{1}{1,33} \cdot \frac{1370000^2 \cdot 7,9^2}{4750 \cdot (-33,4 + 273)}} = 47 \text{ кг/с}.$$

## **ГЛАВА 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ИСПАРЕНИИ ПРОЛИВА СТАБИЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ**

### **2.1 Основные закономерности парообразования при аварийных выбросах**

При аварийных выбросах жидкости ее испарение сильно зависит от условий, в которых содержится вещество в технологической системе.

Для оценки зон действия поражающих факторов (ударной волны при взрыве, теплового излучения при пожаре пролива и огненном шаре, высоких концентраций токсичных веществ и т.д.) необходимо определить количество опасного вещества, участвующего в аварии. Источником поступления опасного вещества в окружающую среду является процесс перехода его в газообразное состояние вследствие парообразования.

На сегодня нашли широкое распространение эмпирические корреляции, которые описывают процесс парообразования довольно схематично, не позволяя учитывать ряд факторов и явлений. Данные зависимости представлены в усредненной форме без учета механизма образования паровой фазы по стадиям и времени протекания процесса. Процесс парообразования имеет место при кипении и испарении жидкости.

Кипение – процесс активного парообразования во всем объеме жидкости, который сопровождается образованием и ростом пузырьков внутри жидкости. Парообразование происходит при температуре кипения жидкости. Поэтому этот процесс требует постоянного притока тепла.

Испарение – это также процесс парообразования, но с поверхности жидкости, и заключается в вылетании молекул, кинетическая энергия которых превышает потенциальную энергию их связей с остальными молекулами жидкости. Процесс протекает при любой температуре жидкости и не требует притока тепла.

## 2.2 Физико-химические особенности процесса испарения с поверхности аварийного пролива

Если температура жидкости ниже температуры кипения при атмосферном давлении, то парообразование из пролива будет происходить вследствие испарения.

Молекулы жидкости совершают тепловые колебания около некоторых положений равновесия. Далеко не каждая молекула, даже находясь у поверхности, может вырваться на свободу. Здесь потенциальная энергия взаимодействия молекул превосходит по модулю кинетическую энергию хаотического теплового движения. Кроме того, потенциальная связь молекул в жидкости меньше ее потенциальной энергии в паровой фазе на теплоту  $\Delta H$  испарения, равную, для одной молекулы  $E_p = M \cdot \Delta H / N_A$ , где  $N_A$  – число Авогадро.

Величина средней кинетической энергии теплового движения  $E_k \approx k \cdot T$  оказывается значительно меньше  $E_p$ . Здесь  $k$  – константа Больцмана, а  $T$  – абсолютная температура поверхностного слоя жидкости. И все же согласно закону молекулярной физики в жидкости всегда найдутся высокоэнергетические молекулы, способные вырваться за пределы жидкости. Их число в единице объема определяется выражением  $n = n_0^{M \cdot \Delta H / R_0 T}$ , где  $R_0 = k \cdot N_A$  – универсальная газовая постоянная.

Для выяснения физической сущности процесса испарения будем считать высокоэнергетические молекулы пара как некоторый идеальный газ. Когда пар и жидкость находятся в подвижном равновесии, то с единицы поверхности жидкости в единицу времени вылетает число молекул  $Z = n_q \cdot v$ . Опираясь на молекулярно-кинетическую теорию, скорость теплового движения молекул, покидающих жидкость, составит  $v = \sqrt{R_0 \cdot T / M}$ , а концентрация молекул в насыщенном слое  $n_q = P_n / k \cdot T$ . Подставляя все

необходимые величины и с учетом массы одной молекулы, равной  $M/N_A$ , зависимость массовой скорости испарения и конденсации приобретает вид

$$W = P_n \cdot \sqrt{\frac{M}{R_0 \cdot T}} \quad (2.1)$$

Согласно уравнению (2.1) интенсивность процесса испарения зависит от молярной массы вещества  $M$ , упругости насыщенного пара  $P_n$  при температуре  $T_{\text{ж}}$  жидкости. Влияние температуры жидкости на процесс здесь превалирует через изменение  $P_n$  паров, так как этот параметр с повышением температуры жидкости возрастает быстрее по экспоненте, чем знаменатель из корня квадратного из той же температуры.

Скорость данного процесса чрезвычайно велика, однако поступление молекул пара в атмосферу протекает довольно медленно, так как здесь начинают работать законы диффузии.

В неподвижном воздушном пространстве часть молекул, покинувших жидкость, будет непрерывно переходить за счет молекулярной диффузии в более высокие слои с низкой концентрацией, освобождая место для вылетающих молекул.

Молекулярная диффузия, вызванная хаотическими колебаниями теплового движения молекул, является весьма медленным процессом. При этом коэффициент диффузии имеет значение для газов от  $2 \cdot 10^{-5}$  до  $1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

Подвижное равновесие в двухфазной системе жидкость-пар легко нарушается при снижении парциального давления пара над жидкостью. Следовательно, в процессе парообразования большую роль играет подвижность воздушной среды.

Как известно из гидродинамики при турбулентном движении воздушного потока у зеркала жидкости образуется пограничный слой высотой  $\delta$  и ядро – основная масса. Структура воздушного потока и схема распределения парциальных давлений паров над жидкостью, согласно модели Ландау и Левича, показаны на рисунок 2.1.

В пограничном ламинарном слое происходит постепенное затухание турбулентности и соответственно возрастание парциального давления пара жидкости. Непосредственно у поверхности раздела фаз, в так называемом диффузионном подслое  $\delta_g$ , где отсутствует перемешивание турбулентными пульсациями, перенос вещества осуществляется молекулярной диффузией.

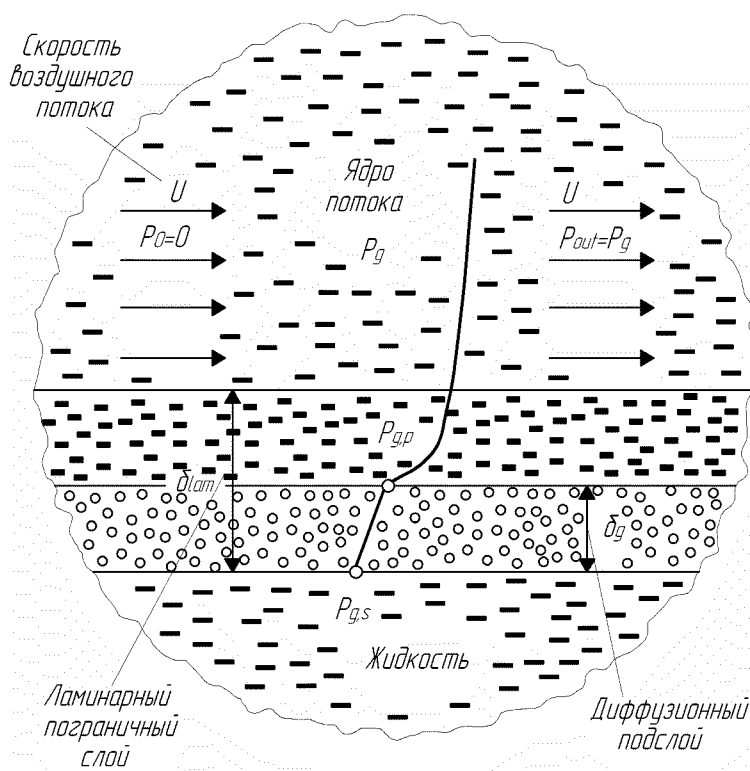


Рисунок 2.1. Структура воздушного потока и распределение парциального давления пара жидкости в газовой фазе

В ядре вещество переносится преимущественно турбулентными пульсациями и парциальное давление паров жидкости, как показано на рисунке 2.1 практически постоянно  $P_{g,0}$ . Экспериментальные данные указывают, что коэффициент турбулентной диффузии в сотни раз превосходит коэффициент молекулярной диффузии в газе.

Таким образом, отвод молекул, покидающих жидкость, осуществляется как за счет диффузии в подслое  $\delta_g$ , так и конвекцией в ядре воздушного потока. Следовательно, скорость парообразования определяется

лимитирующей стадией процесса массопереноса, т.е. в данном случае молекулярной диффузией. При повышении скорости воздуха толщина диффузионного подслоя уменьшается, и скорость испарения увеличивается.

В нормативных документах для оценки величины диффузионного подслоя  $\delta_g$  используются эмпирические зависимости.

Скорость испарения (парообразования) зависит и от размера пролива  $L$  жидкости, которая незначительно уменьшается с увеличением размера  $L$  жидкости, которая незначительно уменьшается с увеличением размера пролива в направлении движения воздушного потока. Во время прохождения атмосферного воздуха над зеркалом жидкости содержание паров испаряющейся жидкости в нем возрастает от  $P_g=0$  в набегающем потоке до  $P_{g,out}$  в уходящем воздушном потоке (см. рисунок 2.1). Это обуславливает уменьшение движущей силы процесса отвода паров жидкости по ходу воздушного потока, то есть длине пролива.

Схема развития пограничного слоя над плоской поверхностью (поверхностью пролива) показана на рисунке 2.2.

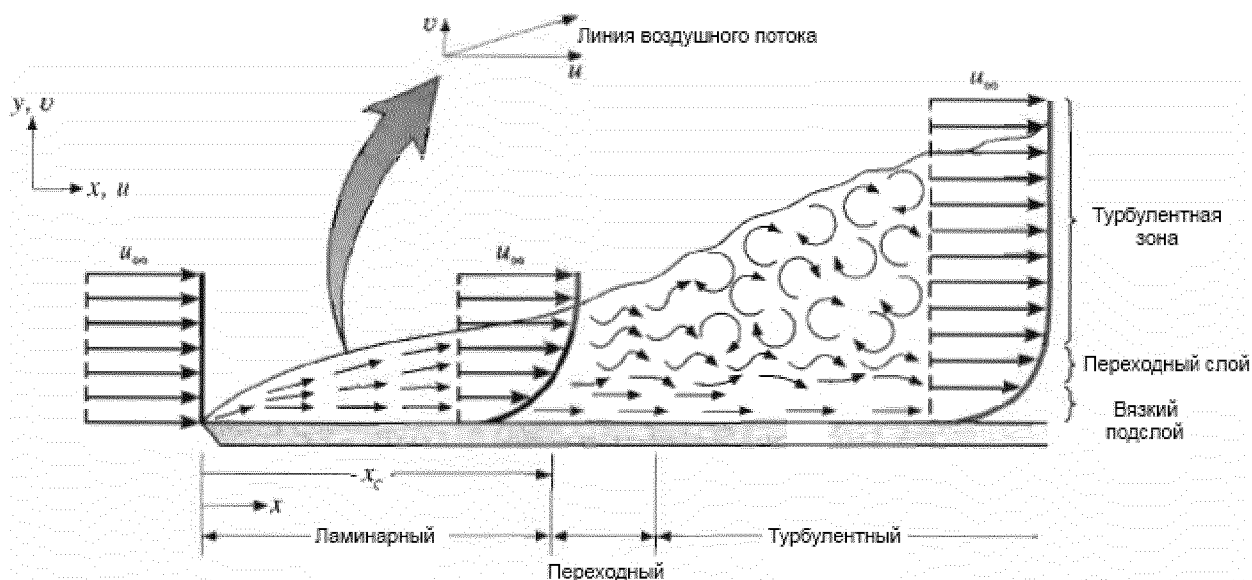


Рисунок 2.2. Развитие профиля скорости в пограничном слое над плоской поверхностью

Переход от ламинарного режима течения потока к турбулентному обусловлен взаимодействием нестационарных течений, которые развиваются естественным образом внутри жидкости, или малых возмущений, которые существуют во многих типичных пограничных слоях. Эти возмущения могут возникать в результате колебаний в свободном потоке, или они могут быть вызваны шероховатостью поверхности или мельчайшими колебаниями поверхности. Наступление турбулентности зависит от того, усиливается или ослабляется влияние вышеназванных механизмов в направлении потока жидкости или газа, которые, в свою очередь, зависят от группы критериев называемой числом Рейнольдса,  $Re_x = \frac{\rho \cdot u_\infty \cdot x}{\mu}$ , где  $x$  – характерная длина (для плоской пластины – это расстояние от передней кромки). При расчете поведения пограничного слоя, можно предположить, что переход начинается в некотором месте  $x_c$ , как показано на рисунке 2.2. Это место определяется критическим числом Рейнольдса  $Re_{x,c}$ . Характерное значение, равное  $Re_x = 5 \times 10^5$  часто используется для расчетов пограничного слоя.

В зависимости от интенсивности турбулентности в основном потоке, поток вблизи поверхности становится турбулентным на некотором расстоянии вниз по течению. Точка перехода от ламинарного к турбулентному пограничного слоя может быть оценена с точки зрения «длины Числа Рейнольдса»,  $Re_L = UL\nu^l$ , где  $U$  – средняя скорость потока (м/с),  $L$  – длина пролива в направлении воздушного потока (м) а  $\nu$  – кинематическая вязкость воздуха. Для «длины числа Рейнольдса» критическое значение часто принимается равным  $5 \times 10^5$ . Для вынужденной конвекции в ламинарном режиме ( $Re_L < 5 \times 10^5$ ) параллельно прямоугольной поверхности испарения, среднее значение числа Нуссельта по длине пластины определяется по формуле

$$\overline{Nu} = 0.664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}. \quad (2.3)$$

А для турбулентного течения ( $Re_L \geq 5 \times 10^5$ ) над проливом, среднее

значение числа Нуссельта равно

$$\overline{Nu} = 0.0366 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{1/3}, \quad (2.4)$$

где  $Nu$  – число Нуссельта;  $Re$  – число Рейнольдса;  $Pr = \mu / (\rho \cdot D)$  – число Прандтля для воздуха.

Для решения этих уравнений предполагается, что интенсивность испарения достаточно низка, что позволяет принимать свойства паров жидкости равными соответствующим свойствам воздуха. Таким образом, при построении профиля скорости ветра пренебрегают различием плотности паров и воздуха. Однако, данное предположение не корректно, если речь идет о среде более плотной, чем воздух.

### 2.3 Расчет интенсивности испарения стабильной жидкости

Испарение с поверхности аварийного разлива, обусловленное диффузионными процессами и теплоподводом от окружающей среды, определяется по эмпирическому выражению

$$W = 10^{-6} \eta \sqrt{M P_n}, \quad (2.5)$$

где  $\eta$  – коэффициент, принимаемый по табл. 2.1 в зависимости от скорости и температуры воздушного потока над поверхностью испарения;  $P_n$  – давление насыщенного пара при расчетной температуре жидкости;  $M$  – молярная масса паров жидкости, кг/кмоль. Масса испарившейся жидкости по зеркалу испарения

$$G_{\text{исп}} = W \cdot F_{\text{ж}} \cdot \tau_{\text{и}}, \quad (2.6)$$

где  $F_{\text{ж}}$  – площадь поверхности зеркала испарения жидкости,  $\text{м}^2$ ;  $\tau_{\text{и}}$  – время испарения жидкости, с.

При проливе на неограниченную поверхность площадь пролива  $F_{\text{ж}}$  ( $\text{м}^2$ ) жидкости определяется по формуле

$$F_{\text{жс}} = f_p \cdot \alpha \cdot V, \quad (2.7)$$

где  $f_p$  – коэффициент разлития ( $\text{м}^{-1}$ ) (при отсутствии данных допускается принимать равным  $5 \text{ м}^{-1}$  при проливе на неспланированную грунтовую поверхность,  $20 \text{ м}^{-1}$  при проливе на спланированное грунтовое покрытие,  $150 \text{ м}^{-1}$  при проливе на бетонное или асфальтовое покрытие);  $\alpha$  – коэффициент заполнения емкости,  $V$  – объем жидкости, поступившей в окружающее пространство при разгерметизации резервуара,  $\text{м}^3$ . В случае наличия обвалования площадь пролива ограничивается его периметром.

Таблица 2.1

Значения коэффициента  $\eta$  от температуры воздуха и скорости ветра

| Скорость<br>воздушного потока<br>над зеркалом<br>испарения, м/с | Значения коэффициента $\eta$ при температуре<br>воздуха $t_{\text{о.с.}}$ |     |     |     |     |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                                                                 | 10                                                                        | 15  | 20  | 30  | 35  |
| 0                                                               | 1,0                                                                       | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 0,1                                                             | 3,0                                                                       | 2,6 | 2,4 | 1,8 | 1,6 |
| 0,2                                                             | 4,6                                                                       | 3,8 | 3,5 | 2,4 | 2,3 |
| 0,5                                                             | 6,6                                                                       | 5,7 | 5,4 | 3,6 | 3,2 |
| 1,0                                                             | 10,0                                                                      | 8,7 | 7,7 | 5,6 | 4,6 |

Если подставить уравнение (2.5) в уравнение (2.6), то количество паров поступивших вследствие испарения пролива можно определить по следующему выражению

$$G_{\text{исп}} = 10^{-6} \cdot \eta \cdot P_{\text{н}} \cdot \sqrt{M} \cdot F_{\text{ж}} \cdot \tau_{\text{исп}}. \quad (2.8)$$

Давление насыщенных паров  $P_{\text{н}}$  для однокомпонентных жидкостей может определяться по формуле

$$P_{\text{н}} = P_a \exp\left(\frac{\Delta H \cdot M}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{кип}}} - \frac{1}{T_0}\right)\right), \quad (2.9)$$

где  $P_a$  – атмосферное давление, Па;  $R$  – универсальная газовая постоянная:  $R=8310 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{кмоль})$ ;  $T_{\text{кип}}$  – температура кипения жидкости при атмосферном давлении, К;  $T_0$  – абсолютная температура жидкой фазы, К;  $\Delta H$  – удельная теплота испарения жидкости при температуре  $T$ , Дж/кг.

В отечественных нормативных документах для количественной оценки массы испарившейся жидкости используются различные варианты уравнения (2.5). В утвержденной приказом Ростехнадзора от 20.04.2015 № 158 «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ» интенсивность испарения определяется по формуле

$$W = \sqrt{M} \cdot 10^{-6} (5.38 + 4.1U) \cdot P_n, \quad (2.10)$$

где  $U$  – скорость воздушного потока на высоте 10 м, м/с;  $P_n(T_{\text{ж}})$  – давление насыщенных паров жидкости при температуре  $T_{\text{ж}}$ , мм.рт.ст.

В зарубежных методиках оценки опасности промышленных объектов при расчете испарения разлившейся жидкости применяется эмпирический подход, основанный на использовании следующих выражений:

$$\frac{dm_{\text{жс}}}{dt} = - \frac{k_g \cdot M \cdot P_n}{R_0 T_{\text{жс}}}, \quad (2.11)$$

где коэффициент массотдачи  $k_g$  рассчитывается по формуле

$$k_g = 0,0048 \cdot U^{0,78} \cdot d^{-0,11} \cdot Sc^{-0,67}. \quad (2.12)$$

Уравнения (2.5), (2.10), (2.11) и (2.12) не позволяют учитывать при расчете зон распространения опасных веществ нестационарность поступления вещества из пролива вследствие изменения температуры и состава жидкой фазы.

Приведенные эмпирические зависимости не учитывают также влияние на процесс испарения следующих факторов и явлений:

- изменение движущей силы процесса испарения, связанное с нестационарностью поступления вещества или аккумулярованием испаряющегося компонента над проливом;
- стефановский поток (см. раздел 2.4)
- изменение турбулентной структуры потока над зеркалом разлива в случае, когда испаряющийся компонент имеет молекулярную массу  $M$ , отличающуюся от молекулярной массы окружающего воздуха  $M_a$ . При  $M <$

$M_a$  в некоторый момент времени может возникнуть плотностная конвекция, ускоряющая процесс испарения, при  $M > M_a$  может наблюдаться явление устойчивой стратификации, сопровождающееся подавлением турбулентности и снижением скорости потока паровоздушной смеси над зеркалом разлива;

- степень устойчивости атмосферы (распределение температуры воздуха по высоте);
- локальные особенности местонахождения пролива, связанные с наличием застройки, сооружений, перепада высот подстилающей поверхности.

Для учета изменения температуры жидкости следует решать уравнение теплового баланса:

$$\frac{dT_{ж}}{dt} = \frac{q_a + q_{под} + q_c - q_{ип} + q_{иа} - W \cdot \Delta H}{C_{P,ж} \cdot m_{ж}}, \quad (2.13)$$

где  $q_a$  – тепловой поток из атмосферы, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{под}$  – поток тепла от грунта к жидкости, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_c$  — поток тепла от солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{ип}$  – тепловой поток, излучаемый поверхностью пролива, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{иа}$  – тепловой поток к проливу вследствие излучения атмосферы, Вт/м<sup>2</sup>;  $W$  – массовый поток пара при диффузионном испарении, кг/(м<sup>2</sup>·с).

В инженерных методиках тепловой поток от грунта к жидкости рассчитывается из уравнения

$$q_{под} = (T_a - T_{ж}) \frac{\sqrt{\lambda_{под} \cdot C_{P,под} \cdot \rho_{под}}}{\sqrt{\pi \cdot \tau}}. \quad (2.14)$$

Тепловой поток, подводимый от грунта к жидкой фазе,  $q_{под} = \lambda_{под}(\partial T_{под}/\partial y)_{y=0}$  может быть определен из численного решения трехмерного нестационарного уравнения теплопроводности для твердого подстилающего слоя

$$C_{P,под} \rho_{под} \frac{\partial T_{под}}{\partial t} = \lambda_{под} \left( \frac{\partial^2 T_{под}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{под}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{под}}{\partial z^2} \right). \quad (2.15)$$

Граничные условия для уравнения (2.15) задавались следующие: на твердой поверхности, прилегающей к разлитию  $T_{\text{под}}(x,0,z)=T_{\text{ж}}$ , на нижней и боковых границах подстилающего слоя  $\partial T_{\text{под}}/\partial n=0$ , где  $n$  – нормаль к поверхности, ограничивающей расчетную область.

Схема теплообмена пролива приведена на рисунок 2.3.

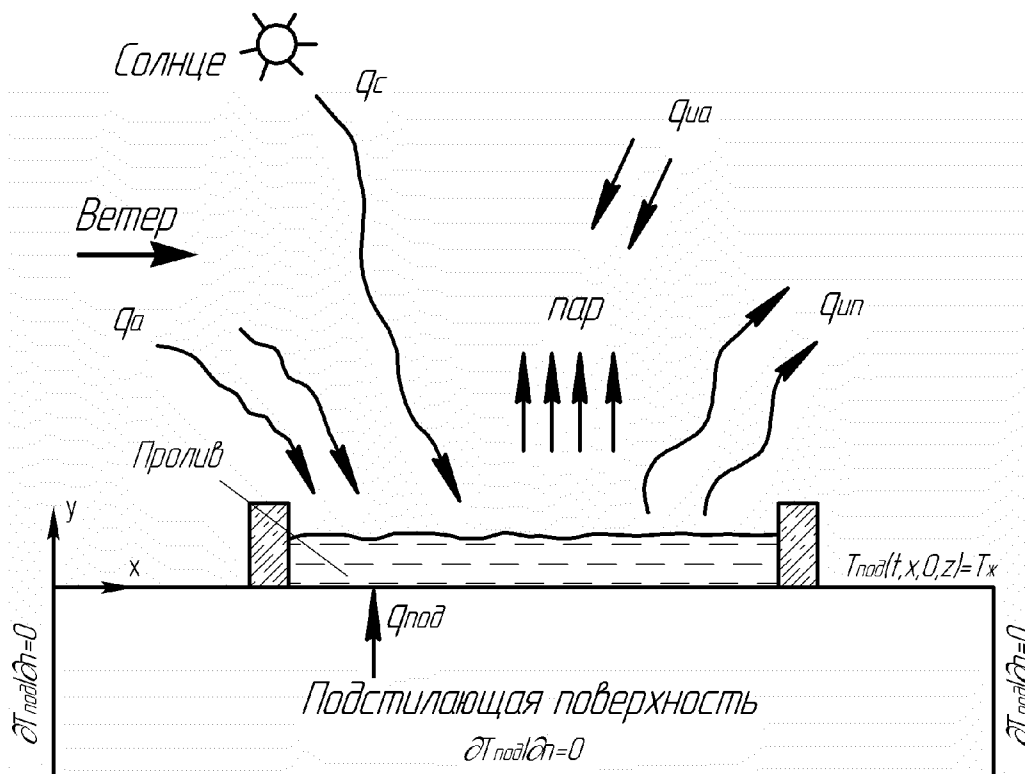


Рисунок 2.3. Схема теплообмена пролива жидкости с окружающей средой

Тепловой поток от воздушного потока к проливу  $q_a$  определяется из выражения

$$q_a = \beta_a (T_a - T_{\text{ж}}), \quad (2.16)$$

где  $\beta_a$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>К);  $T_a$  – температура окружающей среды, К.

Коэффициент теплоотдачи  $\beta_a$  определяется в зависимости от режима течения над проливом (см. рисунок 2.2).

Распределение температур в начальный момент времени в подстилающем слое

$$T_{\text{под}}(0, x, y, z) = T_a. \quad (2.17)$$

Тепловой поток от солнца с учетом отражения от зеркала пролива может определяться по формуле

$$q_c = 1110 \cdot (1 - 0,0071 \cdot \omega^2) \cdot (\sin \varphi - 0,1). \quad (2.18)$$

Зависимость  $\varphi$  от временных параметров, т.е. от времени года и суток, а также от широты местности имеет вид

$$\sin \varphi = \sin \varphi_1 \cdot \sin \vartheta - \cos \varphi_1 \cdot \cos \vartheta \cdot \cos(\pi \cdot \tau / 12); \quad (2.19)$$

$$\varphi_1 = 23.5 \cdot (1 - |n - 6|/3),$$

где  $\varphi$  – высота солнцестояния, угловые градусы;  $\tau$  – текущее время суток, ч;  $\omega$  — коэффициент облачности, изменяющийся от 0 до 10 (для безоблачного неба  $\omega=0$ );  $\vartheta$  – широта местности, угловые градусы;  $n$  – номер месяца года:  $i$  – январь и т.д.;  $\tau$  – текущее время суток, ч.

Для широты Москвы ( $\vartheta=55,75^\circ$ ) находим, что в июне максимум  $q_s$  (т.е. в полдень при безоблачном небе) равен  $635 \text{ Вт/м}^2$ .

Потери тепла вследствие длинноволнового излучения поверхности пролива

$$q_{\text{ип}} = e \cdot \sigma_{\text{эс}} \cdot T_{\text{эс}}^4, \quad (2.20)$$

где  $\sigma$  – константа Стефана-Больцмана.

Теплоприток к проливу вследствие длинноволнового излучения атмосферы

$$q_{\text{иа}} = (1 - r) \cdot f \cdot \sigma \cdot T_a^4. \quad (2.21)$$

Здесь  $r$  – коэффициент отражения жидкостью длинноволнового излучения;  $f$  – коэффициент атмосферного излучения.

## 2.4 Стефановский поток

Интенсивность испарения высоколетучих жидкостей в значительной степени зависит от влияния стефановского потока. Стефановский поток –

это конвективный поток парогазовой смеси, индуцируемый диффузионным потоком компонентов при непроницаемой поверхности раздела фаз, и направленный от поверхности жидкости в парогазовую среду.

Причина этого течения заключается в том, что для сохранения постоянства полного давления в среде наряду с градиентом парциального давления должен существовать равный и противоположно направленный градиент парциального давления остальных компонентов газовой среды. Вследствие наличия второго градиента газ диффундирует к поверхности жидкости, но ввиду непроницаемости последней полный поток газа к ней должен равняться нулю. Отсюда следует существование гидродинамического потока среды, компенсирующего диффузию газа. Стефановское течение можно наблюдать непосредственно, так как в результате его проявления мелкие аэрозольные частицы отталкиваются испаряющимися и притягиваются растущими капельками.

Рассмотрим сущность явления стефановского потока на примере испарения однокомпонентной жидкости со свободной поверхности из открытого контейнера (рисунок 2.4).

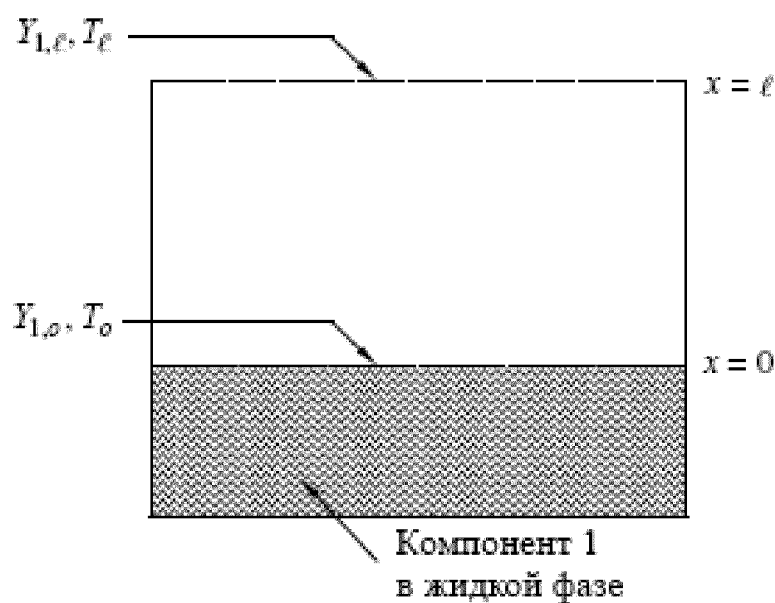


Рисунок 2.4. Схема испарения из одномерной камеры

Обозначим испаряющийся компонент индексом  $i$ . Задача – определить поток испаряющейся массы  $f=(\rho u)_s$ .

Из уравнения неразрывности  $d(\rho u)/dy=0$  имеем

$$\rho u = f = \text{const.}$$

Из этого условия следует, что величина конвективного потока не изменяется по вертикали и, таким образом, определяет поток испаряющейся массы:

$$f \frac{dY_i}{dy} - \frac{d}{dy} \left( \rho D \frac{dY_i}{dy} \right) = 0. \quad (2.22)$$

Так как рассматривается двухкомпонентная система, задан один коэффициент бинарной диффузии  $D_i = D$ .

Интегрируя уравнение (2.22), получим

$$fY_i - \rho D \frac{dY_i}{dy} = f_i, \quad (2.23)$$

где константа интегрирования не что иное, как постоянный массовый поток компонента  $i$ ,  $f_i$ , который представляет собой сумму конвективного и диффузионного потоков. Так как компонент 2 принят неконденсируемым, его чистый массовый поток равен нулю  $f_2=0$ . Таким образом

$$fY_2 - \rho D \frac{dY_2}{dy} = 0 \quad (2.24)$$

Подставляя соотношение  $Y_2=1-Y_1$  в уравнение (2.24), получим выражение

$$fY_1 - \rho D \frac{dY_1}{dy} = f = f_1, \quad (2.25)$$

которое показывает, что общий массовый поток системы – это поток компонента 1.

Интегрируя уравнение (2.22), принимая, что  $\rho D = \text{const}$ , и используя граничные условия  $Y_1(0)=Y_{1,s}$  и  $Y_1(1)=Y_{1,L}$ , получим

$$f = \frac{\rho D}{y_P} \ln \left( \frac{1 - Y_{1,L}}{1 - Y_{1,s}} \right). \quad (2.26)$$

Таким образом, отношение полного массового потока к чисто диффузионному равно

$$\beta = \frac{\ln \left( \frac{1 - Y_{1,L}}{1 - Y_{1,s}} \right)}{Y_{1,s} - Y_{1,L}}. \quad (2.27)$$

## 2.5 Испарение растворов и смесей

Процесс испарения смесей и растворов протекает значительно сложнее химически однородных жидкостей, так как в первую очередь испаряются легколетучие компоненты. Поскольку с течением времени в жидкой фазе происходит увеличение содержания высококипящих компонентов, то предположение о неизменном составе смеси или раствора может привести к завышенным оценкам количества опасного вещества, испаряющегося из пролива.

На практике для расчета испарения нефти или нефтепродуктов жидкость представляется дискретной смесью, состоящей из фиксированного числа условных компонентов (псевдокомпонентов), каждый из которых соответствует узкой фракции на кривой истинных температур кипения (ИТК). При этом для расчета интенсивности испарения фракции нефти или нефтепродукта с поверхности пролива может использоваться выражение

$$\frac{dm_{\text{ж}i}}{d\tau} = -10^{-6} \cdot \eta \cdot \sqrt{M_i} \cdot P_i(T_{\text{ж}}) \cdot X_i, \quad (2.28)$$

где  $X_i$  – мольная доля компонента в жидкой фазе;  $m_{\text{ж}i}$  – масса компонента жидкости, отнесенная к единице поверхности пролива, кг/м<sup>2</sup>;  $P_i(T_{\text{ж}})$  – давление насыщенных паров компонента  $i$  при расчетной температуре жидкости  $T_{\text{ж}}$ .

В зарубежной практике для расчета интенсивности испарения фракции нефти или нефтепродукта с поверхности пролива используется выражение

$$\frac{dm_{\text{ж}i}}{d\tau} = - \frac{k_i \cdot M_i \cdot P_i(T_{\text{ж}})}{R_0 T_{\text{ж}}} X_i, \quad (2.29)$$

где коэффициент массотдачи  $k_i$  рассчитывается по формуле

$$k_i = 0,00482 \cdot U^{0,78} \cdot d^{-0,11} \cdot Sc_i^{-0,67}. \quad (2.30)$$

Для определения молекулярной массы псевдокомпонента может использоваться формула Войнова:

$$M_i = 60 + 0,3 \cdot T_{\text{кип},i} + 0,001 \cdot T_{\text{кип},i}^2, \quad (2.31)$$

где  $T_{\text{кип},i}$  – средняя температура кипения  $i$ -ой фракции, °С.

Для определения давления насыщенных паров псевдокомпонента может использоваться формула Ашворта:

$$\begin{aligned} \lg(P_n - 3158) &= 7.6715 - 2.68 \cdot A/B, \\ A &= 1250 / \left[ \left( \sqrt{T_{\text{ж}}^2 + 108000} - 307.6 \right) - 1 \right], \\ B &= 1250 / \left[ \left( \sqrt{T_{\text{кип}}^2 + 108000} - 307.6 \right) - 1 \right] \end{aligned} \quad (2.32)$$

где  $T_{\text{ж}}$  – температура жидкости, для которой определяется упругость паров  $P_n$ , К;  $T_{\text{кип}}$  – нормальная температура кипения, К.

В формулах (2.28) и (2.29) парциальное давление компонента  $p_i$  определяется из закона Рауля  $p_i = P_i(T_{\text{ж}}) \cdot X_i$ , из предположения об идеальности смеси углеводородов. В случае испарения неидеальных растворов, таких как водный раствор аммиака, соляная кислота и т.д., необходимо вместо закона Рауля использовать соответствующую функцию парциального давления испаряющегося компонента  $p_i(X_i, T_{\text{ж}})$  или табличные данные о состоянии равновесия между жидкостью и её паром.

Необходимо отметить, что в уравнениях (2.28) и (2.29) используется допущение об идеальном перемешивании в слое жидкости, однако, такой подход может привести к завышенным оценкам интенсивности испарения для многокомпонентных жидкостей. Использование консервативных оценок

является обычной практикой при анализе риска, однако завышенная оценка опасности аварий может привести к неоправданным затратам на их локализацию и ликвидацию. При использовании допущения об идеальном перемешивании, интенсивность испарения ограничивается отводом паров от поверхности пролива в газовую фазу. Испарение легколетучих компонентов из многокомпонентной жидкости может вызвать появление концентрационных градиентов в слое жидкости, и, следовательно, лимитирующим может стать процесс массопереноса компонентов в жидкой фазе.

## 2.6 Примеры по Главе 2

***Пример 2.1*** *Рассчитать массу опасного вещества, поступившего в атмосферу в результате испарения при аварийном разливе стабильной жидкости в резервуарном парке*

*Исходные данные:*

В резервуарном парке хранения гексана произошла разгерметизация емкости объемом  $200\text{ м}^3$ , находящейся в бетонном обваловании размером  $30\text{ м} \times 30\text{ м}$  при температуре  $35^\circ\text{C}$ . Коэффициент заполнения емкости  $\alpha=0,8$ . Скорость воздушного потока над зеркалом испарения принять равной  $0,5\text{ м/с}$ .

Определить массу паров опасного вещества, поступившего в атмосферу в результате испарения с поверхности разлива, за время  $3600\text{ сек}$ .

Физические свойства веществ и материалов представлены в табл. 2.2.

*Решение:*

При проливе на неограниченную бетонную поверхность площадь пролива ( $F_{\text{ж}}$ ) жидкости определяется по формуле (2.7)

$$F_{\text{жс}} = 150 \cdot 0,8 \cdot 200 = 24000\text{ м}^2.$$

Таблица 2.2

## Физические свойства веществ и материалов

| Параметр                                                  | Значение |
|-----------------------------------------------------------|----------|
| Теплота испарения жидкости $\Delta H$ , Дж/кг             | 360500   |
| Температура кипения жидкости при атмосферном давлении, °С | 68       |
| Молярная масса $M$ , кг/кмоль                             | 86,18    |
| Универсальная газовая постоянная $R$ , Дж/(кмоль·К)       | 8310     |

Поскольку площадь пролива на неограниченной поверхности больше площади, ограниченной обвалованием, то окончательно  $F_{\text{ж}}=900\text{м}^2$ . По табл. 2.1 в зависимости от скорости и температуры воздушного потока над зеркалом пролива определяются значения коэффициента  $\eta$ . Принимаем  $\eta=1$ .

Количество паров, поступивших в окружающую среду вследствие испарения из пролива, определяется по формуле (2.8)

$$G_{\text{исп}} = 10^{-6} \cdot 1 \cdot 31,3 \cdot \sqrt{86,18 \cdot 900 \cdot 3600} = 94 \text{ кг},$$

где  $P_{\text{н}}$  – давление насыщенного пара при расчетной температуре  $T_{\text{а}}$  (кПа), определяемое по выражению (2.9)

$$P_{\text{н(расч)}} = 101,325 \cdot \exp\left(\frac{360500 \cdot 86,18}{8310} \cdot \left[\frac{1}{341} - \frac{1}{308}\right]\right) = 31,3 \text{ кПа},$$

где  $P_{\text{а}}$  – атмосферное давление (101,325кПа).

**Задача 2.2 Рассчитать массу опасного вещества, поступившего в атмосферу в результате испарения при аварийном разливе стабильной жидкости на открытой площадке**

*Исходные данные:*

В результате нарушений правил эксплуатации резервуара нефти произошла аварийная разгерметизация резервуара, и истечение  $2000\text{м}^3$  ЛВЖ

на грунтовую поверхность без обвалования при температуре 35°C. Коэффициент заполнения емкости  $\alpha=0,8$ . Скорость воздушного потока над зеркалом испарения принять равной 1м/с.

Определить массу паров нефти, поступивших в атмосферу в результате испарения с поверхности пролива, за время 3600 сек с момента образования пролива.

Физические свойства веществ и материалов представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Физические свойства веществ и материалов

| Параметр                                                             | Значение |
|----------------------------------------------------------------------|----------|
| Молярная масса $M$ , кг/кмоль (по легколетучему компоненту - бутану) | 58       |
| Давление насыщенных паров нефти $P_n$ , кПа                          | 66,7     |

*Решение:*

При разлинии на неограниченную грунтовую поверхность площадь пролива ( $F_{ж}$ ) жидкости определяется по формуле (2.7)

$$F_{жс} = 5 \cdot 0,8 \cdot 2000 = 8000 \text{ м}^2.$$

По табл. 2.1 в зависимости от скорости и температуры воздушного потока над зеркалом пролива определяем значения коэффициента  $\eta$ . Принимаем  $\eta=1$ .

Масса паров, поступающих в процессе испарения пролива, определяется по формуле (2.8)

$$G_{исп} = 10^{-6} \cdot 1 \cdot 66,7 \cdot \sqrt{58} \cdot 8000 \cdot 3600 = 14630 \text{ кг}.$$

## ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ АВАРИЙНОМ ВЫБРОСЕ СЖИЖЕННОГО ГАЗА

### 3.1 Мгновенное вскипание жидкости

Разрушение резервуара высокого давления, содержащего сжиженный газ под давлением насыщенных паров и температуре выше нормальной температуры кипения, приводит к резкому сбросу давления и мгновенному вскипанию части жидкой фазы за счет высвобождения внутренней энергии. При этом устанавливается новое состояние равновесия, а температура оставшейся жидкой фазы понижается до температуры кипения при атмосферном давлении. При мгновенном испарении жидкости формируется *первичное облако* пара. Облако опасного вещества, образующееся в результате длительного выброса газа или перегретой вскипающей жидкости, а также в результате испарения опасного вещества с подстилающей поверхности или из разгерметизированного оборудования и распространяющееся по ветру от места выброса называется вторичным.

Жидкости, хранящиеся под давлением при температуре превышающей собственную температуру кипения при нормальных условиях, представляют определенные проблемы, связанные с ее закипанием. Если в трубе или емкостной аппаратуре образуется потеря герметичности, то часть жидкости мгновенно вскипает, причем процесс вскипания иногда протекает подобно взрыву. Ввиду высокой скорости процесс мгновенного вскипания можно считать адиабатным.

Избыточная энергия, содержащаяся в перегретой жидкости, приводит к интенсивному испарению жидкости и снижает температуру до новой точки кипения. Если  $m_{ж}$  – начальная масса жидкости,  $C_{p,ж}$  – теплоёмкость жидкости,  $T_0$  – температура жидкости до разгерметизации, а  $T_{кип}$  – температура кипения жидкости в нормальных условиях, тогда избыточную

энергию, содержащуюся в перегретой жидкости можно выразить следующим образом

$$E = m_{ж} \cdot C_{P,ж} \cdot (T_0 - T_{кип}). \quad (3.1)$$

Уравнение (3.1) - это энергия испарения жидкости. Если  $\Delta H$  – теплота испарения жидкости, то испарившуюся массу можно определить по следующей зависимости

$$m_{исп} = \frac{E}{\Delta H} = \frac{m_{ж} \cdot C_{P,ж} \cdot (T_0 - T_{кип})}{\Delta H}. \quad (3.2)$$

Отсюда определим долю испарившейся жидкости следующим образом

$$f_{исп} = \frac{m_{исп}}{m} = \frac{C_{P,ж} \cdot (T_0 - T_{кип})}{\Delta H}. \quad (3.3)$$

Данная зависимость предполагает постоянство физических свойств в интервале температур от  $T_0$  до  $T_{кип}$ .

При интегрировании указанного выражения в интервале температур от начальной  $T_0$  до температуры кипения при нормальных условиях  $T_{кип}$  получаем

$$\int_{m_{ж}}^{m_{ж}-m_{исп}} \frac{dm_{ж}}{m_{ж}} = \int_{T_0}^{T_{кип}} \frac{C_{P,ж}}{\Delta H} dT \longrightarrow \ln\left(\frac{m_{ж} - m_{исп}}{m_{ж}}\right) = -\frac{\bar{C}_{P,ж} \cdot (T_0 - T_{кип})}{\Delta \bar{H}}, \quad (3.4)$$

где  $\bar{C}_{P,ж}$  и  $\Delta \bar{H}$  – средние значения теплоёмкости и средняя скрытая теплота парообразования, соответственно. Учитывая, что  $f_{исп} = m_{исп}/m_{ж}$ , получаем следующее выражение

$$f_{исп} = 1 - \exp\left[-\bar{C}_{P,ж} \cdot (T_0 - T_{кип}) / \Delta \bar{H}\right]. \quad (3.5)$$

Для иллюстрации на рисунке 3.1 представлены зависимости  $f_{исп}$  от температуры хранения.

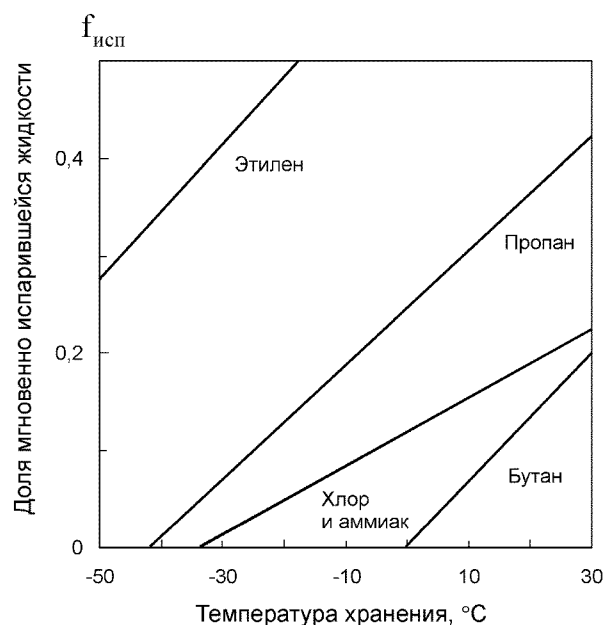


Рисунок 3.1. Зависимость  $f_{\text{исп}}$  от температуры хранения

После мгновенного выделения внутренней энергии устанавливается равновесие между жидкостью и паром при давлении близком к атмосферному. Так, при разрушении резервуара с пропаном начальные и конечные условия могут выглядеть следующим образом:

Таблица 3.1

Начальные и конечные условия равновесия

|                 | Начальные условия | Конечные условия |
|-----------------|-------------------|------------------|
| Температура, °C | 26,9              | -42,1            |
| Давление, бар   | 10                | 1                |

### 3.2 Парообразование при кипении пролива сжиженного газа

Оставшаяся после мгновенного вскипания жидкая фаза разливается на подстилающей поверхности и переходит в состояние кипения, интенсивность которого пропорциональна скорости теплопритока от окружающей среды (нагретого подстилающего слоя и атмосферного воздуха). Различают три режима кипения: пузырьковый, переходный и пленочный (рисунок 3.2).

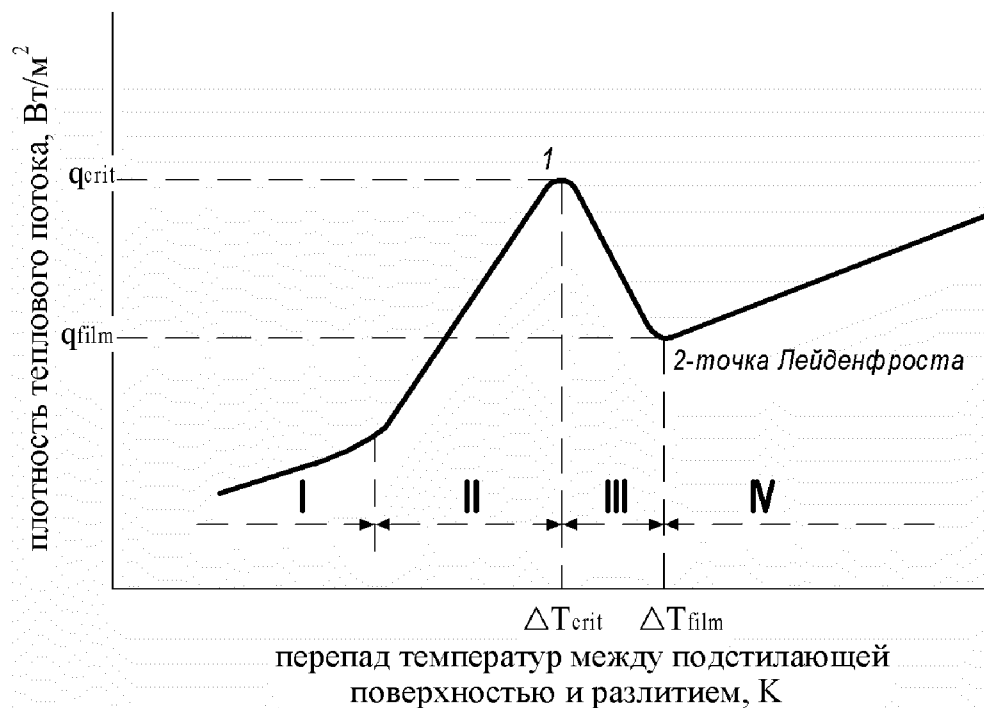


Рисунок 3.2. Кривая кипения жидкостей

При кипении происходит беспорядочная турбулизация парожидкостной смеси вблизи поверхности нагрева растущими и периодически отрывающимися пузырьками пара. Такой режим кипения называется пузырьковым (рисунок 3.2, зона II). Механизм теплообмена при пузырьковом кипении отличается от механизма теплоотдачи при конвекции однофазной жидкости наличием дополнительного переноса массы вещества и теплоты паровыми пузырями из пограничного слоя в объем кипящей жидкости. Это приводит к высокой интенсивности теплоотдачи при кипении по сравнению с конвекцией однофазной жидкости. Для возникновения процесса кипения необходимо выполнение двух условий: наличие перегрева жидкости относительно температуры насыщения и наличие центров парообразования. Перегрев жидкости имеет максимальную величину непосредственно у обогреваемой поверхности теплообмена. На ней же находятся центры парообразования в виде отдельных неровностей стенки, пузырьков воздуха, пылинок и др. Поэтому образование пузырьков пара происходит непосредственно на поверхности теплообмена.

Кроме того, интенсивность теплообмена связана с термическим сопротивлением весьма тонкой жидкостной прослойкой (пленки), остающейся вследствие смачивания непосредственно на самой поверхности нагрева под областью паровых пузырей и через которую теплота передается путем теплопроводности. При умеренных перепадах температур между кипящей жидкостью и твердым телом ( $\Delta T < 10^0 \text{C}$ ) тепловой поток будет пропорционален  $\Delta T^3$ .

С повышением турбулизации и утонением слоя жидкости интенсивность теплоотдачи увеличивается до критического значения (рисунок 3.2 точка 1). Отдельные паровые пузырьки сливаются, образуя у поверхности теплообмена сплошную паровую пленку, которая отделяет жидкость от твердой поверхности. При таком пленочном режиме кипения коэффициент теплоотдачи резко снижается (рисунок 3.2 точка 2), и разность температур между твердой поверхностью и жидкостью становится очень большой. Минимальная температура устойчивого пленочного кипения называется температура Лейденфроста. В области пленочного режима кипения (рисунок 3.2, зона IV) повышение  $\Delta T$  (за точкой 2) вызывает более медленное увеличение теплового потока, пропорциональное  $\Delta T^{0,75}$ . Интенсивность теплоотдачи при пленочном кипении значительно меньше, чем при пузырьковом.

По истечении некоторого времени вследствие охлаждения поверхности теплоотдача от нее резко снижается и при равенстве температур поверхности и жидкости прекращается.

Перед моделированием процесса парообразования из пролива на стадии кипения пролива следует оценить возможный механизм теплообмена. Критериями для определения режимов кипения приняты минимальный перепад температур  $\Delta T_{\min}$  (соответствует началу пленочного режима кипения, рисунок 3.2 точка 2) и критический перепад температур  $\Delta T_{\text{crit}}$  (соответствует началу переходного режима кипения, рисунок 3.2 точка 1).

Величины  $\Delta T_{\min}$  и  $\Delta T_{\text{crit}}$  могут быть определены из следующих эмпирических выражений

$$\Delta T_{\text{crit}} = 0.625(q_{\text{crit}} \cdot \sigma_{\text{жс}} \cdot T_{\text{жс}})^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{\left[ \left( \frac{10}{(\rho_{\text{под}} \cdot C_{P,\text{под}} \cdot \lambda_{\text{под}})^{\frac{1}{2}}} \right) + \left( \frac{\sqrt{\nu_{\text{жс}}}}{\lambda_{\text{жс}}} \right) \right]^{\frac{2}{3}} \left[ 1 + 10 \left( \frac{\rho \cdot C_{P,\text{жс}} \cdot \lambda_{\text{жс}}}{\rho_{\text{под}} \cdot C_{P,\text{под}} \cdot \lambda_{\text{под}}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}}}{1 + 10(\rho_{\text{г}} / (\rho_{\text{жс}} - \rho_{\text{г}}))^{\frac{2}{3}}}; \quad (3.6)$$

$$\Delta T_{\min} = 0.625(T_{\text{crit}} - T_{\text{жс}}) \cdot \left[ 0.16 + 2.4 \left( \frac{\rho_{\text{жс}} \cdot C_{P,\text{жс}} \cdot \lambda_{\text{жс}}}{\rho_{\text{под}} \cdot C_{P,\text{под}} \cdot \lambda_{\text{под}}} \right)^{\frac{1}{4}} \right]. \quad (3.7)$$

Критический тепловой поток,  $q_{\text{crit}}$ , представляющий собой максимальный тепловой поток при пузырьковом режиме кипения, получен из следующего выражения

$$q_{\text{crit}} = 0.16 \cdot \Delta H \cdot \rho_{\text{г}}^{1/2} \cdot [\sigma_{\text{жс}} g(\rho_{\text{жс}} - \rho_{\text{г}})]^{1/4}. \quad (3.8)$$

Результаты расчетов указанных параметров для сжиженных газов — пропана, бутана, аммиака и хлора представлены в табл. 3.2.

В режиме кипения интенсивность парообразования из пролива пропорциональна теплопритоку от окружающей среды (подстилающего воздуха, слоя, радиационного излучения):

$$W = \frac{q}{\Delta H},$$

где  $q$  — суммарный теплоприток от окружающей среды, Вт/м<sup>2</sup>. Величина  $q$  определяется суммой тепловых потоков, подводимых от грунта, воздушного потока и солнечной радиацией.

В результате охлаждения температура поддона (грунта) снижается, и верхний слой его начинает выполнять роль теплоизолирующей прослойки, препятствуя подводу тепла из глубинных слоев поддона, кипение жидкости заканчивается. Наступает период парообразования за счет испарения жидкости. Графическая иллюстрация процесса парообразования из пролива на примере сжиженного аммиака представлена на рисунок 3.3.

Таблица 3.2

Расчетные значения  $\Delta T_{\min}$  и  $\Delta T_{\text{crit}}$  для сжиженных газов

| Показатель               | пропан | бутан  | аммиак | хлор  |
|--------------------------|--------|--------|--------|-------|
| $\Delta T_{\text{crit}}$ | 3,68   | 3,76   | 7,28   | 4,79  |
| $\Delta T_{\min}$        | 178,44 | 196,13 | 369,6  | 248,9 |

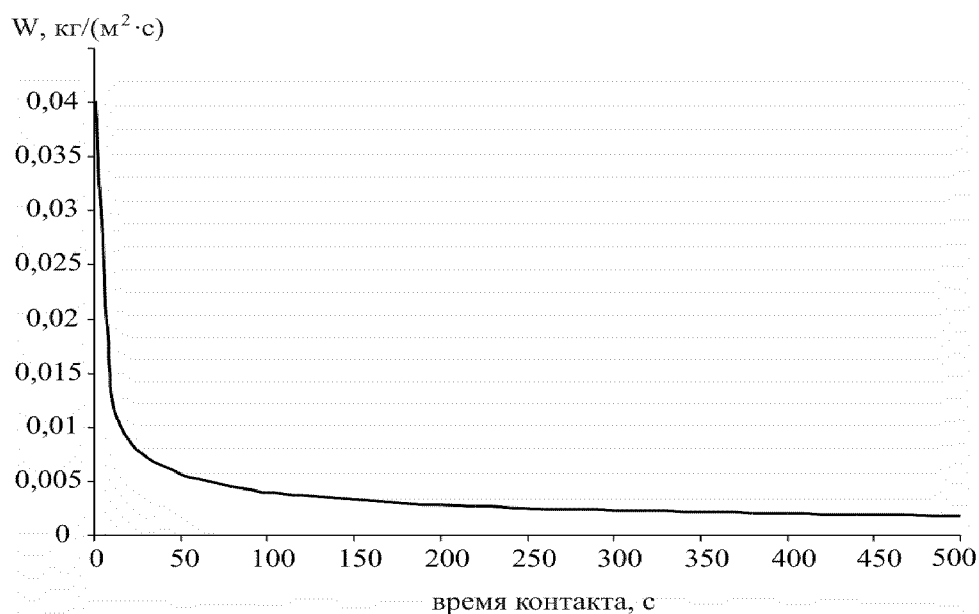


Рисунок 3.3. Интенсивность парообразования при кипении жидкого аммиака при проливе на бетонную поверхность

Следует отметить, что в период кипения скорость парообразования зависит от природы подстилающей поверхности. Для бута эта скорость примерно в 20 раз больше, чем для песка.

Если принять, что при пузырьковом режиме кипения теплоотдача от твердой поверхности к проливу лимитируется теплопереносом в твердом слое, то решение уравнения одномерной нестационарной теплопроводности в твердом слое дает широко известную зависимость интенсивности парообразования  $W$  (кг/(м<sup>2</sup>·с)) на стадии кипения от времени  $\tau$  и физических свойств подстилающей поверхности (грунта):

$$q_{\text{под}} = (T_0 - T_{\text{ж}}) \frac{\sqrt{\lambda_{\text{под}} \cdot C_{\text{Р,под}} \cdot \rho_{\text{под}}}}{\sqrt{\pi \cdot \tau}} \quad (3.9)$$

### 3.3 Образование аэрозолей при выбросах в атмосферу

Процесс мгновенного вскипания жидкости носит взрывной характер и длится, как правило, доли секунды. В зарубежной литературе этот процесс называют BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) - взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости. Расширяющиеся пары диспергируют и увлекают часть жидкости, поэтому образующееся облако содержит смесь пара и жидкости в виде аэрозольных капель.

Другой случай образования аэрозолей — частичная разгерметизация резервуара. В случае, когда отверстие находится над поверхностью жидкости, и его площадь намного меньше площади горизонтального сечения резервуара, то происходит однофазное истечение паров вещества, и аэрозольное облако не образуется. Если площадь отверстия достаточно велика, происходит резкое падение давления в резервуаре, что приводит к бурному вскипанию и вспениванию жидкости в объеме резервуара. В результате, несмотря на то, что отверстие расположено выше поверхности жидкости, истечение происходит в двухфазном режиме, и в атмосферу выбрасывается смесь паров вещества и жидких капель. В другом возможном случае, когда отверстие находится ниже уровня жидкости, вещество начинает поступать из резервуара в жидком состоянии. Если отверстие непосредственно соединяет объем резервуара с внешней атмосферой, то результатом станет образование жидкостной струи.

Наличие аэрозоля может существенно изменить такие характеристики парового облака, как его плавучесть, время существования опасной концентрации, протяженность опасной концентрации, протяженность взрывоопасной или токсичной зоны при дрейфе облака. Важную роль играют фазовые переходы (испарение, конденсация) в объеме аэрозольного облака, влияющие на его состав, температурный режим и рассеяние в атмосфере. Например, при оценке зон токсического поражения аммиаком необходимо

учитывать, что при наличии капельных включений смесь аммиака с воздухом может вести себя как тяжелый газ. Это связано с тем, что по мере испарения капель смесь охлаждается и приобретает плотность, превышающую плотность воздуха.

В ряде работ количество аэрозоля, увлекаемого выделяющимся паром, принимается равным массе мгновенно образовавшейся паровой фазы. Иногда принимается, что полное превращение жидкости в пароаэрозольное облако возможно при  $x_v > 0,35$ . Следует иметь в виду, что эти оценки являются весьма грубыми и нуждаются в соответствующем экспериментальном и теоретическом уточнении.

### **3.4 Расчет парообразования при аварийном выбросе однокомпонентного сжиженного газа**

При выбросе перегретой жидкости общее количество пара, поступившего в окружающую среду, определяется по следующей зависимости

$$m = G_{\text{св}} + G_{\text{мгн}} + G_{\text{кип}} + G_{\text{исп}}, \quad (3.11)$$

где  $G_{\text{св}}$  – количество паров, находящихся в свободном объеме аппарата до аварии, определяется с учетом коэффициента заполнения аппарата и давления насыщенных паров вещества;  $G_{\text{мгн}}$  – масса вещества, переходящая в первичное облако в виде газа при мгновенном вскипании перегретого опасного химического вещества;  $G_{\text{кип}}$  – масса паров, поступивших в атмосферу при вскипании сжиженного газа;  $G_{\text{исп}}$  – масса паров, поступающих в процессе испарения пролива.

$$G_{\text{св}} = (1 - \alpha) \cdot \frac{M \cdot V \cdot P_0}{R \cdot T_0}, \quad (3.12)$$

где  $\alpha$  – коэффициент заполнения аппарата;  $M$  – молярная масса вещества, кг/кмоль;  $V$  – объем аппарата, м<sup>3</sup>;  $P_0$  – давление в аппарате, Па;  $R$  –

универсальная газовая постоянная, Дж/кмоль·К;  $T_0$  – температура вещества в оборудовании, К.

Количество жидкости, мгновенно вскипающей при разгерметизации оборудования, вычисляется по формуле

$$G_{\text{мгн}} = m_{\text{жс}} \left( 1 - \exp \left( - \frac{C_{\text{р,ж}} (T_0 - T_{\text{кип}})}{\Delta H} \right) \right), \quad (3.13)$$

где  $m_{\text{ж}}$  – количество жидкой фазы, участвующей в аварии;  $C_{\text{р,ж}}$  – осредненная в соответствующем диапазоне температур удельная теплоемкость жидкости,  $T_{\text{кип}}$  – температура кипения при атмосферном давлении  $P_{\text{а}}$ , К;  $\Delta H$  – теплота испарения жидкого вещества, Дж/кг.

Масса жидкой фазы, поступившей в окружающее пространство из аварийного резервуара, определяется по формуле

$$m_{\text{жс}} = \alpha \cdot \rho_{\text{жс}} \cdot V_{\text{жс}}. \quad (3.14)$$

В результате мгновенного вскипания жидкости происходит дробление жидкой фазы на фрагменты, потеря устойчивости последних с образованием более мелких капель - аэрозолей. Количество вещества, переходящего в первичное облако в виде аэрозолей:

$$G_{\text{ж}} = \min \{ G_{\text{мгн}}, m_{\text{ж}} - G_{\text{мгн}} \}. \quad (3.15)$$

При разливе жидкости на открытых пространствах площадь испарения принимается равной площади, ограниченной обвалованием, или, при отсутствии обвалования, из условия разлития 1 л продукта на площади  $0,15\text{м}^2$ . В некоторых методиках для случаев отсутствия обвалования толщину слоя разлившегося опасного вещества следует принимать равной 0,05 м. При выборе подхода для определения площади разлития опасного вещества на неограниченной поверхности следует исходить из свойств подстилающего слоя и особенностей рельефа местности.

Если температура кипения жидкости ниже температуры окружающей среды, то при ее разливе за счет теплоотдачи от твердой поверхности происходит интенсивное парообразование этой жидкости. Масса

образующихся при этом паров  $G_{\text{кип}}$  может определяться по формуле

$$G_{\text{кип}} = 2 \frac{T_a - T_{\text{кип}}}{\Delta H} \frac{\varepsilon}{\sqrt{\pi}} \frac{F_{\text{под}}^2}{F_{\text{ж}}} \sqrt{\tau}, \quad (3.16)$$

где  $T_a$ ,  $T_{\text{кип}}$  – температуры твердой поверхности (окружающей среды) и кипения жидкости;  $\Delta H$  – удельная теплота испарения сжиженного газа при температуре  $T_{\text{кип}}$ ;  $F_{\text{под}}$  – площадь контакта с твердой поверхностью;  $\varepsilon = \sqrt{\lambda_{\text{под}} \rho_{\text{под}} C_{P,\text{под}}}$ ;  $\lambda_{\text{под}}$ ,  $\rho_{\text{под}}$ ,  $C_{P,\text{под}}$  – коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость материала твердой поверхности соответственно;  $\tau$  – время контакта жидкости с твердой поверхностью, принимаемое в расчете, в сек.

Масса паров, поступающих в процессе испарения пролива, определяется по формулам (2.5-2.7).

### **3.5 Расчет парообразования при аварийном выбросе многокомпонентного сжиженного газа**

Доля мгновенно вскипающей многокомпонентной жидкости при адиабатическом расширении может определяться согласно блок-схеме, представленной на рисунок 3.4.

Условные обозначения (рисунок 3.4):  $z_i$  – мольная доля  $i$ -го компонента в исходной смеси;  $P_0$  – рабочее давление в аппарате;  $P_a$  – атмосферное давление;  $T$  – температура смеси после мгновенного вскипания;  $e'$  – мольная доля отгона;  $k_i$  – константы фазового равновесия;  $\delta_0$  – заданная ошибка вычисления;  $H_{\text{прод}}$  – энтальпия продуктов;  $H_F$  – энтальпия исходной смеси;  $X_i$ ,  $Y_i$  – мольные составы образовавшихся жидкой и газовой фаз.

Необходимо учитывать, что кипение смеси количественно отличается от кипения чистой жидкости, так как в смеси преимущественно испаряются более летучие компоненты. Это обуславливает зависимость состава оставшейся жидкости от времени. Изменение температуры жидкой фазы со

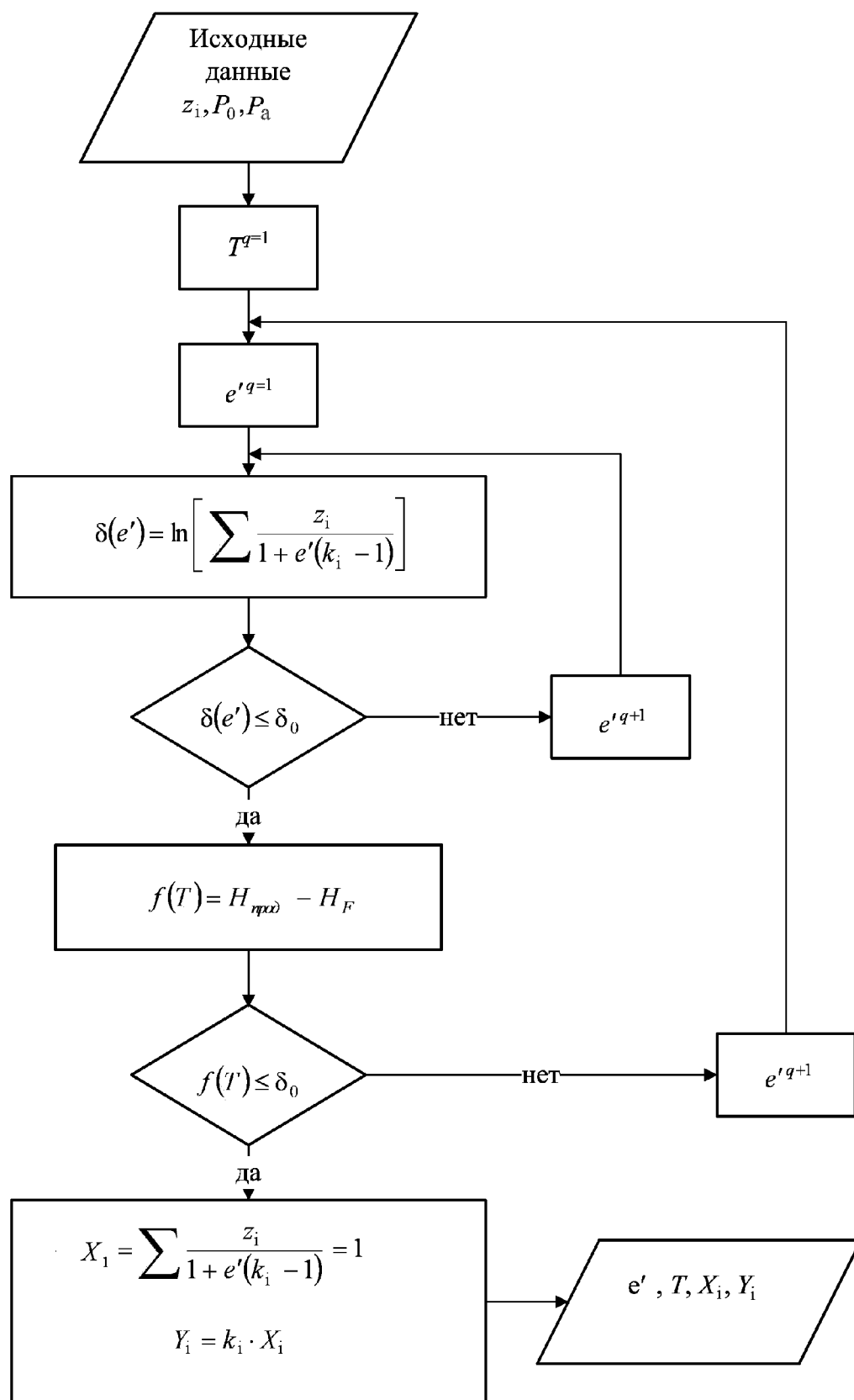


Рисунок 3.4. Блок-схема расчета процесса мгновенного вскипания многокомпонентного сжиженного газа при адиабатном расширении

временем происходит в соответствии с изменением состава жидкости согласно кривой фазового равновесия. Температура кипения смеси определяется последовательным приближением по уравнению изотермы жидкой фазы:

$$\sum_{i=1}^N X_i k_i = 1; \quad k_i = \frac{P_i}{P_a}, \quad (3.16)$$

где  $P_i$  – давление насыщенных паров при температуре  $T_{ж}$ , Па;  $P_a$  – давление окружающей среды:  $P_a = 101325$  Па.

### 3.6 Примеры по главе 3

**Пример 3.1** *Рассчитать количество опасного вещества, участвующего в аварии, при аварийном выбросе сжиженного газа в резервуарном парке*

*Исходные данные:*

В резервуарном парке хранения сжиженного бутана произошла разгерметизация емкости объемом  $200 \text{ м}^3$ . Емкость расположена на бетонной площадке размером  $30\text{м} \times 30 \text{ м}$ . Температура окружающей среды и емкости равна  $35^\circ\text{C}$ . Степень заполнения резервуара 80 % (по объему). Физические свойства веществ и материалов представлены в табл. 3.3.

Определить массу паров опасного вещества, поступившего в атмосферу в результате:

- а) поступления газовой фазы, содержащейся в свободном объеме аппарата;
- б) мгновенного вскипания перегретой жидкости (сжиженного газа);
- в) кипения образовавшегося пролива;
- г) последующего испарения с поверхности разлива.

Таблица 3.3

## Физические свойства веществ и материалов

| Параметр                                                                                   | Значение |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Плотность сжиженного газа $\rho_{ж}$ , кг/м <sup>3</sup>                                   | 560      |
| Удельная теплоемкость жидкости $C_{Р,ж}$ , Дж/(кг·К)                                       | 2535     |
| Теплота испарения жидкости $\Delta H$ , Дж/кг                                              | 351000   |
| Температура кипения жидкости при атмосферном давлении, °С                                  | -0,5     |
| Молярная масса $M$ , кг/кмоль                                                              | 58       |
| Коэффициент теплопроводности материала подстилающей поверхности $\lambda_{под}$ , Вт/(м·К) | 1,3      |
| Плотность материала подстилающей поверхности $\rho_{под}$ , кг/м <sup>3</sup>              | 2300     |
| Удельная теплоемкость материала подстилающей поверхности $C_{Р,под}$ , Дж/(кг·К)           | 1000     |

*Решение:*

Масса жидкой фазы, поступившей в окружающее пространство из аварийного резервуара, определяется по формуле (3.14) и равна

$$m_{ж} = 0,8 \cdot 200 \cdot 560 = 89600 \text{ кг.}$$

Количество жидкости, мгновенно вскипающей при разгерметизации оборудования, определяется по формуле (3.13) и равно

$$G_{мгн} = 89600 \cdot \left( 1 - \exp \left( - \frac{2535 \cdot (308 - 272,5)}{351000} \right) \right) = 20264 \text{ кг.}$$

Так как хранение сжиженного резервуара осуществляется под собственным давлением насыщенных паров, принимаем давление в аппарате  $P_0$ , равное давлению насыщенных паров  $P_n$ .

Давление насыщенных паров сжиженного газа при температуре окружающей среды по формуле (1.5)

$$P_n = 101325 \cdot \exp \left( \frac{351000 \cdot 58}{8310} \left( \frac{1}{(-0,5 + 273,15)} - \frac{1}{(35 + 273,15)} \right) \right) = 285556 \text{ Па.}$$

Количество пара в свободном объеме резервуара определяется по формуле (3.12)

$$G_{\text{св}} = (1 - 0,8) \frac{0,058}{8,31} \frac{285556 \cdot 200}{273,15 + 35} = 258 \text{ кг.}$$

Площадь пролива жидкости, оставшейся после мгновенного вскипания, на неограниченной поверхности определяется по формуле (2.7)

$$F_{\text{ж}} = 150 \cdot (89600 - 20264) / 560 = 18572 \text{ м}^2.$$

Так как площадь пролива, определенная для случая разлива на неограниченной поверхности,  $F_{\text{ж}}=18572 \text{ м}^2$  больше площади, ограниченной обвалованием  $F_{\text{ж}}=900 \text{ м}^2$ , то окончательно принимаем  $F_{\text{ж}}=900 \text{ м}^2$ .

Время парообразования из пролива (время контакта жидкости с поверхностью пролива) принимается равным времени полного испарения СУГ, но не более 3600 с.

Масса паров, образующихся при кипении пролива, по формуле (3.16) равна

$$G_{\text{кин}} = 2 \frac{35 - (-0,5)}{351000} \frac{\sqrt{1,3 \cdot 2300 \cdot 1000}}{\sqrt{3,14}} \frac{900^2}{900} \sqrt{3600} = 10671 \text{ кг.}$$

Давление насыщенных паров СУГ в формуле (2.5) для расчета интенсивности испарения из пролива принято равным атмосферному давлению, так как температура жидкости в проливе не превышает температуру кипения при атмосферном давлении.

Интенсивность испарения из пролива, обусловленного диффузионными процессами, определяется по формуле (2.5)

$$W = 10^{-6} \cdot 1 \cdot \sqrt{58} \cdot 101,325 = 0,000772 \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{ с}).$$

Общее количество испарившейся жидкости по формуле (2.6)

$$G_{\text{исп}} = 0,000772 \cdot 900 \cdot 3600 = 2500 \text{ кг.}$$

Суммарное количество пара, участвующего в образовании паровоздушного облака, равно (3.11)

$$m = 20264 + 258 + 10671 + 2500 = 33693 \text{ кг.}$$

**Пример 3.2 Рассчитать количество опасного вещества, участвующего в аварии, при аварийном выбросе сжиженного газа из цистерны**

*Исходные данные:*

В результате нарушений правил эксплуатации железнодорожной цистерны объемом 75 м<sup>3</sup> с пропаном произошла ее аварийная разгерметизация. Пролив произошел на грунтовую поверхность. Температура окружающей среды и емкости равна 35°C. Коэффициент заполнения цистерны 85% (по объему). Физические свойства веществ и материалов представлены в табл. 3.4.

Определить массу паров опасного вещества, поступившего в атмосферу в результате:

- а) поступления газовой фазы, содержащейся в свободном объеме аппарата;
- б) мгновенного вскипания перегретой жидкости (сжиженного газа);
- в) кипения образовавшегося пролива;
- г) последующего испарения с поверхности разлития.

Таблица 3.4

Физические свойства веществ и материалов

| Параметр                                                                                   | Значение |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Плотность сжиженного газа $\rho_{ж}$ , кг/м <sup>3</sup>                                   | 475      |
| Удельная теплоемкость жидкости $C_{Р,ж}$ , Дж/(кг·К)                                       | 2637     |
| Теплота испарения жидкости $\Delta H$ , Дж/кг                                              | 484500   |
| Температура кипения жидкости при атмосферном давлении, °С                                  | -42,05   |
| Молярная масса $M$ , кг/кмоль                                                              | 44       |
| Коэффициент теплопроводности материала подстилающей поверхности $\lambda_{под}$ , Вт/(м·К) | 0,97     |
| Плотность материала подстилающей поверхности $\rho_{под}$ , кг/м <sup>3</sup>              | 1380     |
| Удельная теплоемкость материала подстилающей поверхности $C_{Р,под}$ , Дж/(кг·К)           | 840      |

*Решение:*

Масса жидкой фазы, поступившей в окружающее пространство из аварийного резервуара, равна (3.14)

$$m_{жс} = 0,85 \cdot 75 \cdot 475 = 30281 \text{ кг.}$$

Количество жидкости, мгновенно вскипающей при разгерметизации оборудования, по формуле (3.13)

$$G_{мгн} = 30281 \cdot \left( 1 - \exp \left( - \frac{2637 \cdot (308 - 231,1)}{484500} \right) \right) = 10356 \text{ кг.}$$

Так как хранение сжиженного резервуара осуществляется под собственным давлением насыщенных паров, принимаем давление в аппарате  $P$ , равное давлению насыщенных паров  $P_n$ .

Давление насыщенных паров сжиженного газа при температуре окружающей среды определяется по формуле (1.5)

$$P_n = 101325 \cdot \exp \left( \frac{484500 \cdot 44}{8310} \left( \frac{1}{(-42,05 + 273,15)} - \frac{1}{(35 + 273,15)} \right) \right) = 1619340 \text{ Па.}$$

Количество пара в свободном объеме резервуара определяется по формуле (3.12) и равно

$$G_{св} = (1 - 0,85) \frac{0,044}{8,31} \frac{1619340 \cdot 75}{273,15 + 35} = 313 \text{ кг.}$$

Площадь пролива жидкости, оставшейся после мгновенного вскипания, на неограниченной поверхности определяется по формуле (2.7) и равна

$$F_{ж} = 20 \cdot (30281 - 10356) / 475 = 839 \text{ м}^2.$$

Время парообразования из пролива (время контакта жидкости с поверхностью пролива) принимается равным времени полного испарения СУГ, но не более 3600 с.

Масса паров, образующихся при кипении пролива, по формуле (3.16)

$$G_{\text{кип}} = 2 \frac{35 - (-42,05)}{484500} \frac{\sqrt{0,97 \cdot 1380 \cdot 840}}{\sqrt{3,14}} \frac{839^2}{839} \sqrt{3600} = 9592 \text{ кг.}$$

Давление насыщенных паров СУГ в формуле (2.5) для расчета интенсивности испарения из пролива принято равным атмосферному давлению, так как температура жидкости в проливе не превышает температуру кипения при атмосферном давлении.

Интенсивность испарения из пролива, обусловленного диффузионными процессами, определяется по формуле (2.5) и равна

$$W = 10^{-6} \cdot 1 \cdot \sqrt{44} \cdot 101,325 = 0,000672 \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{ с}).$$

Общее количество испарившейся жидкости равно (2.6)

$$G_{\text{исп}} = 0,000672 \cdot 839 \cdot 3600 = 2030 \text{ кг.}$$

Суммарное количество пара, участвующего в образовании паровоздушного облака, по формуле (3.11)

$$m = 10356 + 313 + 9592 + 2030 = 22291 \text{ кг.}$$

## **ГЛАВА 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ВЕЩЕСТВА В АТМОСФЕРЕ**

### **4.1 Рассеяние газообразного вещества в атмосфере**

#### **4.1.1 Атмосферная турбулентность**

Примесь в атмосфере распространяется за счет конвективного переноса, обусловленного скоростью ветра, а также диффузии. Движение воздуха в приземном слое атмосферы практически всегда имеет турбулентный характер. Причиной диффузионного переноса примеси считается не столько движение молекул за счет концентрационной диффузии, сколько воздушные вихри различных размеров, возникающие у поверхности земли, обычно присутствующие в атмосфере.

Размеры турбулентных вихрей, кинетическая энергия движения воздуха в них, а следовательно, и скорость рассеяния примеси, будет определяться, в первую очередь, двумя факторами. Первый - характер изменения температуры воздуха вблизи поверхности земли, определяющий характер конвективного движения над поверхностью. Второй - шероховатость поверхности, вдоль которой движется воздушный поток, поскольку вихри возникают при обтекании препятствий, таких, как здания, лес, кустарники или неровности рельефа.

При увеличении высоты влияние поверхности земли на степень турбулентности атмосферы уменьшается. Поэтому с ростом размеров анизотропия атмосферных вихрей возрастает. По горизонтали они могут достигать нескольких сотен километров (типичный пример: антициклоны). Вертикальные размеры вихрей в атмосфере обычно ограничены и составляют порядка нескольких сотен метров.

В атмосфере принято выделять так называемый пограничный слой. Он

примыкает непосредственно к поверхности земли и характеризуется развитой вертикальной турбулентностью. Вышележащие слои воздуха называют свободной атмосферой. В ней вертикальная составляющая турбулентных колебаний скорости ветра уменьшается до пренебрежимо малой величины, и турбулентность становится двумерной.

Диффузия примеси в воздухе происходит в результате воздействия турбулентных вихрей на облако выброса. Картина их взаимодействия существенным образом зависит от относительных размеров вихрей и облака. На рисунке 4.1 изображены идеализированные схемы рассеяния, качественно иллюстрирующие этот процесс. Пунктиром показана траектория центра облака. На рисунке 4.1а изображено круглое облако, находящееся в поле турбулентных вихрей, размер которых меньше его диаметра. Облако в этом случае растет, а концентрация примеси в нем уменьшается. На рисунке 4.1б показано взаимодействие маленького облака с крупномасштабными вихрями. В этом случае результат действия турбулентности сводится к искривлению траектории облака, без изменения концентрации примесей в нем.

На рисунке 4.1в показано облако в поле вихрей, размеры которых соизмеримы с диаметром облака. В этом случае диффузия интенсивна, концентрация примеси в облаке быстро уменьшается, а его форма заметно и случайным образом искажается, часто распадаясь на отдельные клубы. В случае непрерывного выброса облако примеси имеет форму струи. Результатом действия мелкомасштабных вихрей на струю является увеличение ее поперечных размеров. Крупномасштабные вихри приводят к меандрированию струи (струя под их действием непрерывно и случайным образом изгибается наподобие русла реки). При осреднении концентрации примеси во времени, например, при продолжительном отборе проб воздуха на аспирационных установках, меандрирование приводит к уширению осредненной струи. Изменяется также и ее конфигурация. На рисунке 4.2а схематично показаны, границы струи в определенный момент времени (как

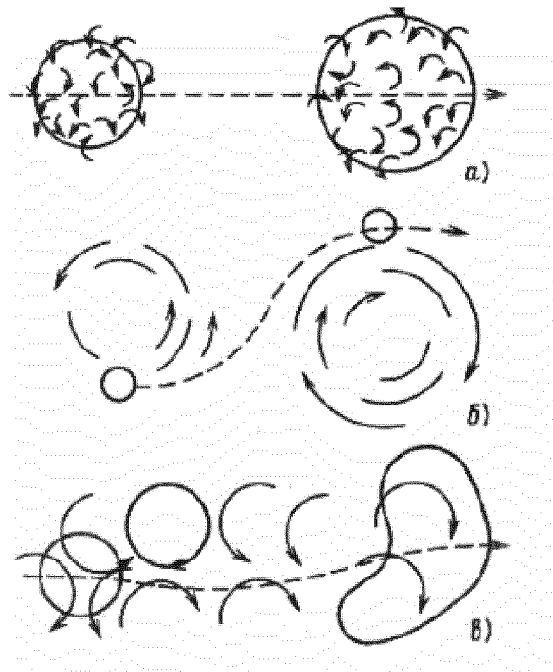


Рисунок 4.1. Качественные картины рассеивания примеси в атмосфере:  
*a* — большое облако в однородном поле мелких вихрей; *б* — маленькое облако в поле больших вихрей; *в* — облако в поле вихрей, соизмеримых с его размерами

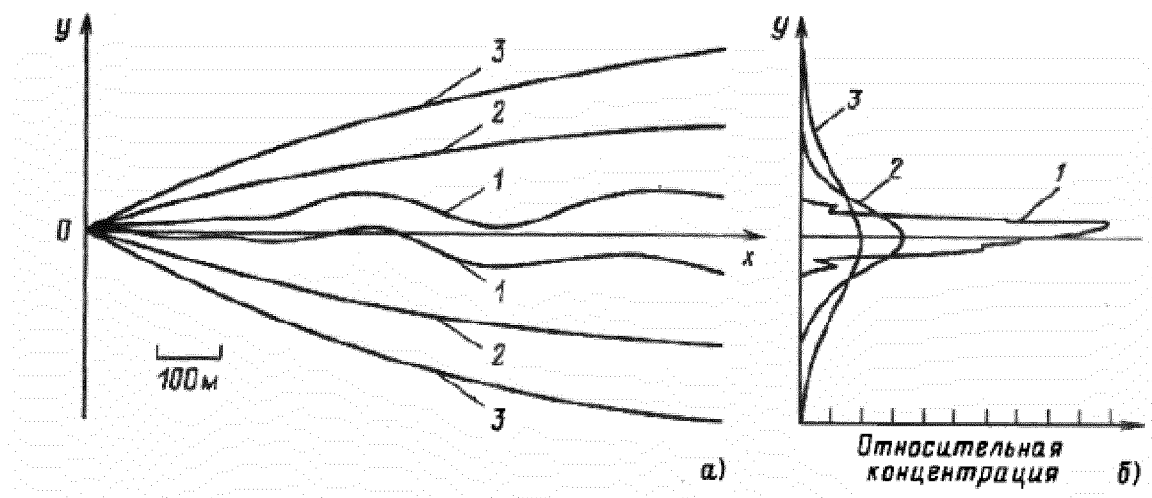


Рисунок 4.2. Очертания струи в зависимости от времени осреднения (а) и соответствующее распределение концентрации примеси в поперечном к струе направлении (б): 1 — мгновенная струя; 2 — очертания струи, осредненной за 10 мин; 3 — очертания струи, осредненной за 2 ч

на мгновенном фотографическом снимке), в результате 10-минутного и 2-часового осреднений (например, как если бы снимок был произведен с такой экспозицией). На рисунке 4.2б представлено распределение концентрации примеси для каждого из этих случаев. Уширение струи выброса зависит от времени осреднения.

Интенсивность атмосферной диффузии зависит от действующего спектра турбулентных вихрей и размеров облака выброса. Спектр вихрей в атмосфере определяется главным образом двумя факторами: вертикальным распределением температуры в атмосфере и скоростью ветра.

#### **4.1.2 Температурная стратификация атмосферы**

Интенсивность турбулентного переноса существенно зависит от температуры поверхности земли и распределения температуры воздуха в приземном слое атмосферы. В том случае, если вблизи поверхности земли температура воздуха выше, чем в более высоких областях приземного слоя, то состояние атмосферы будет неустойчивым (конвекция). И наоборот, устойчивому состоянию атмосферы соответствует более высокая температура воздуха на некоторой высоте над землей, чем непосредственно над ее поверхностью (инверсия). Состояние атмосферы характеризуют степенью вертикальной устойчивости либо классом устойчивости.

При отрицательном градиенте температуры, по абсолютной величине большем сухоадиабатического, температура поднимающегося объема воздуха возрастает по сравнению с температурой окружающей среды, его плотность уменьшается, и, следовательно, на него будет действовать сила плавучести, направленная вверх. В результате его подъем ускорится. На опускающийся же объем будет действовать сила, направленная вниз, так как плотность воздуха в нем будет больше плотности окружающего воздуха. Такие атмосферные условия называются неустойчивыми.

При неустойчивых условиях положительная работа сил плавучести приводит к увеличению турбулентности, диффузия примеси протекает интенсивно, сильно развита конвекция атмосферы, поэтому такие условия называют также конвективными, а турбулентность, вызванную конвективным перемешиванием, - конвективной турбулентностью.

При градиенте температуры, меньшем сухоадиабатического, воздух перемещается вверх и будет иметь температуру ниже окружающей среды. Сила плавучести будет стремиться удержать его на первоначальном уровне. Турбулентность подавляется, интенсивность диффузионных процессов снижается. Атмосферные условия в этом случае называются устойчивыми. Нейтральными называют условия, когда градиент температуры близок к сухоадиабатическому.

Принципиально другой тип турбулентности возникает при наличии ветра. В этом случае существенную роль играют силы трения, возникающие при взаимодействии движущегося воздушного потока с поверхностью Земли. Такую турбулентность называют механической. При устойчивых условиях механическая турбулентность быстро уменьшается с изменением высоты. Неустойчивые условия способствуют ее развитию. Механическое перемешивание приводит к искажению вертикального профиля температуры, который реализуется при отсутствии ветра. В результате при сильном ветре вблизи поверхности земли устанавливается близкий к адиабатическому градиент температуры.

Интенсивность механической турбулентности зависит от скорости ветра и в еще большей степени от микрорельефа поверхности земли. Его влияние на рассеяние примеси учитывается высотой шероховатости подстилающей поверхности.

Категорию устойчивости атмосферы можно оценить по значению градиента температуры из табл. 4.1.

Устойчивость слоя смешения может определяться через отношение

турбулентности, генерируемой температурным градиентом, и турбулентности, генерируемой сдвигом ветра у поверхности земли. Это отношение может быть выражено через масштаб Монина-Обухова:

$$L = -\frac{\rho \cdot C_p \cdot T \cdot u_*^3}{\kappa \cdot g \cdot q_0} \quad (4.1)$$

Масштаб Монина-Обухова представляет собой меру устойчивости слоя смешения. Величина  $L$  может рассматриваться как высота над землей, на которой турбулентность, генерируемая сдвигом ветра равна турбулентности диссипируемой тепловым потоком. Характеристики устойчивости атмосферы в зависимости от масштаба Монина-Обухова представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.1

Классы устойчивости атмосферы в зависимости от градиента  $\Delta T$

| Классификация            | Класс устойчивости по Паскуиллу | $\Delta T/\Delta z$ , (°C/100 м) |
|--------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| Сильная неустойчивость   | A                               | -1,9                             |
| Умеренная неустойчивость | B                               | -1,9 – -1,7                      |
| Слабая неустойчивость    | C                               | -1,7 – -1,5                      |
| Равновесное состояние    | D                               | -1,5 – -0,5                      |
| Слабая устойчивость      | E                               | -0,5 – 1,5                       |
| Умеренная устойчивость   | F                               | 1,5–4,0                          |
| Сильная устойчивость     | G                               | >4,0                             |

Таблица 4.2

Зависимость класса устойчивости атмосферы от масштаба Монина-Обухова

| Классификация          | Масштаб Монина-Обухова $L$ , м |
|------------------------|--------------------------------|
| Сильная неустойчивость | $-100 < L < 0$                 |
| Средняя неустойчивость | $-10^5 \leq L < -100$          |
| Равновесное состояние  | $ L  > 10^5$                   |
| Средняя устойчивость   | $10 \leq L < 10^5$             |
| Сильная устойчивость   | $0 < L < 10$                   |

### 4.1.3 Образование и распространение тяжелых газов

Тяжелые газы, с точки зрения промышленной безопасности, представляют наибольшую опасность для человека и окружающей среды, поскольку главным образом распространяются вдоль поверхности земли. Силы гравитации препятствуют их перемешиванию с воздухом. Вследствие этого, тяжелые газы и пары жидкостей имеют свой характер и специфику рассеяния.

Многие выбросы при промышленных авариях в начальный момент времени имеют плотность большую, чем воздух. Это может быть обусловлено различными причинами или их сочетанием:

- *высокая молекулярная масса вещества*, более 29,5 г/моль (молярная масса воздуха), при нормальных условиях к тяжелым газам относятся пропан, бутан, пары нефти, бензина, хлор, сероводород, и т.д.;

- *низкая температура* (например, метан при нормальных условиях имеет плотность ниже плотности воздуха, а при температуре, равной температуре кипения (-161,5°C), его плотность становится выше плотности воздуха и тогда метан уже является тяжелым газом);

- *наличие аэрозолей* (например, аммиак и при нормальных условиях, и при температуре кипения является легким газом, и соответственно при смешении с воздухом образующиеся смеси имеют плотность меньше, чем воздух, однако при наличии капельных включений в смеси она становится тяжелым газом);

- *протекание химических реакций*, которые приводят к образованию тяжелого газа.

Выбросы тяжелого газа под действием силы тяжести быстро оседают на землю, в результате чего образуются невысокие, но протяженные облака (высота таких облаков составляет до нескольких метров, а поперечный размер – до нескольких десятков и даже сотен метров). В результате площадь

покрываемой облаком поверхности земли оказывается на порядок больше той площади, которая была бы покрыта, будь плотность облака равна плотности воздуха. Более того, при выбросах тяжелого газа наблюдается такое явление, как распространение облака против ветра, которое отсутствовало бы, будь газ нейтральным.

Присутствие в атмосфере тяжелого газа существенно изменяет характер атмосферной турбулентности и поле скорости в области источника поступления газа в атмосферу. Градиенты плотности, температуры и концентрации, создаваемые источником, формируют поле сил плавучести. Турбулентное течение, возникающее в результате действия этого поля, сопровождается вовлечением в движение невозмущенных в начале слоев атмосферы, конвективным и диффузионным перемешиванием, выравниванием плотности, температуры, концентрации вне и внутри возмущенной области. Возникновение устойчивой стратификации в облаке приводит к уменьшению интенсивности турбулентных пульсаций и значительному снижению коэффициента турбулентной диффузии.

В рассеянии облака тяжелого газа можно выделить две стадии. На первой стадии облако опускается под действием силы тяжести. В этой фазе влияние метеорологических условий незначительно. Во второй фазе, когда плотность облака отличается незначительно от плотности воздуха, рассеивание примеси происходит при сильном влиянии погодных условий.

Характер распространения выброса непосредственно зависит от плотности вещества. Однако, если разность между плотностью образующейся газовой смеси и окружающей средой мала, ее влиянием на поле скорости можно пренебречь. Таким образом, разность между плотностью переносимого компонента и окружающим воздухом не единственный критерий по которому можно проводить разграничение между легкими и тяжелыми газами. Например, при малой скорости выброса и сильном ветре, примесь может рассматриваться как нейтральная. Для оценки

плавучести выброса могут использоваться следующие критерии

$$\frac{(g'q_0/d_0)^{1/3}}{U} \leq 0.15 \text{ для непрерывного источника выброса;}$$

$$\frac{(g'Q_0^{1/3})^{1/2}}{U} \leq 0.2 \text{ для источника залпового выброса.}$$

Здесь  $g' = g[(\rho_g - \rho_a)/\rho_a]$ ,  $\rho_g$  – плотность переносимой примеси,  $\rho$  – плотность окружающего воздуха;  $q_0$  – объемная скорость выброса;  $d_0$  – эквивалентный диаметр источника;  $U$  – скорость ветра;  $Q_0$  – объем выброса.

#### **4.1.4 Влияние шероховатости и препятствий на распространение газа**

Обобщение результатов экспериментальных исследований по рассеянию облаков тяжелых газов при наличии зданий и препятствий позволило сформулировать следующие выводы:

- препятствия вызывают отклонения движения облака или шлейфа в результате изменения фонового, окружающего потока и наведенных плавучестью (архимедовыми силами) течений;
- препятствия усиливают разбавление газа за счет повышения уровня турбулентности;
- препятствия замедляют перенос примеси, попадающей в область образования гидродинамического следа.

При набегании ветрового потока на здание происходит его торможение в продольном направлении и ускорение в поперечном, а также его восхождение и перемещение над зданием. С подветренной, наветренной сторон здания и на крыше в результате отрыва потока образуются рециркуляционные зоны (рисунок 4.3). Данные области характеризуются интенсивным турбулентным перемешиванием. Таким образом, при обтекании препятствия в форме параллелепипеда возникают следующие

вихревые структуры: подковообразный вихрь, боковые вихри, вихрь на крыше препятствия и два рециркуляционных вихря за препятствием.

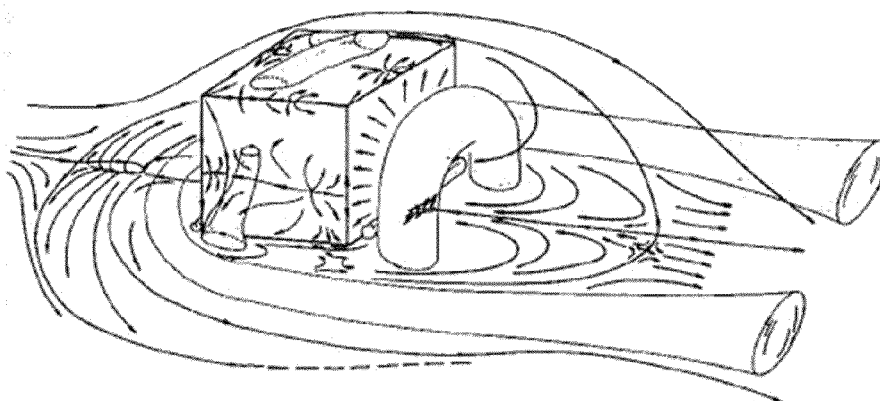


Рисунок 4.3. Схематичное представление вихревых структур в области препятствия

## 4.2 Модели рассеяния газообразного вещества в атмосфере

Для облаков, плотность которых мало отличается от плотности воздуха, используется гауссова модель рассеяния газообразных веществ, согласно которой распределение газа в вертикальном и горизонтальном направлениях за счет атмосферной турбулентности подчиняется закону распределения Гаусса. Динамика распределения концентраций согласно гауссовской модели показана на рисунке 4.4.

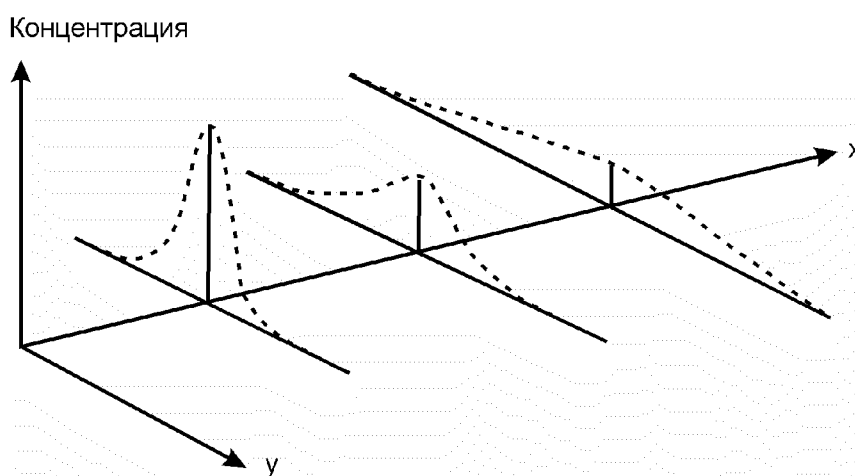


Рисунок 4.4. Динамика распределения концентраций по гауссовской модели

Согласно гауссовской модели, концентрация в поле ветра со скоростью  $U$  в зависимости от времени и пространства для постоянно действующего источника (например, испаряющегося пролива) изменяется следующим образом

$$C(x, y, z) = \frac{q}{2\pi\sigma_y\sigma_z U} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}, \quad (4.2)$$

где  $q$  – мощность непрерывного точечного источника;  $U$  – скорость ветра на высоте 10 м, м/с;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  – горизонтальные дисперсии, м;  $\sigma_z$  – вертикальная дисперсия, м;  $x$  – расстояние от источника, м;  $y$  – поперечное расстояние от оси шлейфа, м;  $z$  – высота над поверхностью земли, м;  $h$  – высота источника, м.

Направление ветра совпадает с направлением оси 0-х, а начало координат лежит в основании источника. В гауссовской модели также предполагается, что имеет место отражение загрязняющего вещества от поверхности земли.

Параметры распределения Гаусса  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  определяются из эмпирических формул, меняются как функция расстояния и зависят от погодных условий.

В том случае, если имеем дело с залповым выбросом (например, при мгновенном вскипании жидкости), концентрация примеси внутри облака рассчитывается по формуле

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{((2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z)} G(x, y, z, t); \quad (4.3)$$

$$G(x, y, z, t) = \exp\left(-\frac{(x-U \cdot t)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}, \quad (4.4)$$

здесь  $Q$  – масса первичного облака.

Гауссовские модели учитывают только два процесса, происходящие с выбросом в атмосфере: перемещение в поле ветра и рассеяние за счет

атмосферной турбулентности. Естественно, что и приемлемую точность они дают в тех зонах, где доминируют указанные процессы: либо на большом удалении от места выброса, либо во всем диапазоне расстояний, но при слабом выбросе. Таким образом, данные модели не позволяют учитывать влияние на процесс рассеяния сил плавучести, возникающих за счет разности плотностей паровоздушного облака и окружающего воздуха.

При моделировании процессов рассеяния тяжелых газов обычно используются интегральные модели. Данные модели базируются на интегральных законах сохранения. В случае мгновенного выброса первичное облако представляется цилиндром. Через границы цилиндра происходит турбулентный обмен, в результате которого в облако подмешивается воздух, его объем растет, а концентрация опасного вещества падает. При этом цилиндр перемещается под действием ветра. В случае продолжительного выброса интегральные законы сохранения приложены к поперечному сечению облака с заданными начальными размерами. Разработанные интегральные модели обычно решаются численными методами. Основным недостатком данных моделей является то, что влияние препятствий и сложной геометрии подстилающей поверхности учитывается посредством параметра шероховатости, что является достаточно грубым приближением.

Учесть влияние рельефа местности и промышленной застройки позволяют модели, основанные на численном решении трехмерных нестационарных уравнений гидродинамики и тепломассообмена. На сегодня данный подход реализован в нескольких программных продуктах, например, CFX, FLACS, FLUENT и др.

Используемые для расчета распространения выбросов CFD модели отличаются методом интерпретации турбулентных эффектов.

В настоящее время для учета влияния турбулентности наиболее часто используются два подхода:

- решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS-приближение);
- метод моделирования с выделением крупных вихрей (метод LES).

Для технических приложений более применимым является метод, базирующийся на решении осредненных уравнений Навье-Стокса или уравнений Рейнольдса.

В этом случае мгновенные значения гидродинамических параметров представляются в виде суммы осредненной величины  $\bar{\phi}$  и ее пульсационной составляющей  $\phi'$

$$\phi(x_i, t) = \bar{\phi}(x_i, t) + \phi'(x_i, t).$$

На рисунке 4.5 приведен пример для изменения во времени скорости течения в статистически стационарном и нестационарном течениях.

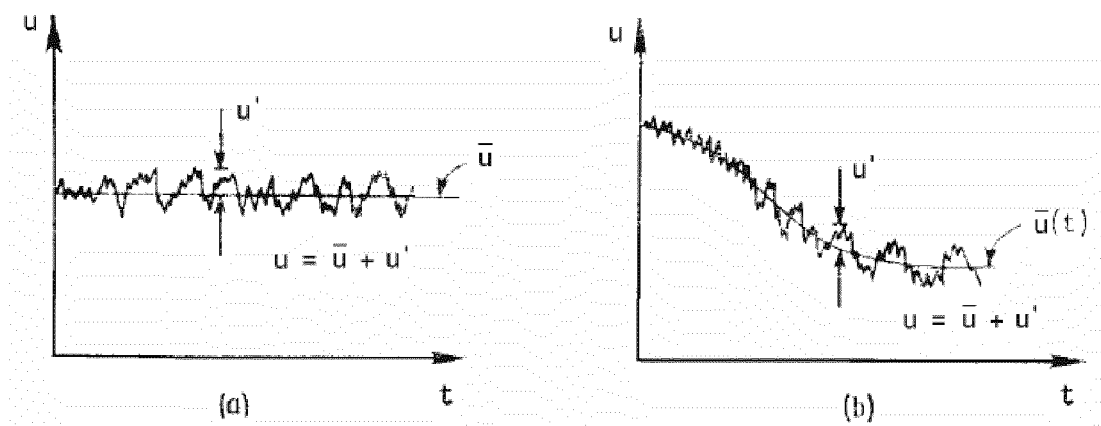


Рисунок 4.5. Осреднение для (а) стационарного течения, (б) нестационарного течения

Применяя данное осреднение, можно получить осредненные уравнения сохранения массы, импульса и скаляра (энергии, температуры, массовой доли).

В случае течения несжимаемой Ньютоновской жидкости уравнения Рейнольдса записываются в виде

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{\rho u'_i u'_j}) + \rho g_i. \quad (4.5)$$

В правую часть уравнения (4.5) входят напряжения Рейнольдса  $\overline{\rho u'_i u'_j}$ , учитывающие дополнительные потери и перераспределение энергии в турбулентном потоке. Они являются дополнительными (шестью) неизвестными к гидродинамическим параметрам осредненного движения.

Для замыкания уравнений Рейнольдса, то есть для определения  $\overline{\rho u'_i u'_j}$ , используются полуэмпирические модели турбулентности, устанавливающие связь между тензором Рейнольдсовых напряжений с параметрами осредненного потока.

Многие модели турбулентности, используемые в расчетной практике, основаны на гипотезе Буссинеска. Данная гипотеза предполагает линейную связь между тензором Рейнольдсовых напряжений и тензором скоростей деформаций:

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij}, \quad (4.6)$$

где множитель  $\mu_t$  представляет собой коэффициент турбулентной вязкости: в отличие от коэффициента молекулярной вязкости  $\mu$  коэффициент  $\mu_t$  не является свойством жидкости, а напрямую зависит от состояния турбулентности;  $k$  – кинетическая энергия турбулентности, равная  $1/2 \overline{u'_i u'_i}$ .

Важным достоинством моделей турбулентной вязкости является их относительная простота, наглядность и вычислительная эффективность: в рамках приближения Буссинеска проблема замыкания сводится к определению одной скалярной величины (турбулентной вязкости) вместо шести компонент тензора  $\tau_{ij}$ .

Основным недостатком данной гипотезы можно назвать предположение об изотропности коэффициентов турбулентной диффузии (вязкости), имеющее ограниченную применимость для сложных течений, в

частности тех, где действие массовых сил имеет преимущественное направление (например, при наличии гравитационного поля). Вихри механического происхождения имеют малые размеры, и статистический режим этих вихрей оказывается ближе к изотропному, чем для вихрей, порожденных плавучестью. Вследствие этого при механической турбулентности поток количества движения относительно мал. Конвективной турбулентности свойственны большие вихри и большая степень анизотропности, что обеспечивает большую величину направленного вниз потока количества движения.

По прямой аналогии с турбулентным переносом количества движения понятие турбулентной диффузии предполагает следующее соотношение между турбулентным переносом массы или тепла и градиентом переносимой субстанции

$$-\overline{\rho u_i' \phi'} = \Gamma_t \frac{\partial \Phi}{\partial x_i}, \quad (4.7)$$

где  $\Gamma_t$  – коэффициент турбулентной диффузии для тепла или массы. Подобно турбулентной вязкости,  $\Gamma_t$  не является собственной характеристикой жидкости, а зависит от состояния турбулентности. При турбулентном переносе между массой или теплом и количеством движения по гипотезе Рейнольдса существует аналогия, в силу которой величины  $\Gamma_t$  и  $\mu_t$  связаны зависимостью

$$\Gamma_t = \frac{\mu_t}{\sigma_t}, \quad (4.8)$$

где величина  $\sigma_t$  – турбулентное число Прандтля/Шмидта. Эксперименты показали, что, в отличие от самих коэффициентов турбулентной диффузии и турбулентной вязкости, их отношение  $\sigma_t$  слабо меняется как в пределах течения, так и от течения к течению. Поэтому для многих моделей турбулентное число Прандтля/Шмидта принимается постоянным.

Уравнениями (4.7) и (4.8)  $\Gamma_t$  и  $\mu_t$  вводятся как скалярные величины, т.е.

предполагается, что для потоков (напряжений) коэффициенты турбулентной диффузии (соответственно вязкости) одни и те же по всем направлениям.

В настоящее время для решения задач оценки последствий аварийных выбросов часто используемой моделью турбулентности, основанной на гипотезе Буссинеска, является  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности. Различные модификации модели  $k$ - $\varepsilon$  включены во все коммерческие пакеты, предназначенные для решения широкого круга задач прикладной гидродинамики и тепломассообмена (PHOENIX, FIRE, FLUENT, FLOW3D, STAR CD, FLACS, CFX и ряд других).

В стандартной  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности уравнения переноса кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации имеют следующий вид

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon ; \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = & \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \cdot \varepsilon}} + \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Высокореинольдсовая стандартная  $k$ - $\varepsilon$  модель не приспособлена для расчета вращающихся потоков, отрывных течений и осесимметричных струй. Известно, что данная модель несколько завышает значения коэффициента турбулентной вязкости в циркуляционных течениях, что приводит к быстрой диссипации турбулентных вихрей и, как следствие, уменьшению протяженности циркуляционной зоны.

Одним из главных ограничений стандартной  $k$ - $\varepsilon$  модели является завышение  $k$  около точки полного торможения потока, набегающего на стенки и другие твердые поверхности. Плохой прогноз стандартной  $k$ - $\varepsilon$  модели связан с фундаментальным предположением моделей вихревой вязкости, которые используются для вычисления тензора сдвиговых

напряжений  $-\overline{u'_i u'_j}$  и, следовательно, генерации  $k$ . Для того, чтобы преодолеть ограничение стандартной  $k$ - $\varepsilon$  модели, Като и Лаундером была предложена  $k$ - $\varepsilon$  модель, позволяющая устранить завышенную генерацию турбулентной кинетической энергии в точке полного торможения потока (точке застоя) путем применения следующего выражения для генерации  $k$  вследствие сдвиговых напряжений

$$G_k = \mu_t \bar{S}_{ij} \bar{\Omega}_{ij}, \quad (4.11)$$

где

$$\bar{S}_{ij} = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2}; \quad \bar{\Omega}_{ij} = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2}. \quad (4.12)$$

Таким образом, в области точки застоя, которая практически безвихревая, множитель  $\bar{\Omega}_{ij}$  равен нулю, и завышенная генерация турбулентности избегается; при простом сдвиге поведение потока не подвержено влиянию.

Существует версия  $k$ - $\varepsilon$  модели, полученная на основе теории ренормализованных групп и известная как RNG  $k$ - $\varepsilon$  модель. Данная модель имеет схожую со стандартной  $k$ - $\varepsilon$  моделью формулировку, но в  $\varepsilon$ -уравнение введено дополнительное слагаемое, которое улучшает точность решения высоконапряженных и искривленных потоков. Также используется аналитическая формула расчета эффективной вязкости для турбулентных потоков с низким числом Рейнольдса, и аналитически вычисляются турбулентные числа Прандтля для  $k$  и  $\varepsilon$ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon; \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = & \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \cdot \varepsilon}} + \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Полагается, что благодаря учету низкорейнольдсовых условий, RNG  $k$ - $\varepsilon$  модель позволит лучше прогнозировать тепломассообмен у стенки.

Различие между Realizable  $k$ - $\varepsilon$  моделью и другими двумя моделями состоит в том, что турбулентная вязкость определена из новой аналитической формулы, а уравнение для скорости диссипации  $\varepsilon$  выведено из точного уравнения переноса среднеквадратичных пульсаций вихря:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon; \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = & \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \cdot \varepsilon}}; \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} C_1 = \max \left[ 0,43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]; \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}; \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}; \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right); \\ G_k = \mu_t S^2; \quad G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho \text{Pr}_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}; \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}; \quad C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \cdot \eta}; \\ A_0 = 4,04; \quad A_s = \sqrt{6} \cdot \cos \phi; \quad \phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W); \quad W = \frac{S_{ij} \cdot S_{jk} \cdot S_{ki}}{S}. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Полагается, что Realizable  $k$ - $\varepsilon$  модель обеспечивает более достоверные результаты при описании плоских и круглых струй, пограничных слоев при наличии высоких обратных градиентов давления, отрывных течений, вращении, рециркуляции и сильном искривлении линии тока.

При расчете конкретных течений необходимо не только выбрать наиболее подходящую модель турбулентности, но и оценить степень достоверности полученных с ее помощью результатов. Для этого проводились многочисленные работы по тестированию моделей турбулентности на основе сравнения с результатами как полевых экспериментов по рассеянию газа, так и с данными лабораторных экспериментов.

Модели RANS нашли широкое распространение в отечественной и зарубежной практике и были использованы для анализа расчета рассеяния газа как на свободной поверхности, так и в условиях сложной геометрии. В общем случае модель RANS включает уравнение неразрывности (4.18), уравнения переноса импульса (4.19), энергии (4.21), примеси (4.22), замыкаемых  $k$ - $\varepsilon$  моделью турбулентности (см. выше):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = S_g; \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = & -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] - \\ & - \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{\rho u'_i u'_j}) + \rho g_i + F \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}; \quad (4.20)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda + C_P \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + Q; \quad (4.21)$$

$$\frac{\partial(\rho Y_g)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i Y_g)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \rho D_{m,g} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial Y_g}{\partial x_i} \right] + S_g. \quad (4.22)$$

Здесь  $\rho$  – плотность паровоздушной смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – время, с;  $u_i, u_j, u_k$  – компоненты осредненной скорости,  $i, j, k = 1, 2, 3$  ( $u_1, u_2, u_3$  – проекции вектора скорости на оси  $x, y$  и  $z$  соответственно), м/с;  $x_i, x_j, x_k$  – декартовы координаты,  $i, j, k = 1, 2, 3$  ( $x_1, x_2, x_3$  – координаты по направлению осей  $x, y$  и  $z$  соответственно), м;  $S_g$  – интенсивность источника примеси, отнесенная к единице объема, кг/(м<sup>3</sup>·с);  $P$  – давление, Па;  $\mu$  – коэффициент динамической молекулярной вязкости, кг/(м·с);  $F$  – изменение импульса несущего потока, обусловленное гидродинамическим сопротивлением аэрозольных частиц, Н/м<sup>3</sup>;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера (1 при  $i=j$  и 0 при  $i \neq j$ );  $g_i$  – компонент вектора гравитации в  $i$ -ом направлении, м/с<sup>2</sup>;  $k$  – турбулентная кинетическая энергия,

$\text{м}^2/\text{с}^2$ ;  $\mu_t$  – коэффициент динамической турбулентной вязкости,  $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$ ;  $h = C_p T$  – энтальпия газовой фазы,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $C_p$  – удельная теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $T$  – абсолютная температура,  $\text{К}$ ;  $Q$  – сток (поступление) энергии в газовой фазе вследствие фазовых переходов,  $\text{Дж}/(\text{м}^3\text{с})$ ;  $Y_g$  – массовая доля примеси в газовой фазе,  $\text{кг}/\text{кг}$ .

Другой распространенный подход моделирования турбулентности – это метод моделирования больших вихрей (Large-Eddy Simulation). Моделирование крупных вихрей, или сокращенно LES, означает моделирование, в котором крупные вихри рассчитываются, а мельчайшие вихри подсеточного масштаба (SGS) моделируются. Основной предпосылкой такого подхода является то, что наибольшие вихри, которые находятся под прямым воздействием граничных условий, несут максимум рейнольдсовых напряжений и должны быть рассчитаны. Мелкомасштабная турбулентность является слабой и поэтому представляется менее критичной. Также она близка к изотропной и имеет близкие к универсальным характеристики. Поэтому она в большей мере поддается моделированию.

Переменные раскладываются на две части: разрешимый компонент  $\bar{u}_i$  и компонент подсеточного масштаба (SGS)  $u'_i$ :

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i. \quad (4.23)$$

Данное разложение переменной позволяет осуществить процедура фильтрования. Самый простой тип фильтра – фильтр ящика, неявно включенный в схемах дискретизации методом конечных объемов, при котором осуществляется осреднение фильтруемой переменной по объему вычислительной ячейки:

$$\bar{u}_i = \frac{1}{\Delta x \Delta y \Delta z} \int_V u_i(x', y', z') dx' dy' dz', \quad (4.24)$$

где  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  – размеры вычислительной ячейки в  $x, y$  и  $z$  направлениях соответственно.

После фильтрования уравнений неразрывности и импульса, они приводятся к следующему виду

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0; \quad (4.25)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (4.26)$$

где напряжения подсеточного масштаба  $\tau_{ij}$  вычисляются по следующей формуле

$$\tau_{ij} = \overline{\rho u_i u_j} - \bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j. \quad (4.27)$$

Член  $\overline{\rho u_i u_j}$  является новым неизвестным, который показывает влияние мельчайших структур.

Напряжения подсеточного масштаба смоделированы, используя принцип вихревой вязкости,

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij}, \quad (4.28)$$

где  $\mu_t$  – турбулентная вязкость подсеточного масштаба;  $\bar{S}_{ij}$  – тензор скорости деформации, определяемый как

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right). \quad (4.29)$$

Вихревая вязкость может быть определена согласно модели Смагоринского

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}|, \quad (4.30)$$

где  $L_s$  – длина смешения для подсеточных масштабов;  $|\bar{E}| = \sqrt{2\bar{E}_{ij}\bar{E}_{ij}}$ .

$L_s$  может быть вычислена следующим образом

$$L_s = \min(kd, C_s V^{1/3}), \quad (4.31)$$

где  $k$  – константа Кармана;  $d$  – расстояние до ближайшей стенки;  $C_s$  – константа Смагоринского:  $0.1 < C_s < 0.24$ ;  $V$  – объем вычислительной ячейки.

Аналогично происходит фильтрование уравнений переноса скаляров (теплота, примесь). По сравнению со статистическими моделями турбулентности метод моделирования больших вихрей обладает некоторыми преимуществами:

- позволяет учитывать трехмерные эффекты, которые существенны в турбулентных процессах;
- модели турбулентности с масштабами, меньшими, чем шаг сетки, более универсальны;
- на определенном этапе исследований эти методы оказываются более простыми и, следовательно, более понятными, чем все более и более усложняющиеся статистические теории;
- намного проще выполняется расчет давления, который важен во многих приложениях.

Основным недостатком модели крупных вихрей является требование очень больших вычислительных ресурсов. С бурным развитием вычислительной техники сфера применения LES значительно возросла.

#### **4.3 Особенности численного моделирования рассеяния газообразного вещества с использованием пакетов вычислительной гидродинамики (CFD пакеты)**

Прогнозирование рассеяния газообразных веществ в атмосфере на основе численного моделирования, как правило, состоит из следующих основных этапов:

- 1) Построение трехмерной расчетной области, включая рельеф местности и близлежащие сооружения со сгущением узлов неравномерной структурированной сетки около нижней границы (при  $y=0$ ) и в области предполагаемого источника выброса (рис. 4.6).

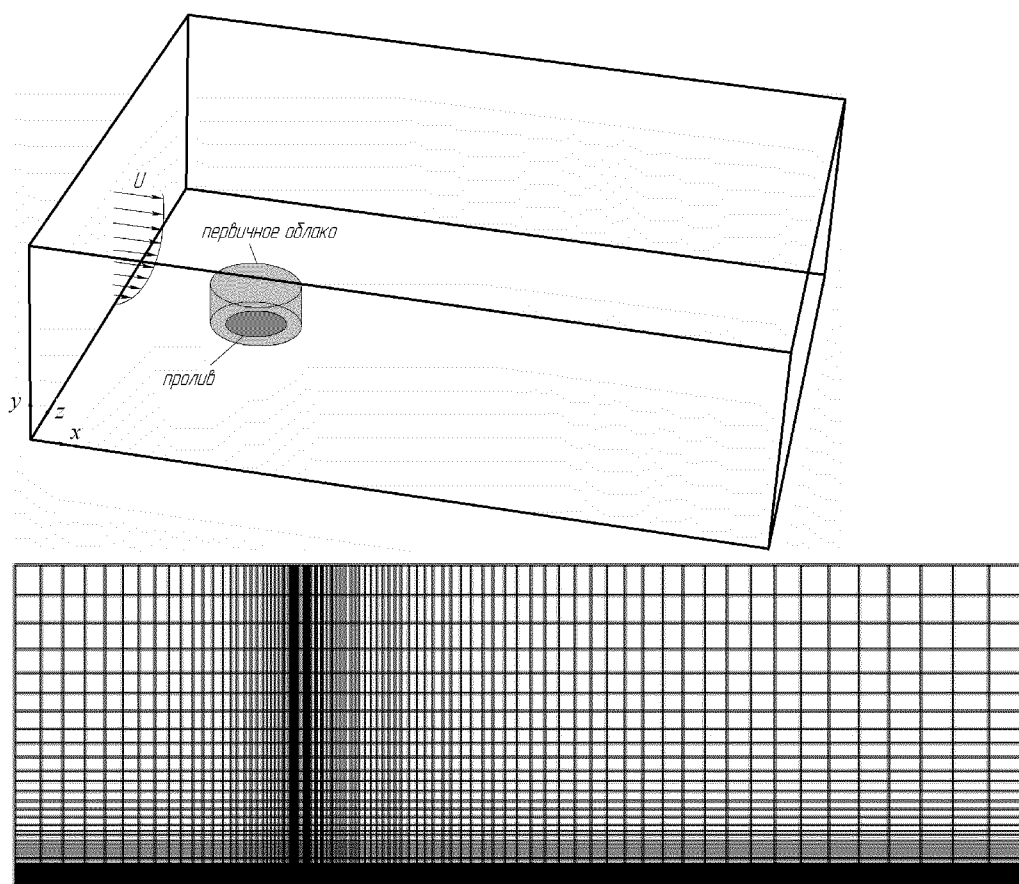


Рисунок 4.6. Геометрия расчетной области

2) Граничные условия, обычно используемые для численного моделирования, приведены ниже.

Входные граничные условия для расчетной области определяются условием Дирихле, иными словами, на границах задаются определенные значения. Для  $k$ - $\epsilon$  модели турбулентности необходимо задать компоненты скорости, кинетическую энергию турбулентности  $k$ , а также скорость её диссипации. Относительное давление на входе в расчетную область принимается равным нулю. Кроме того, для моделирования рассеяния необходимо задание значений концентраций и температуры. Компоненты скорости,  $k$ ,  $\epsilon$  и температура могут быть определены из теории подобия Монино-Обухова:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left[ \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) + \Phi_m \left( \frac{z}{L} \right) - 1 \right]; \quad (4.32)$$

$$T(z) = T_w + \frac{T_*}{\kappa} \left[ \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) + \Phi_m \left( \frac{z}{L} \right) - 1 \right] - \frac{g}{C_p} (z - z_0); \quad (4.33)$$

$$k(z) = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \sqrt{\frac{\Phi_h(z/L)}{\Phi_m(z/L)}}, \varepsilon(z) = \frac{u_*^3}{z\kappa} \Phi_h \left( \frac{z}{L} \right), T_* = \frac{u_*^2 T_w}{gL\kappa}, u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}, \quad (4.34)$$

где  $C_\mu=0.09$ ,  $\kappa=0.4$ , а для условий устойчивой стратификации атмосферы функции  $\Phi_m$  и  $\Phi_h$  имеют следующий вид

$$\Phi_m \left( \frac{z}{L} \right) = 1 + 5 \frac{z}{L}, \text{ при } z/L \geq 0;$$

$$\Phi_h \left( \frac{z}{L} \right) = 1 + 4 \frac{z}{L}, \text{ при } z/L \geq 0.$$

На выходной границе задается условие равенства нулю избыточного давления, а также значения температуры потока.

На боковых и верхней границах расчетной области задаются условия симметрии, то есть равенство нулю нормальной к границе компоненты скорости и нормальных производных остальных переменных величин.

Граничные условия на подстилающей поверхности основаны на условии прилипания, при котором все компоненты скорости принимаются равными нулю. Другие переменные устанавливаются в соответствии, с так называемыми, «пристеночными функциями» или «функциями стенки», которые исключают необходимость математического описания турбулентного пограничного слоя вблизи стенки и основаны на универсальном поведении пристеночных течений.

Пристеночные функции позволяют сформулировать граничные условия для скорости и турбулентных характеристик вдоль стенки (поверхности раздела фаз). Метод пристеночных функций обладает двумя очевидными достоинствами: позволяет экономить вычислительные ресурсы и учитывать влияние различных факторов, в частности, шероховатости за счет

введения эмпирической информации.

Универсальный закон стенки для гладкой поверхности, изображенный на рисунке 4.7 (пунктирная линия), использует безразмерные переменные  $u^+ = U/u_\tau$  и  $y^+ = \rho u_\tau y / \mu$ , где  $U$  – осредненная скорость тангенциальная к стенке.

Пристеночная область течения может быть разбита на три зоны: 1) вязкий подслой, в котором вязкие напряжения доминируют над рейнольдсовыми, и имеет место линейная зависимость скорости потока от расстояния от стенки:  $u^+ = y^+$ ; 2) буферный слой, где вязкие и рейнольдсовы напряжения имеют один порядок; 3) в логарифмическом слое рейнольдсовы напряжения намного превышают вязкие, а профиль скорости может быть представлен в виде логарифмического закона стенки:  $u^+ = \ln(y^+) / \kappa + B$ , где  $B$  – константа интегрирования.

Одно из важных свойств внутренней области течения заключается в том, что профиль скорости слабо зависит от числа Рейнольдса, продольного градиента давления и прочих внешних условий. Именно это свойство послужило основой для построения универсальных соотношений (пристеночных функций), связывающих параметры течения с расстоянием от стенки. Наряду с универсальностью профиля скорости во внутренней области, метод пристеночных функций опирается на использование гипотезы о локальном равновесии турбулентных пульсаций, а также свойства локальной изотропности диссипирующих вихрей.

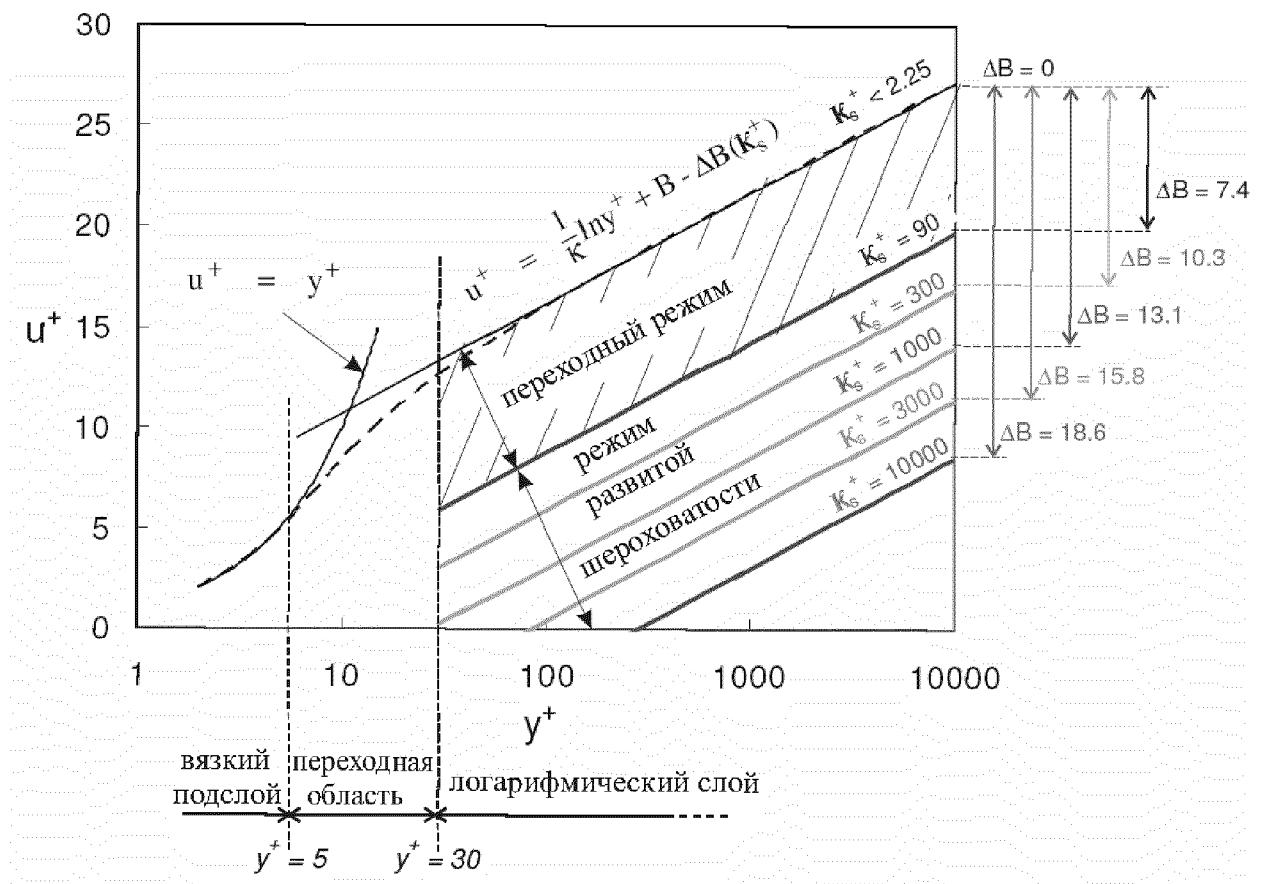


Рисунок 4.7. Закон стенки для гладкой и шероховатой поверхности в зависимости от безразмерной высоты шероховатости  $K_s^+$

Ламинарный закон справедлив при значениях  $y^+ < 5$ , а логарифмический закон при  $30 < y^+ < 500-1000$ . Модификация логарифмического закона стенки для шероховатых поверхностей базируется, главным образом, на обширных экспериментах для потоков в шероховатых, круглых трубах, которые были покрыты изнутри так плотно, насколько возможно, мельчайшими частицами песка (песочная шероховатость  $K_s$ ). Эксперименты показали, что распределения осредненной скорости у шероховатых стенок, изображенные в полулогарифмическом масштабе, как на рисунке 4.7, имеет тот же наклон ( $1/k$ ), как и у гладкой стенки, но различные пересечения с линейной осью полулогарифмической шкалы.

Смещение пересечения,  $\Delta B$ , как показано на рисунке 4.7, является функцией безразмерной высоты песчаной шероховатости  $K_s^+ = \rho K_s u_\tau / \mu$ ,

называемой также «безразмерной физической высотой шероховатости». Логарифмический закон для шероховатой стенки имеет вид

$$\frac{U}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{\rho u_\tau y}{\mu} \right) + B - \Delta B. \quad (4.35)$$

В программе FLUENT для учета влияния шероховатости подстилающей поверхности следует задать два параметра – высоту шероховатости  $K_s$  и константу шероховатости  $C_s$ . Функция шероховатости  $\Delta B$  принимает различные формы в зависимости от значения  $K_s^+$ . Различают три режима течения: гидродинамически гладкий ( $K_s^+ < 2,25$ ), переходный ( $2,25 \leq K_s^+ < 90$ ) и полностью шероховатый ( $K_s^+ > 90$ ). При полностью шероховатом режиме элементы шероховатости (препятствия) настолько велики, что ламинарный подслой исчезает, и поток рассматривается как независимый от молекулярной вязкости.

Используются следующие соотношения для расчета поправки  $\Delta B$

$$\Delta B = \begin{cases} 0 & \text{при } z_{0l}^+ < 2,25 \\ \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{z_{0l}^+ - 2,25}{87,75} + C_z \cdot z_{0l}^+ \right) \cdot \sin \{0,4258 \cdot (\ln z_{0l}^+ - 0,811)\} & \text{при } 2,25 < z_{0l}^+ < 90. \\ \frac{1}{\kappa} \ln(1 + C_z \cdot z_{0l}^+) & \text{при } z_{0l}^+ > 90 \end{cases}$$

Согласно теории атмосферного пограничного слоя распределение осредненной горизонтальной скорости в приземном слое при нейтральной стратификации атмосферы описывается логарифмической зависимостью

$$\frac{U}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{y}{y_0} \right). \quad (4.36)$$

Запишем константу интегрирования в уравнении (4.35) как  $B = \ln(E)/\kappa$ . Тогда уравнение (4.36) будет иметь вид

$$\frac{U}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{\rho u_\tau y}{\mu} \right) + \frac{1}{\kappa} \ln(E) - \Delta B. \quad (4.37)$$

Для полностью шероховатого режима ( $K_s^+ > 90$ ):

$$\frac{U}{u_{\tau}} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{\rho u_{\tau} y}{\mu} \right) + \frac{1}{\kappa} \ln(E) - \frac{1}{\kappa} \ln(1 + C_s K_s^+). \quad (4.38)$$

Так как для полностью шероховатого режима произведение  $C_s K_s^+$  намного больше 1, то из этого следует

$$\begin{aligned} \frac{U}{u_{\tau}} &\approx \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{\rho u_{\tau} y}{\mu} \right) + \frac{1}{\kappa} \ln(E) - \frac{1}{\kappa} \ln \left( C_s \frac{\rho K_s u_{\tau}}{\mu} \right); \\ \frac{U}{u_{\tau}} &= \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{E y}{C_s K_s} \right). \end{aligned} \quad (4.39)$$

Сравнивая последнее выражение с уравнением (4.35), получим зависимость, связывающую высоту песочной шероховатости  $K_s$  с высотой аэродинамической шероховатости  $z_0$ :  $C_s K_s \approx E y_0$ , причем константа  $E$  в законе стенки имеет значение 9,793.

Значения аэродинамической шероховатости для различных типов местности представлены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Характерный размер шероховатости поверхности в зависимости от типа местности

| Местность                                          | Характерный размер аэродинамической шероховатости поверхности $y_0$ , м |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Лед, равнина, покрытая грязью                      | $10^{-5} \div 3 \cdot 10^{-5}$                                          |
| Водные поверхности                                 | $3 \cdot 10^{-5} \div 0,0002$                                           |
| Поверхность пустыни                                | $0,0002 \div 0,001$                                                     |
| Скошенная трава                                    | $0,001 \div 0,01$                                                       |
| С/хоз. угодья с редкими деревьями, зданиями и т.д. | $0,01 \div 0,04$                                                        |
| Большое количество деревьев и/или кустарников      | $0,04 \div 0,1$                                                         |
| Леса, окраины города                               | $0,1 \div 1$                                                            |
| Города                                             | $1 \div 4$                                                              |

Необходимым условием использования пристеночных функций является достаточное удаление расчетного узла  $P$  от  $w$  (рисунок 4.8) для того, чтобы первый попал в область турбулентного ядра пограничного слоя. К тому же необходимо учитывать, чтобы расстояние до соседнего узла расчетной сетки превышало высоту шероховатости.

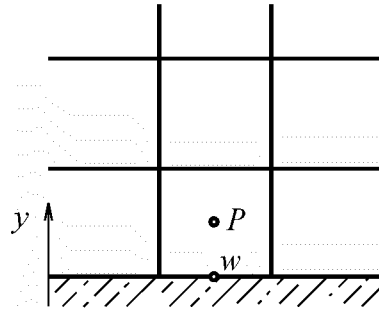


Рисунок 4.8. Расположение пристеночного узла расчетной сетки

Для определения значения  $k$  в пристенной ячейке решается уравнение для  $k$  с граничным условием  $\partial k / \partial n = 0$ . Кроме предположения о логарифмическом профиле скорости в основе пристеночных функций лежат нижеследующие физические предположения для логарифмической области пограничного слоя ( $30 < y^+ < 100$ ):

1. Формула Колмогорова для определения вихревой вязкости

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (4.40)$$

2. Постоянство касательного напряжения

$$\rho u_\tau^2 = \tau_w = (\mu + \mu_t) \frac{\partial U}{\partial y} \approx \mu_t \frac{\partial U}{\partial y}. \quad (4.41)$$

3. Гипотеза о локальном равновесии генерации и диссипации кинетической энергии турбулентности

$$G_k = \nu_t \left( \frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 \approx \varepsilon. \quad (4.42)$$

При помощи несложных преобразований из (4.40) – (4.42) можно

получить

$$k = \frac{u_{\tau}^2}{C_{\mu}^{0.5}}; \quad \varepsilon = \frac{u_{\tau}^3}{\kappa y}.$$

Генерация турбулентной кинетической энергии  $G_k$  и скорость ее диссипации  $\varepsilon$  в пристенных ячейках определяются из соотношений

$$G_k = \tau_w \frac{\tau_w}{\kappa \rho C_{\mu}^{0.25} k^{0.5}}; \quad (4.43)$$

$$\varepsilon = \frac{C_{\mu}^{0.75} k_P^{1.5}}{\kappa y_P}. \quad (4.44)$$

Метод пристеночных функций обладает двумя очевидными достоинствами: позволяет экономить вычислительные ресурсы и учитывать влияние различных факторов, в частности, шероховатости за счет введения эмпирической информации.

Различные условия устойчивости атмосферы могут быть смоделированы путем определения температуры или теплового потока на нижней границе, где отрицательные потоки соответствуют устойчивым условиям, а положительные потоки соответствуют неустойчивым условиям.

3) Инициализация решений. Перед запуском на расчет необходимо провести инициализацию задачи, то есть задать начальные приближения для переменных в узлах внутри области. Некорректное задание начальных приближений может сказаться на сходимости итерационного решения, поэтому при выполнении данного этапа следует опираться на опыт расчетчика или рекомендации, указанные в сопроводительной документации пакета. При решении нестационарной задачи образования и распространения паровоздушного облака в качестве начального приближения использовались результаты уже полученного решения поля ветра.

4) Обработка полученных результатов. На данном этапе проводится оценка размеров опасных зон на основании расчетного распределения концентраций примеси в расчетной области.

#### 4.4 Примеры по главе 4

##### **Пример 4.1 Провести оценку последствий при залповом выбросе аммиака в окружающую среду**

*Исходные данные:*

С использованием гауссовской модели рассеяния необходимо провести оценку последствий на расстоянии до 350 м залпового аварийного выброса сжиженного аммиака из ёмкости объемом  $2 \text{ м}^3$  с коэффициентом заполнения  $\alpha=0,8$  на бетонную площадку площадью  $25 \text{ м}^2$ , при окружающей температуре  $32^\circ\text{C}$ . Давление в аппарате принять равным давлению насыщенных паров содержащегося вещества. Скорость ветра принять равной  $1 \text{ м/с}$ , состояние атмосферы - инверсия. Определить на каких расстояниях от пролива будут достигнуты пороговые и летальные значения токсодозы, которые для аммиака составляют соответственно  $15000$  и  $150000 \text{ мг}\cdot\text{мин}/\text{м}^3$ . Физические свойства веществ и материалов представлены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Физические свойства веществ и материалов

| Параметр                                                                                                   | Значение  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Плотность аммиака при температуре кипения $T_{\text{кип}}$ ,<br>$\rho_{\text{ж}}$ , $\text{кг}/\text{м}^3$ | 680       |
| Удельная теплота парообразования $\Delta H$ , $\text{Дж}/\text{кг}$                                        | 1 270 000 |
| Температура кипения $T_{\text{кип}}$ , $\text{K}$                                                          | 239,57    |
| Удельная теплоемкость $C_{\text{р,ж}}$ , $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$                              | 4600      |
| Молярная масса $M$ , $\text{кг}/\text{кмоль}$                                                              | 17        |
| Универсальная газовая постоянная $R$ , $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{кмоль})$                            | 8310      |
| Показатель адиабаты аммиака $\gamma$                                                                       | 1,313     |

Для учебных целей расчет производим по Методике ТОКСИ ред.2.2 [55]. В основе данной методики лежит гауссовская модель рассеивания.

*Решение:*

### 1. Расчет параметров источника

Количество жидкости, мгновенно вскипающей при разгерметизации оборудования, вычисляется по формуле (3.13)

$$G_{\text{мгн}} = 1088 \left( 1 - \exp \left( - \frac{4600((273 + 32) - 239,57)}{1270000} \right) \right) = 229,57 \text{ кг},$$

где  $m_{\text{жс}} = 1088 \text{ кг}$ .

В результате мгновенного вскипания жидкости происходит дробление жидкой фазы на фрагменты, потеря устойчивости последних с образованием более мелких капель - аэрозолей. Количество вещества, переходящего в первичное облако в виде аэрозолей (3.15)

$$G_{\text{жс}} = \min \{ 229,57; 858,43 \} = 229,57 \text{ кг}.$$

Давление насыщенных паров  $P_{\text{н}}$  для однокомпонентных жидкостей определяется (2.9)

$$P_{\text{н}} = 101325 \cdot \exp \left( \frac{1270000 \cdot 17}{8310} \left( \frac{1}{239,57} - \frac{1}{273 + 32} \right) \right) = 1037736 \text{ Па}.$$

Количество вещества, содержащееся в оборудовании в виде парогазовой смеси, будет равно (3.12)

$$G_{\text{св}} = (1 - 0,8) \frac{17}{8310} \frac{1037736 \cdot 2}{273 + 32} = 2,78 \text{ кг}.$$

Далее определяем площадь пролива  $F_{\text{ж}}$ , принимая, что оставшаяся после мгновенного вскипания и перехода в аэрозоль жидкость растекается на подстилающей поверхности с образованием слоя толщиной  $h_{\text{сл}} = 0,05 \text{ м}$ :

$$F_{\text{жс}} = (m_{\text{жс}} - G_{\text{мгн}} - G_{\text{жс}}) / \rho_{\text{жс}} / h_{\text{сл}};$$

$$F_{\text{жс}} = (1088 - 229,57 - 229,57) / 680 / 0,05 = 18,5 \text{ м}^2.$$

Затем переводим давление: 1 мм. рт. ст. = 133,3 Па, значит  $P_H = 1037736 / 133,3 = 7785$  мм.рт.ст., которое подставляем в уравнение для определения времени кипения:

$$\sqrt{t_{\text{кип}}} = \min \left\{ \frac{\left( T_a - T_{\text{кип}} + |T_a - T_{\text{кип}}| \right) \varepsilon}{2\Delta H} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi} \sqrt{M} \cdot 10^{-6} (5,83 + 4,1U) P_H} ; \sqrt{\frac{2\sqrt{F_{\text{ж}}}}{U}} \right\};$$

$$\sqrt{t_{\text{кип}}} = \min \left\{ \frac{(305 - 239,57 + |305 - 239,57|) \cdot 17292}{2 \cdot 1270000} \cdot \frac{1}{\sqrt{3,14} \cdot \sqrt{0,017 \cdot 10^{-6} (5,83 + 4,1 \cdot 1) \cdot 7785}} = 4,99 ; \sqrt{\frac{2 \cdot \sqrt{18,5}}{1}} = 2,93 \right\} = 2,93.$$

где молекулярная масса подставляется в единицах измерения [кг/моль] – для аммиака 0,017 кг/моль;  $\varepsilon = \sqrt{1,3 \cdot 2300 \cdot 1000} = 1729,2$  (для бетона  $\lambda_{\text{под}} = 1,3$  Вт/(м·К),  $\rho_{\text{под}} = 2300$  кг/м<sup>3</sup>,  $C_{P,\text{под}} = 1000$  Дж/(кг·К)).

Количество пара, образующегося в результате теплообмена с подстилающей поверхностью,  $G_{\text{кип}}$  рассчитывается по формуле:

$$G_{\text{кип}} = \min \left\{ \frac{\left( T_0 - T_{\text{кип}} + |T_0 - T_{\text{кип}}| \right) \varepsilon}{\Delta H} \cdot \frac{F_{\text{под}}^2}{\sqrt{\pi} F_{\text{ж}}} \sqrt{t_{\text{кип}}} ; m_{\text{ж}} - G_{\text{мгн}} - G_{\text{ж}} \right\};$$

$$G_{\text{кип}} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{(305 - 239,57 + |305 - 239,57|) \cdot 1729,2 \cdot \frac{25^2}{\sqrt{3,14} \cdot 18,5} \cdot 2,93}{1270000} = 9,95; \\ 1088 - 229,57 - 229,57 = 628,86 \end{array} \right\} = 9,95 \text{ кг.}$$

Общая масса первичного облака будет равна

$$m_0 = G_{\text{мгн}} + G_{\text{ж}} + G_{\text{св}} + G_{\text{кип}};$$

$$m_0 = 229,57 + 229,57 + 2,78 + 9,95 = 471,87 \text{ кг.}$$

Определим расход опасного химического вещества во вторичном облаке, образующемся при испарении из пролива,

$$q_{\text{исп}} = F_{\text{жс}} \sqrt{M} \cdot 10^{-6} (5,83 + 4,1 \cdot U) \cdot P_{\text{н}};$$

$$q_{\text{исп}} = 18,5 \cdot \sqrt{0,017} \cdot 10^{-6} \cdot (5,83 + 4,1 \cdot 1) \cdot 7785 = 0,18 \text{ кг/с},$$

где размерность  $P_{\text{н}}$  – мм. рт. ст.;  $M$  – кг/моль.

Определим время испарения жидкости из пролива исходя из расхода ОХВ и массы оставшегося вещества после мгновенного вскипания:

$$\tau_{\text{исп}} = (m_{\text{жс}} - G_{\text{мгн}} - G_{\text{жс}}) / q_{\text{исп}};$$

$$\tau_{\text{исп}} = (1088 - 229,57 - 229,57) / 0,18 = 3494 \text{ с.}$$

## 2. Расчет зон токсического поражения

Концентрация при прохождении первичного облака определяется по следующим зависимостям

$$c(x, y, z, t) = \frac{m_0}{\left( \frac{8}{3} \cdot \pi \cdot R^3 + (2\pi)^{3/2} \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \right)} \cdot G(x, y, z, t);$$

$$G(x, y, z, t) = \exp \left( -\frac{(x - Ut)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right) \left\{ \exp \left( -\frac{(z - h)^2}{2\sigma_z^2} \right) + \exp \left( -\frac{(z + h)^2}{2\sigma_z^2} \right) \right\}.$$

При вычислениях используются значения  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ , рассчитанные по формулам

$$\sigma_x = \frac{C_3 x}{\sqrt{1 + 0,0001x}};$$

$$\sigma_y = \begin{cases} \sigma_x \cdot \frac{220,2 \cdot 60 + x/U}{220,2 \cdot 60 + 600}, & x/U \geq 600 \\ \sigma_x, & x/U < 600 \end{cases};$$

$$\sigma_z = f(z_0, x)g(x),$$

где

$$g(x) = \frac{A_1 \cdot x^{B_1}}{1 + A_2 \cdot x^{B_2}};$$

$$f(z_0, x) = \begin{cases} \ln[C_1 \cdot x^{D_1} (1 + C_2 \cdot x^{D_2})], & z_0 < 0,1 \text{ м} \\ \ln[C_1 x^{D_1} / (1 + C_2 x^{D_2})], & z_0 \geq 0,1 \text{ м} \end{cases},$$

где  $z_0$  – шероховатость поверхности, принимаем равной 1 см (для местности с высотой травы до 15 см), соответственно коэффициенты  $C_1=1,56$ ,  $C_2=0,000625$ ,  $D_1=0,048$ ,  $D_2=0,45$ . Величины коэффициентов  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C_3$  зависят от класса стабильности атмосферы, для случая инверсии они равны 0,0609, 0,00196, 0,895, 0,684, 0,06 соответственно.

Максимальная концентрация при прохождении первичного облака наблюдается на оси  $y=0$ ,  $z=0$  в центре облака и составит

$$c_{\max}(x, 0, 0, t = x/U) = \frac{2m_0}{\left( \frac{8}{3} \cdot \pi \cdot R^3 + (2\pi)^{3/2} \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \right)} \cdot G_0(x),$$

$$G_0(x) = \left\{ \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\}, \text{ где } h - \text{высота выброса, принимаем равной 1 м.}$$

Максимальная составляющая токсодозы на поверхности земли при прохождении первичного облака равна

$$D_{\max}(x, 0, 0) = \frac{2m_0 (2\pi)^{1/2} \sigma_x}{U \left( \frac{8}{3} \cdot \pi \cdot R^3 + (2\pi)^{3/2} \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \right)} \cdot G_0(x).$$

Радиус первичного облака в начальный момент времени определяется по формуле

$$R = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} \frac{m_0}{\rho_{\text{выб}}}};$$

$$R = \sqrt[3]{\frac{3}{4 \cdot 3,14} \cdot \frac{471,87}{1324,274}} = 0,44 \text{ м},$$

где плотность опасного химического вещества в первичном облаке в начальный момент времени  $\rho_{\text{выб}}$  рассчитывается по формуле

$$\rho_{\text{выб}} = \begin{cases} \rho_{\text{кип}} \frac{m_0}{G_{\text{св}} + G_{\text{кип}} + G_{\text{мгн}}}, T_0 > T_{\text{кип}} \\ \frac{M}{R} \cdot \frac{P}{T} \left( \frac{P_0}{P} \right)^{1/\gamma}, \text{ в остальных ситуациях} \end{cases}.$$

Поскольку в рассматриваемом случае температура окружающей среды превышает температуру кипения, то

$$\rho_{\text{выб}} = \rho_{\text{кип}} \frac{m_0}{G_{\text{св}} + G_{\text{кип}} + G_{\text{мгн}}};$$

$$\rho_{\text{кип}} = \frac{M}{V_M} \cdot \frac{273}{T_{\text{кип}}},$$

где  $\rho_{\text{кип}}$  – плотность газа при температуре кипения;  $V_M$  – молярный объем газа, равный 22,4 л/моль.

$$\rho_{\text{кип}} = \frac{0,017}{22,4} \cdot \frac{273}{239,57} = 0,000865 \text{ кг/л или } 0,865 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{\text{выб}} = 0,865 \frac{471,87}{2,78 + 9,95 + 229,57} = 1,685 \text{ кг/м}^3.$$

Максимальная концентрация при прохождении вторичного облака, образующегося при испарении ОХВ из пролива,

$$c_{\text{max}}^u(x, 0, 0) = \begin{cases} \frac{2G_{\text{исп}}}{(2G_{\text{исп}}/\rho_{\text{исп}} + 2\pi\sigma_y\sigma_zU)} \cdot G_0(x), x \leq \frac{1}{(C_3\sqrt{2\pi})}Ut_{\text{исп}} \\ \frac{2G_{\text{исп}}t_{\text{исп}}}{(2G_{\text{исп}} \cdot t_{\text{исп}}/\rho_{\text{исп}} + (2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z)} \cdot G_0(x), x > \frac{1}{(C_3\sqrt{2\pi})}Ut_{\text{исп}} \end{cases},$$

где плотность опасного химического вещества в начальный момент во вторичном облаке

$$\rho_{\text{исп}} = \rho_{\text{кип}} = \rho(T_{\text{кип}}, P_0) = 680 \text{ кг/м}^3.$$

Максимальная составляющая токсодозы на поверхности земли при прохождении вторичного облака, образующегося при испарении опасного химического вещества из пролива

$$D_{\text{max}}^u(x, 0, 0) = \begin{cases} \frac{2G_{\text{исп}} \min(t_{\text{исп}}, t_{\text{эксп}})}{(2G_{\text{исп}}/\rho_{\text{исп}} + 2\pi U \sigma_y \sigma_z)} \cdot G_0(x), & x \leq \frac{1}{(C_3 \sqrt{2\pi})} U t_{\text{исп}} \\ \frac{2q_{\text{исп}} t_{\text{исп}} (2\pi)^{1/2}}{U(2G_{\text{исп}} \cdot t_{\text{исп}}/\rho_{\text{исп}} + (2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z)} \cdot G_0(x), & x > \frac{1}{(C_3 \sqrt{2\pi})} U t_{\text{исп}} \end{cases}.$$

Время экспозиции принимаем равным 1800 сек, время испарения равно 3494 сек, тогда  $U t_{\text{исп}} / (C_3 \sqrt{2\pi}) = 1 \cdot 3494 / (0,06 \sqrt{2 \cdot 3,14}) = 23235,4$ , следовательно для определения максимальной концентрации и токсодозы необходимо использовать следующие зависимости

$$c_{\text{max}}^u(x, 0, 0) = \frac{2G_{\text{исп}}}{(2G_{\text{исп}}/\rho_{\text{исп}} + 2\pi \sigma_y \sigma_z U)} \cdot G_0(x);$$

$$D_{\text{max}}^u(x, 0, 0) = \frac{2G_{\text{исп}} \min(t_{\text{исп}}, t_{\text{эксп}})}{(2G_{\text{исп}}/\rho_{\text{исп}} + 2\pi U \sigma_y \sigma_z)} \cdot G_0(x).$$

Для того, чтобы получить токсодозу в размерности [мг·мин/м³], полученное значение умножаем на 1000000 (кг→мг) и делим на 60 (с→мин).

Суммарные концентрация и токсодоза в точке определяются по следующим зависимостям

$$c = c_{\text{max}} + c_{\text{max}}^u; \quad D = D_{\text{max}} + D_{\text{max}}^u.$$

Результаты расчетов представим в виде графиков (см. ниже), из которых видно, что пороговые значения токсодозы (суммарные для первичного и вторичного облака) достигаются на расстоянии до 500 м от пролива, а летальные значения достигаются на расстоянии до 150 м от пролива.

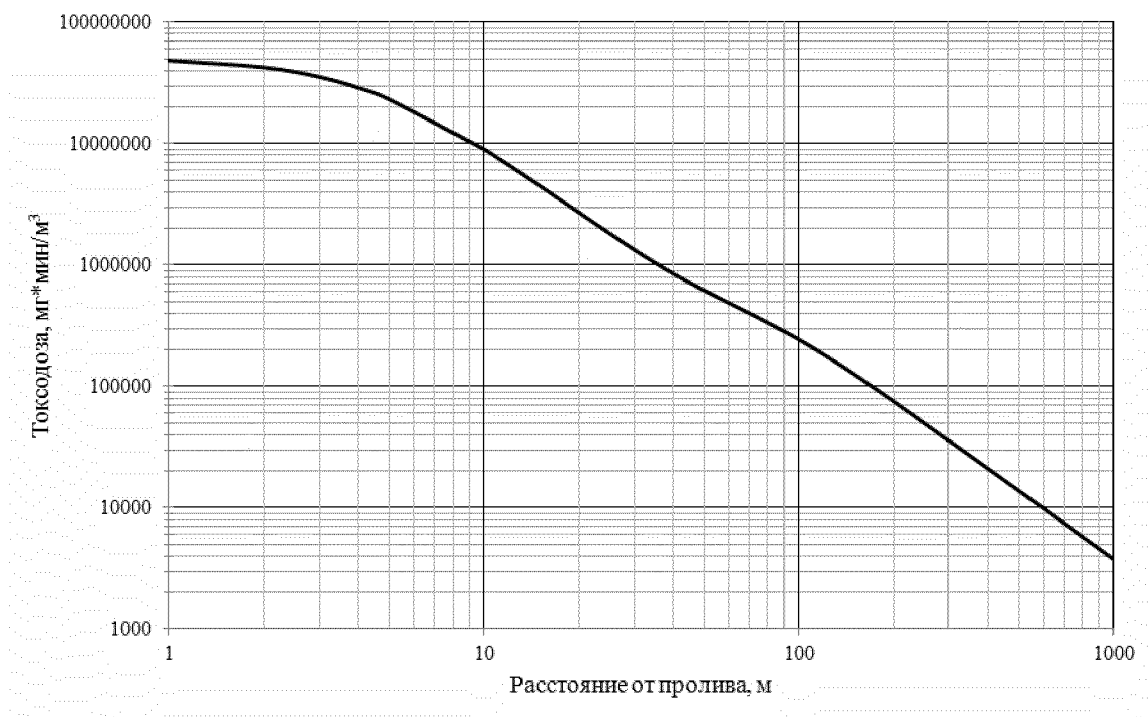


Рисунок 4.9. Суммарные значения токсодозы в зависимости от расстояния до пролива

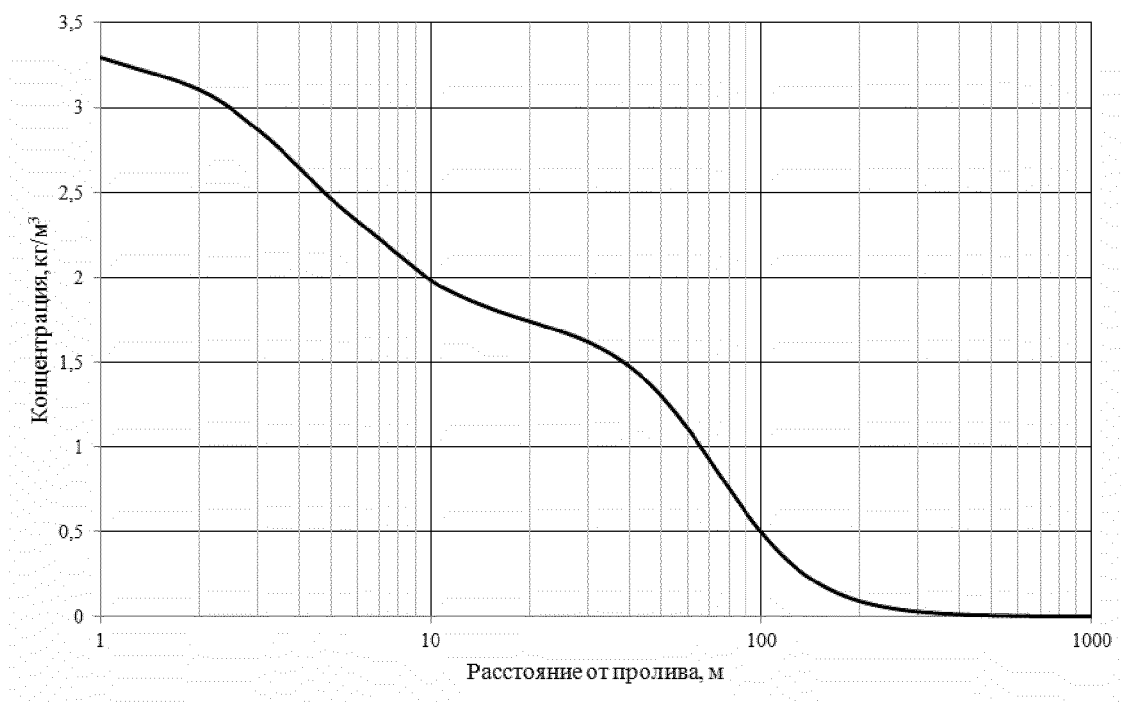


Рисунок 4.10. Суммарные значения концентрации аммиака в зависимости от расстояния до пролива

**Пример 4.2 Провести оценку последствий при аварийном поступлении аммиака из отверстия в резервуаре в окружающую среду**

*Исходные данные:*

С использованием гауссовской модели атмосферной диффузии (рассеяния) необходимо провести оценку последствий аварийного выброса на расстоянии до 350 м при разгерметизации хранилища с газообразным аммиаком, истекающего из отверстия диаметром 10 мм. Аммиак содержится при температуре 32°C и давлении  $P_0=1,2$  МПа. Скорость ветра принять равной 1 м/с, состояние атмосферы - инверсия. Определить: на каких расстояниях от пролива будут достигнуты пороговые и летальные значения токсодозы, которые для аммиака составляют соответственно 15000 и 150000 мг·мин/м<sup>3</sup>. Физические свойства веществ и материалов представлены в табл. 4.6.

*Решение:*

Определим давление внутри сосуда, при котором скорость газа будет критической по уравнению (1.14),

$$\frac{P_A}{P_0} = \left( \frac{2}{1,313+1} \right)^{\frac{1,313}{1,313-1}} = 0,544 ;$$

$$P_{\text{crit}} = 101325 / 0,544 = 186259 \text{ Па} = 0,18 \text{ МПа} .$$

Поскольку давление в аппарате превышает критическое ( $P_0 > P_{\text{crit}}$ ) , то расход газа определяется по формуле (1.16) для сверхкритического истечения, где площадь сечения отверстия  $S_0 = 3,14 \cdot 0,01^2 / 4 = 0,0000785 \text{ м}^2$  ;

$$\text{плотность аммиака } \rho_r = \frac{17}{22,4} \cdot \frac{273}{(273+32)} \cdot \frac{1200000}{101325} = 8,05 \text{ кг/м}^3 .$$

Таким образом, расход газа будет равен (1.16)

$$G = 0,0000785 \cdot 0,8 \cdot \left[ 1200000 \cdot 8,05 \cdot 1,313 \cdot \left( \frac{2}{1,313+1} \right)^{\frac{1,313+1}{1,313-1}} \right]^{\frac{1}{2}} = 0,13 \text{ кг/с} .$$

Начальный размер облака, образующегося при истечении газообразного ОХВ из разрушенного оборудования, по формуле

$$R_{\text{нач}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \frac{G}{\rho_{\text{нач}} \cdot U}};$$

$$R_{\text{нач}} = \sqrt{\frac{1}{3,14} \cdot \frac{0,13}{1,23 \cdot 1}} = 0,18 \text{ м};$$

$$\rho_{\text{нач}} = \rho_{\text{г}} \cdot \left( \frac{P_a}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}};$$

$$\rho_{\text{нач}} = 8,05 \cdot \left( \frac{101325}{1200000} \right)^{\frac{1}{1,313}} = 1,4 \text{ кг/м}^3,$$

где  $\rho_{\text{нач}}$  - плотность газа в начальный момент выброса.

Максимальная концентрация при прохождении облака наблюдается на оси  $y=0, z=0$  и вычисляется по формуле

$$c_{\text{max}}(x, 0, 0) = \frac{2 \cdot G}{U(2\pi \cdot (R)^2 + 2\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z)} \cdot G_0(x),$$

$$G_0(x) = \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right), \text{ где } h - \text{высота выброса, принимаем равной } 1 \text{ м.}$$

Максимальная составляющая токсодозы за время истечения 1800 сек. на поверхности земли при прохождении облака

$$D_{\text{max}}(x, 0, 0) = \frac{2G \cdot t_{\text{истеч}}}{U(2\pi \cdot (R)^2 + 2\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z)} \cdot G_0(x).$$

Для того чтобы получить токсодозу в размерности  $[\text{мг} \cdot \text{мин}/\text{м}^3]$ , полученное значение умножаем на 1000000 ( $\text{кг} \rightarrow \text{мг}$ ) и делим на 60 ( $\text{с} \rightarrow \text{мин}$ ).

Результаты расчетов представим в виде графических зависимостей (см. ниже), из которых видно, что пороговые значения токсодозы достигаются на расстоянии до 250 м от пролива, а летальные значения достигаются на расстоянии до 75 м от пролива.

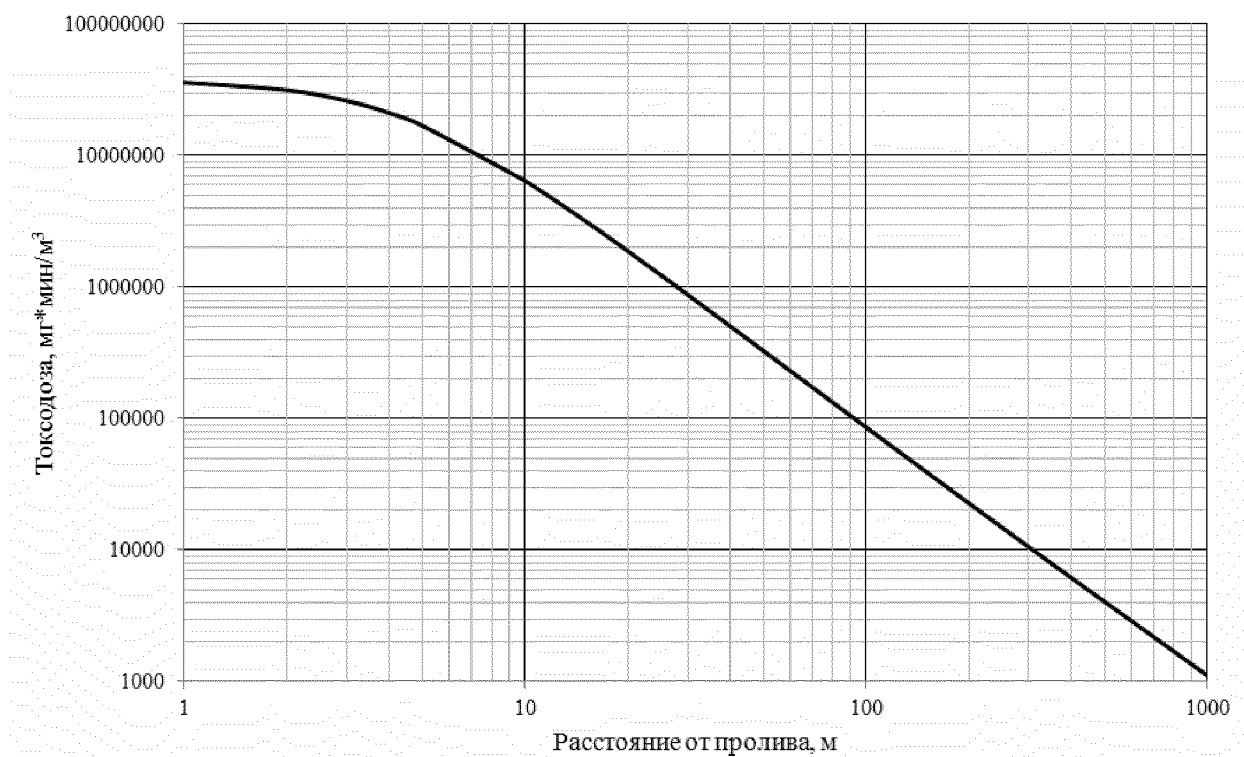


Рисунок 4.11. Значения токсодозы в зависимости от расстояния до пролива

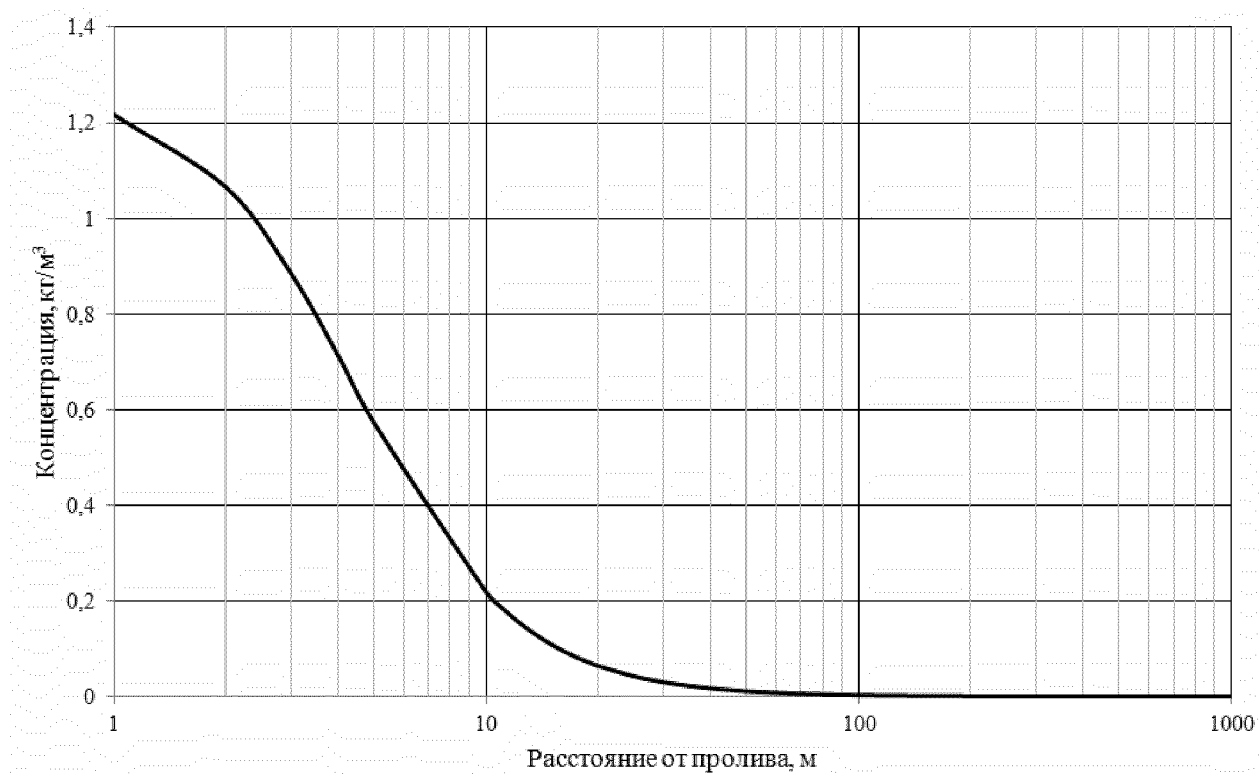


Рисунок 4.12. Значения концентрации аммиака в зависимости от расстояния до пролива

## ГЛАВА 5 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ВЫБРОСА В АТМОСФЕРЕ

### 5.1 Механизмы образования аэрозолей при аварийных выбросах

В разделе 3 упоминалось, что причиной образования аэрозолей при аварийных выбросах перегретых жидкостей является мгновенное вскипание (явление BLEVE).

Термодинамическое диспергирование происходит, когда жидкость перегрета относительно атмосферных условий, при этом степень перегрева определяется как  $\Delta T_{\text{пер}} = T_0 - T_n(P_a)$ , где  $T_0$  – температура жидкости в оборудовании. Расширяющиеся пары диспергируют и увлекают часть жидкости, поэтому образующееся облако содержит смесь пара и жидкости в виде аэрозольных капель. Как показывают эксперименты, парообразование перегретой жидкости даже при небольших перепадах температуры (превышающих 7–10% от абсолютной температуры кипения) сопровождается ее дроблением на дисперсные капли.

Механизм диспергирования вследствие мгновенного вскипания является основным при выбросах сжиженного хлора и аммиака из сосудов под давлением. Метод для оценки размера капель, образующихся вследствие мгновенного вскипания, предложен в работе [32]. Согласно данному методу размер капель является функцией неполной энергии расширения  $E_p$  (Дж/кг):

$$E_p = -\Delta h - v_n(P_n - P_a) + v_n|P_1 - P_n|, \quad (5.1)$$

где  $\Delta h$  – изменение энтальпии от выхода до зоны расширения;  $P_n$  – давление насыщения при температуре хранения, Па;  $v_n$  – удельный объем смеси при  $T(P_a)$ , м<sup>3</sup>/кг;  $P_1$  – давление на выходе из отверстия разгерметизации.

Диаметр капли  $d_p$  (м) в зависимости от неполной энергии расширения равен

$$\begin{aligned}
d_p \times 10^6 &= 1000 & E_p < 0,1 \\
d_p \times 10^6 &= 833 - 73,4 \ln(E_p) & 0,1 < E_p < 6000 \\
d_p \times 10^6 &= 498 - 43,0 \ln(E_p) & 6000 < E_p < 15000 \\
d_p \times 10^6 &= 0,85 & 15000 < E_p
\end{aligned} \tag{5.2}$$

Другой механизм образования аэрозолей – распад струи при истечении жидкости из отверстия разгерметизации. Струя жидкости при истечении из отверстия дестабилизируется силами трения, возникающими между воздухом и поверхностью жидкости. Эти аэродинамические силы вызывают возмущения на поверхности струи. Если эти возмущения достаточно велики, чтобы преодолеть энергию поверхностного натяжения струи, то струя распадается. Этот распад приводит к формированию несферических фрагментов, известных как лигаменты, которые распадаются далее до тех пор, пока не станут малы настолько, чтобы сформировать устойчивые сферические капли.

Процесс распыления можно разделить на три зоны, как показано на рисунке 5.1: АВ представляет плотную струю, ВС – область диспергирования и CD – зона полного распыления.

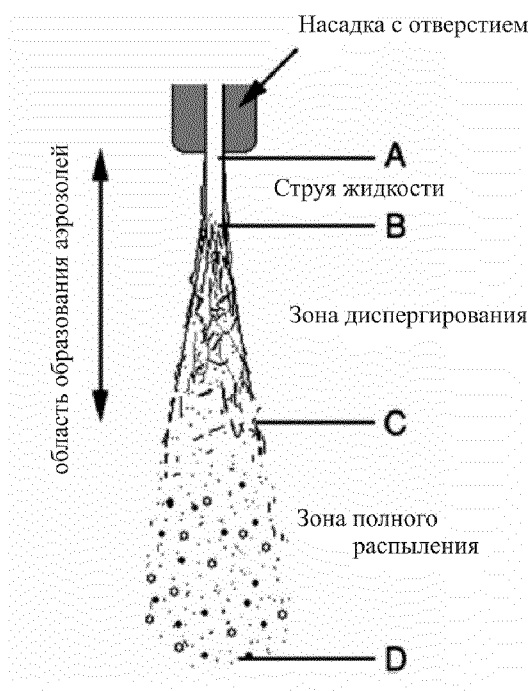


Рисунок 5.1. Схема диспергирования струи

После начального дробления жидкости устойчивость и дальнейшая эволюция образующихся капель определяется числом Вебера, построенным по диаметру капли:

$$We = \frac{\rho_a \cdot v^2 \cdot d_p}{\sigma_p}. \quad (5.3)$$

Здесь  $v$  – скорость истечения струи, м/с;  $\sigma_p$  – коэффициент поверхностного натяжения материала капли, Н/м.

Высокие числа Вебера указывают на преобладание сдвиговых сил над силами поверхностного натяжения, при которых струя неустойчива и диспергируется. При низких числах Вебера преобладают силы поверхностного натяжения, и струя устойчива либо из-за того, что скорость достаточно низкая, чтобы вызвать распад, или большая часть струи была уже диспергирована на устойчивые капли. Если число Вебера ниже критического  $We_{crit}$ , то дробление на капли не происходит.

Предположение о механическом диспергировании приводит к следующей оценке среднего диаметра капли,  $\bar{d}_p$  (м)

$$\bar{d}_p = We_{crit} \frac{\sigma_p}{\rho_a v^2}. \quad (5.4)$$

Руководство [30] рекомендует значения для  $We_{crit}$  от 10 до 20, и большинство моделей используют 12,5.

## 5.2 Закономерности распределения частиц по размерам

Аэрозоли, состоящие из частиц различных размеров, являются полидисперсными. Существует ряд математических и визуальных методов, с помощью которых могут быть описаны полидисперсные аэрозоли. Некоторые из наиболее распространенных методов рассматриваются в данной главе.

**Нормальное распределение.** Для описания аэрозолей, образующихся из различных источников, широко используется логарифмически-нормальное распределение. Для понимания применимости логарифмически-нормального распределения необходимо рассмотреть свойства нормального распределения. Основное достоинство нормального распределения (рисунок 5.2) в том, что оно предсказуемо. Это распределение определяется двумя параметрами – средним значением  $\bar{d}_p$  и стандартным отклонением  $\sigma$ , которые определяются следующим образом

$$\bar{d}_p = \frac{\sum_{i=0}^{\infty} n_i d_{pi}}{\sum_{i=0}^{\infty} n_i} ; \quad (5.5)$$

$$\sigma = \left[ \frac{\sum_{i=0}^{\infty} n_i (\bar{d}_p - d_{pi})^2}{\sum_{i=0}^{\infty} n_i - 1} \right]^{1/2}, \quad (5.6)$$

где  $n_i$  – число частиц с диаметром  $d_{pi}$ .

В большинстве случаев предположение о нормальном распределении не выполняется. Для многих аэрозолей кривая распределения частиц по размерам сходна с показанной на рисунке 5.3. Из этой кривой следует, что мелких частиц гораздо больше, чем крупных. Кривая на рисунке 5.3, как говорят, скошена в сторону больших размеров частиц.

**Логарифмически-нормальное распределение.** Было обнаружено, что скошенные графики распределений частиц по размерам удастся привести к виду нормального распределения, если вместо размеров частиц использовать их логарифмы. Это приводит к расширению интервалов размеров малых частиц и к сужению интервалов размеров крупных частиц. Если полученный таким образом новый график похож на нормальное распределение частиц, то говорят, что частицы распределены по логарифмически-нормальному закону, и распределение называется логарифмически-нормальным распределением.

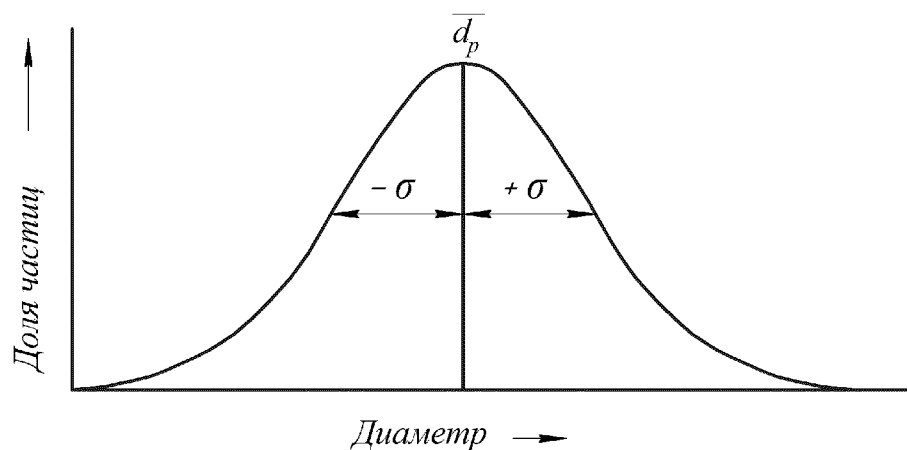


Рисунок 5.2. Нормальное распределение

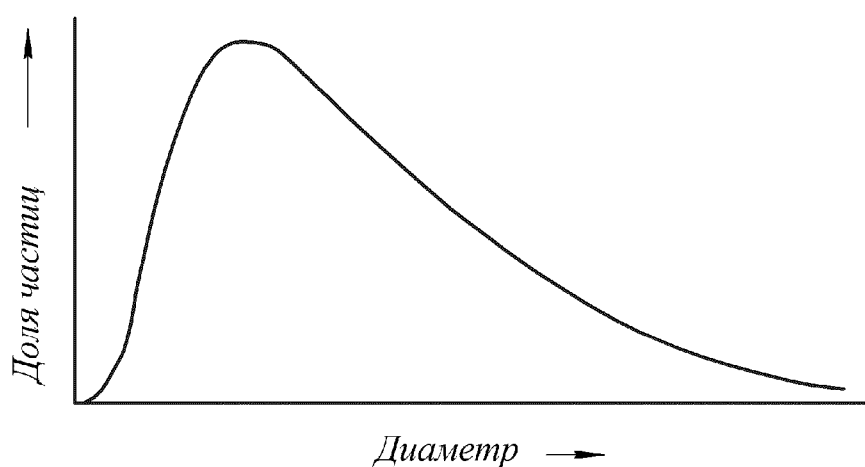


Рисунок 5.3. Логарифмически-нормальное распределение

По аналогии с нормальным распределением среднее значение и стандартное отклонение определяются как

$$\lg d_g = \frac{\sum n_i \lg d_{pi}}{\sum n_i}, \lg \sigma_g = \left[ \frac{\sum n_i (\lg d_g - \lg d_{pi})^2}{\sum (n_i) - 1} \right]^{1/2}. \quad (5.7, 5.8)$$

Параметры, определяемые формулами (5.7) и (5.8), называются средним геометрическим диаметром и стандартным геометрическим отклонением.

Логарифмически-нормальное распределение может быть записано в виде функции

$$f(d_p) = \frac{1}{d_p \ln \sigma_g (2\pi)^{0.5}} \exp \left[ -\frac{(\ln d_p - \ln d_g)^2}{2 \ln^2 \sigma_g} \right], \text{ где } \int_0^{\infty} f(d_p) dd = 1. \quad (5.9)$$

**Распределение Розин-Раммлера.** Функция распределения Розин-Раммлера основана на предположении об экспоненциальной зависимости между диаметром частицы,  $d_p$ , и массовой долей капель с диаметром, превышающем  $d_p$ ,  $Y_d$ :

$$Y_d = \exp \left[ -\left( \frac{d_p}{d_g} \right)^n \right], \quad (5.10)$$

где  $n$  – параметр распределения.

### 5.3 Моделирование переноса дисперсной фазы в рамках Эйлераво-Лагранжева подхода

Для описания движения аэрозольных капель широко используется эйлераво-лагранжев (Euler-Lagrange) подход. При этом вся дисперсная фаза разбивается на большое число групп капель, в пределах каждой из которых параметры всех физических капель считаются одинаковыми, и, следовательно, эволюция каждой группы может быть прослежена путем расчета движения лишь одной представительной капли.

Уравнение движения капли, принадлежащей определенной группе капель, записывается в виде

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u_1 - u_p) + \frac{g_1(\rho_p - \rho)}{\rho_p}, \quad (5.11)$$

где  $u_p$  – проекция скорости движения капли на ось  $x$ , м/с;  $u_1$  – проекция вектора скорости несущей фазы на ось  $x$ , м/с;  $\rho_p$  – плотность капли, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность несущей фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $dt$  – шаг по времени;  $F_D(u_1 - u_p)$  – удельная сила сопротивления на движению капли, Н/кг:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re_d}{24}, \quad (5.12)$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической молекулярной вязкости несущей фазы, кг/(м·с);  $Re_d$  – число Рейнольдса;  $d_p$  – диаметр капли, м;  $C_D$  – коэффициент сопротивления для частиц сферической формы.

Уравнение (5.11) решается для каждого направления координат.

В уравнении учтены только силы аэродинамического сопротивления и гравитации. Данные силы оказывают преобладающее влияние на траекторию движения капли.

Уравнение испарения капли имеет вид

$$\frac{dm_p}{dt} = k_c \cdot A_p \cdot \rho_\infty \ln(1 + B_m), \quad (5.13)$$

где  $m_p$  – масса капли, кг;  $k_c$  – коэффициент массоотдачи, м/с;  $A_p$  – площадь поверхности капли, м<sup>2</sup>;  $\rho_\infty$  – плотность окружающего воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $B_m$  – массовое число Сполдинга находится из

$$B_m = \frac{Y_{i,s} - Y_{i,\infty}}{1 - Y_{i,s}}, \quad (5.14)$$

где  $Y_{i,s}$  – массовая доля пара у поверхности капли;  $Y_{i,\infty}$  – массовая доля пара в окружающем газе.

Коэффициент массоотдачи  $k_c$  рассчитывается из соотношения

$$k_c = \frac{Sh \cdot D_m}{d_p}, \quad Sh = 2,0 + 0,6 Re_d^{1/2} Sc^{1/3}, \quad (5.15)$$

где  $D_m$  – коэффициент молекулярной диффузии компонента в смеси, м<sup>2</sup>/с;  $Sc$  – молекулярное число Шмидта:  $Sc = \mu/(\rho \cdot D_m)$ ; число Рейнольдса  $Re_d = \rho \cdot d_p \cdot |u_p - u_1| / \mu$ .

Изменение температуры капли определяется уравнением

$$m_p C_{p,p} \frac{dT_p}{dt} = \alpha_s A_p (T_\infty - T_p) - \frac{dm_p}{dt} \cdot \Delta H, \quad (5.16)$$

где  $C_{p,p}$  – теплоемкость капли, Дж/(кг·К);  $\alpha_s$  – коэффициент конвективной

теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_{\infty}$  – локальная температура несущей фазы, К.

Обратное влияние дисперсной фазы на несущий поток, обусловленное межфазным обменом теплотой, импульсом и массой, учитывается включением соответствующих источников членов в уравнения переноса энергии, импульса, примеси и в уравнение неразрывности для сплошной фазы.

Изменение импульса несущего потока, обусловленное гидродинамическим сопротивлением аэрозольных частиц, рассчитывается из следующего соотношения:

$$F = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \left( \frac{18\mu C_D Re}{\rho_{pi} d_{pi}^2 24} (u_i - u) \right) \dot{m}_i \Delta t, \quad (5.17)$$

где  $N$  – число частиц-представителей, прошедших через контрольный объем  $V$ ;  $\dot{m}_i$  – текущий массовый расход частиц данной фракции через грань контрольного объема, кг/с.

Сток энергии в газовой фазе, обусловленной теплообменом с каплями, рассчитывается следующим образом

$$Q = -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta m_i}{m_{0i}} (-\Delta H + C_{p,i} \Delta T_i) \dot{m}_{0i}, \quad (5.18)$$

где  $\Delta m_i$  – изменение массы  $i$ -й капли в процессе испарения за время прохождения ею данного контрольного объема, кг;  $m_{0i}$  – начальная масса капли-представителя, кг;  $\Delta T_{pi}$  – изменение температуры частицы в данном контрольном объеме  $V$ ;  $\dot{m}_{0i}$  – начальный массовый расход частиц данной фракции через грань контрольного объема, кг/с.

Источник массы в уравнении неразрывности и уравнении переноса примеси, возникающий в результате испарения капель, определяется через соотношение

$$S = -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta m_i}{m_{0i}} \dot{m}_{0i}. \quad (5.19)$$

Коэффициент трения  $C_D$  определяется в зависимости от особенностей обтекания частиц потоком воздуха.

1. При значениях числа Рейнольдса  $Re_d < 1/2$  характерно преобладание вязкого обтекания и отсутствие вихревых потоков за – и вокруг частицы (рисунок 5.4). Эмпирическая зависимость для коэффициента трения была предложена Стоксом в виде:  $C_D = \frac{24}{Re_d}$ .

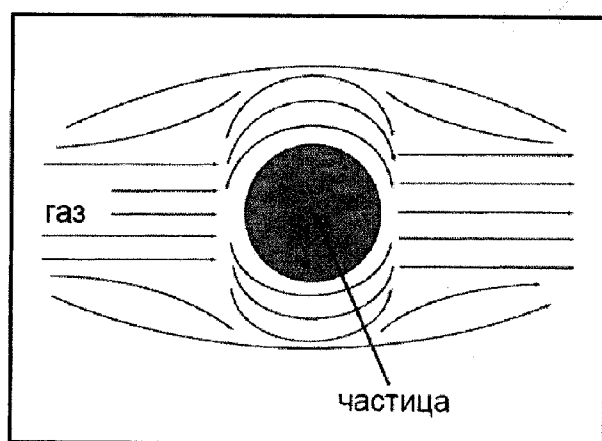


Рисунок 5.4. Схематическое изображение ламинарного обтекания сферической частицы газом при Стоксовском режиме течения

2. Переходные режим течения при числах Рейнольдса  $0,5 < Re_d < 1000$ . Он характеризуется преобладанием эффекта аэродинамической инерции. При значениях числа Рейнольдса  $Re_d$  более 24 обтекание частицы становится уже не ламинарным. Появляются турбулентные вихри потока за сферической частицей. Для расчета коэффициента аэродинамического сопротивления наибольшее распространение получила зависимость Шиллера и Наумана, определяющая значения коэффициента для диапазона чисел Рейнольдса от  $10^{-2}$  до  $10^3$  (рисунок 5.5). Она записывается в виде:

$$C_D = \frac{24}{Re_d} (1 + 0,15 Re_d^{0,687}).$$

3. Разными исследователями и на основе многочисленных экспериментов было выявлено, что при значениях числа Рейнольдса  $Re_d$  больших 1000, коэффициент аэродинамического сопротивления становится

практически постоянным. Зависимость в этом случае принимает вид:  
 $C_D = 0,44$ .

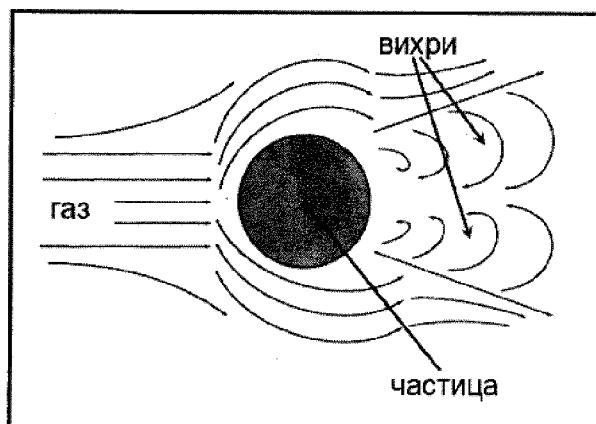


Рисунок 5.5. Схематическое изображение турбулентного обтекания сферической частицы газом при переходном режиме течения

## 5.4 Примеры по главе 5

### **Пример 5.1 Определить значения $n$ и $\bar{d}_p$ для аэрозолей**

*Исходные данные:*

Рассмотрим, как определяются параметры  $n$  и  $\bar{d}_p$  с помощью следующего примера. Пусть размеры капель подчиняются следующему распределению:

| Диапазон диаметров капель<br>(мкм) | Массовая доля капель |
|------------------------------------|----------------------|
| 0-70                               | 0,05                 |
| 70-100                             | 0,1                  |
| 100-120                            | 0,35                 |
| 120-150                            | 0,3                  |
| 150-180                            | 0,15                 |
| 180-200                            | 0,05                 |

*Решение:*

Для представленных данных получим следующие пары  $d_p$  и  $Y_d$  (см. уравнение 5.10):

| Диапазон диаметров капель<br>(мкм) | Массовая доля капель |
|------------------------------------|----------------------|
| 70                                 | 0,95                 |
| 100                                | 0,85                 |
| 120                                | 0,50                 |
| 150                                | 0,20                 |
| 180                                | 0,05                 |
| 200                                | 0,00                 |

Зависимость  $Y_d$  от  $d$  показана на рисунке 5.6.

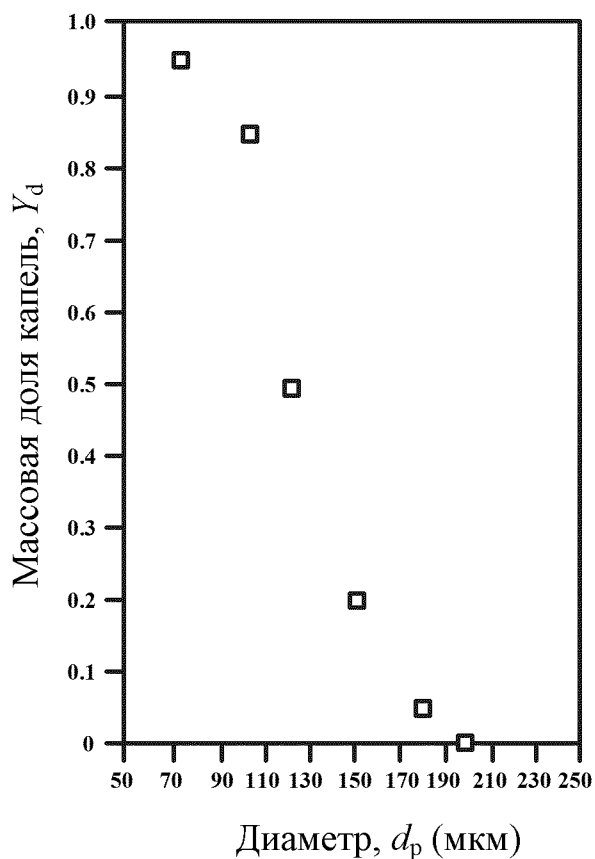


Рисунок 5.6. Пример интегрального распределения размеров частиц

Выведем такие значения  $n$  и  $\bar{d}_p$ , при которых данные на рисунке 5.3 будут описываться уравнением 5.9. Значение  $\bar{d}_p$  отвечает такому значению диаметра  $d_p$ , при котором  $Y_d = e^{-1} \approx 0,368$ . Из рисунка 5.3 видно, что это имеет место при  $d_p \approx 131$  мкм. Значение  $n$  определяется из уравнения

$$n = \frac{\ln(-\ln Y_d)}{\ln(d_p / \bar{d}_p)}. \quad (5.20)$$

Для примера, представленного выше, среднее значение  $n = 4,52$ .

## **ГЛАВА 6 ОЦЕНКА ЗОН ДЕЙСТВИЯ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ ПРИ АВАРИЯХ НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ**

### **6.1 Классификация аварий**

В целях упорядочения отнесения происходящих аварий к тому или иному виду вводится следующая их классификация:

- 1) взрыв пылегазовоздушной смеси с возгоранием (в технологической системе, производственном помещении, на открытой площадке);
- 2) взрыв реакционной среды внутри технологической системы (аппарата) в результате отклонения параметров технологического процесса от регламентированных значений;
- 3) пожар, связанный с розливом взрывопожароопасных веществ (неконтролируемое горение, причинившее материальный ущерб, вред жизни и здоровью людей, интересам общества и окружающей природной среде);
- 4) выброс или истечение химически опасных, взрывоопасных и горючих веществ;
- 5) полное или частичное разрушение (повреждение) технологического оборудования и трубопроводов, зданий и сооружений, не связанное с взрывом, пожаром;
- 6) события, перечисленные в п.п. 1 – 5, в результате которых имеются пострадавшие, полностью или частично выведено из строя оборудование и прекращен выпуск продукции (без учета перехода на резервное оборудование);
- 7) взрыв пылегазовоздушной смеси без возгорания (хлопок);
- 8) загорание, самовозгорание в результате утечки опасных веществ при разгерметизации технологической системы, не повлекшие за собой вывода из строя технологического оборудования;
- 9) переполнение емкостной аппаратуры (железнодорожных цистерн,

резервуаров, аппаратов, контейнеров, баллонов и другого оборудования) с розливом взрывопожароопасных и вредных продуктов.

### 6.1.1 Классификация взрывов

В многочисленной справочной литературе взрывные явления определяются по-разному, однако общим во всех определениях является то, что взрыв – это происходящее внезапно («стремительно», «мгновенно», «в виде всплеска») «событие», при котором высвобождается внутренняя энергия и формируется избыточное давление. Такой процесс сопровождается сильным звуковым эффектом.

**Взрыв** – неконтролируемый быстропротекающий процесс выделения энергии, связанный с физическим, химическим или физико-химическим изменением состояния вещества, приводящий к резкому динамическому повышению давления или возникновению ударной волны, сопровождающийся образованием сжатых газов, способных привести к разрушительным последствиям.

**Ударная волна** – распространяющаяся с высокой скоростью переходная область в газе, жидкости или в твердом теле, в которой происходит резкое увеличение плотности, давления и скорости среды.

Характерный профиль ударной волны при взрыве топливно-воздушной смеси (ТВС) показан на рисунке 6.1.

В момент прихода взрывной волны в заданную точку, где давление окружающей среды  $P_0$ , давление повышается до максимального значения во фронте ударной волны  $P_0 + P_s^+$ . Далее, за время  $t^+$ , давление снижается до давления среды в невозмущенном состоянии  $P_0$  и продолжает снижаться до величины  $P_0 - P_s^-$ . Затем давление начинает расти и в момент времени  $t_a + t^+ + t^-$  возвращается к исходному давлению  $P_0$ . Величина  $P^+$  представляет собой максимальное возмущенное избыточное давление или амплитуду

избыточного давления.

Область ударной волны, где давление превышает давление окружающей среды, называется положительной фазой. Другая область, где давление ниже давления окружающей среды, называется отрицательной фазой, или фазой разрежения.

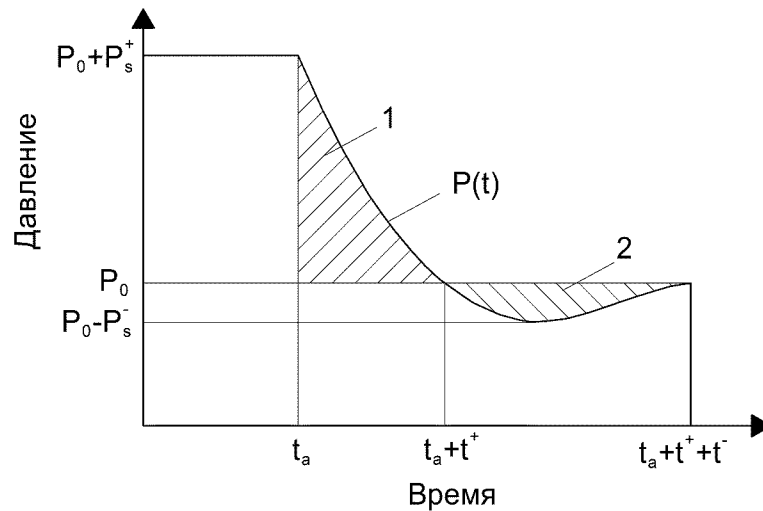


Рисунок 6.1. Характерный профиль ударной волны: 1 – положительная фаза; 2 – отрицательная фаза

Положительная фаза волны давления характеризуется амплитудой избыточного давления  $P_s^+$  и продолжительностью положительной фазы  $t^+$ . Отрицательная фаза или фаза разрежения характеризуется продолжительностью  $t^-$  и амплитудой  $P_s^-$ .

Важнейшими параметрами взрывной волны являются положительные  $i_s^+$  и отрицательные  $i_s^-$  импульсы:

$$i_s^+ = \int_{t_a}^{t_a+t^+} [P(t) - P_0] dt; \quad i_s^- = \int_{t_a+t^+}^{t_a+t^++t^-} [P_0 - P(t)] dt. \quad (6.1)$$

В большинстве случаев определяют параметры взрывной волны, связанные с положительной фазой. Однако иногда (например, при взрывах сосудов со сжатыми газами и протяженных источниках взрыва) параметры отрицательной фазы достигают высоких значений и важны при оценке разрушающей способности взрывной волны. Отрицательная фаза ударной

волны, вновь проходящая через центр, приводит к взаимному наложению волн.

Взрывы классифицируют по происхождению выделившейся энергии на:

- химические;
- физические.

Источником энергии при химических взрывах являются экзотермические реакции взаимодействия горючих веществ с окислителями или термического разложения нестабильных соединений.

Физический взрыв чаще всего связан с неконтролируемым высвобождением потенциальной энергии сжатых газов, паров или жидкостей из замкнутых объёмов сосудов.

К физическим взрывам относятся:

- взрывы емкостей под давлением (баллоны, паровые котлы);
- взрыв резервуара с перегретой жидкостью или сжиженным газом;
- взрывы при смешении двух жидкостей, температура одной из которых намного превышает температуру кипения другой.

В зависимости от скорости распространения пламени взрыв может быть детонационный или дефлаграционным.

**Дефлаграционный взрыв** – взрыв парогазовой смеси, при котором скорость распространения горения определяется теплопроводностью среды. При этом скорость распространения пламени составляет десятки и сотни метров в секунду, но не превышает скорость распространения звука в данной среде (300-340 м/с).

Применительно к случайным промышленным взрывам под дефлаграцией обычно понимают горение облака с видимой скоростью порядка 100 – 300 м/с, при которой генерируются ударные волны с максимальным давлением 20 - 100 кПа.

**Детонационный взрыв** – взрыв парогазовой смеси, при котором

скорость распространения горения определяется скоростью распространения ударной волны. При этом скорость распространения пламени превышает скорость распространения звука и достигает 1 – 5 км/с. Это происходит часто вследствие турбулизации материальных потоков, вызывающей сильное искривление и большое увеличение поверхности фронта пламени. При этом возникает ударная волна, во фронте которой резко повышаются плотность, давление и температура смеси; при возрастании этих параметров смеси до самовоспламенения горючего вещества возникает детонационная волна, являющаяся результатом сложения ударной волны и образующейся зоны сжатой, быстро реагирующей (самовоспламеняющейся) смеси.

Многочисленными исследованиями было показано, что вероятность детонационного сгорания реально создаваемых взрывоопасных сред весьма мала, а возможность взрывного горения, сопровождающегося ударной волной, создается при эффективной видимой скорости пламени, равной примерно  $0,2M$  ( $M$  – число Маха, определяемое отношением фактической скорости перемещения газа к скорости звука в данной среде). Для углеводородовоздушных смесей это соответствует видимой скорости пламени около 60 м/с.

Энергию взрыва парогазовых сред определяют по теплоте сгорания горючих веществ в смеси с воздухом (окислителем); конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) – по теплоте, выделяющейся при их детонации (реакции разложения); при физических взрывах систем со сжатыми газами и перегретыми жидкостями – по энергиям адиабатического расширения парогазовых сред и перегрева жидкости.

Теплоты сгорания горючих газов в топливно-воздушной смеси берутся из справочных данных. Значения теплоты сгорания составляют соответственно (МДж/кг) для незамещенных углеводородов (метан, пропан, бутан) – 40-50, водорода – 120, углеводородов с одним заместителем – кислородом (этиленоксид, ацетон) – 27-28, с хлором (хлорбензол,

этилхлорид) – 19-27 МДж/кг.

Удельная теплота взрыва конденсированных ВВ характеризуется значениями от 1,5 до 7,5 МДж/кг. Тепловая энергия, выделяющаяся при детонации тротила, составляет 4,52 МДж/кг.

### 6.1.2 Классификация пожаров

**Пожаром** называют неконтролируемое горение, причиняющее материальный ущерб, вред жизни и здоровью граждан, интересам общества и государства.

**Пожар разлития** – горение вещества разлития, испаряющегося с поверхности жидкости.

**Вспышечный пожар** – режим сгорания паровоздушного облака, при котором скорость перемещения фронта пламени значительно меньше звуковой. Характеризуется пренебрежимо малым значением возникающего при превращении избыточного давления.

**Огненный шар** – крупномасштабное диффузионное горение, реализуемое при разрыве резервуара с перегретой горючей жидкостью или газом под давлением с воспламенением содержимого резервуара.

Важным случаем выброса, ведущего к возникновению огненного шара, является так называемый взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости, или BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion). Это явление характерно для аварий, в которых происходит разрушение оболочки резервуара со сжиженным газом. Резкий сброс давления приводит к объемному вскипанию жидкости, в результате чего часть ее переходит в пар, увлекая оставшуюся жидкость в виде мелкодисперсного аэрозоля. Образующееся облако обогащено горючим веществом (концентрация горючего вещества превышает ВКПР), поэтому при его зажигании от расположенного вблизи места аварии источника оно не взрывается, а горит

по внешней оболочке и вытягивается, образуя огненный шар. Поднимаясь, огненный шар, принимает грибовидную форму, ножка которого – это сильное восходящее конвективное течение, которое может всасывать отдельные предметы, зажигать их и разбрасывать горящие предметы на большие площади.

К пожарам следует также отнести факельное горение струй газа или жидкости. Горящий факел образуется при непрерывном истечении горючего вещества из небольшого отверстия в оболочке сосуда (резервуара).

## **6.2 Поражающие факторы при авариях**

***Поражающие факторы аварии*** – физические процессы и явления, сопровождающие аварию и оказывающие поражающее действие на людей, технику, сооружения и т.д.

При авариях на объектах химической и нефтехимической отраслей промышленности выделяют следующие основные поражающие факторы:

- ударная волна и разлет осколков, возникающие при разного рода взрывах;
- тепловое излучение пожара пролива и огненного шара;
- действие токсических веществ, участвующих в технологическом процессе.

Разрушающее действие ударной волны характеризуют избыточное давление в ее фронте (передней границе) и импульс взрыва.

***Избыточное давление*** – это разность между максимальным давлением во фронте ударной волны и нормальным атмосферным давлением перед этим фронтом. Так, избыточное давление в пределах детонирующего облака смеси этиленоксида с воздухом составляет 2 МПа. Большинство же промышленных зданий разрушается от значительно меньших давлений: 25 – 30 кПа при внешних и 20 – 25 кПа при внутренних взрывах. Величина избыточного

давления на фронте ударной волны  $\Delta P = 5$  кПа принимается безопасной для человека.

В табл. 6.1 приведены типичные значения избыточного давления, соответствующие различным степеням повреждения зданий.

При взрывах топливно-воздушных смесей существенную роль играет длительность действия ударной волны и связанный с ней параметр импульс взрыва. Для оценки предполагаемого уровня разрушений широко применяется графический метод оценки разрушающей способности ударных волн с помощью диаграмм влияния давления и импульса на уровень и характер разрушения. Примером такой диаграммы является диаграмма  $P-i$  (рисунок 6.2).

Таблица 6.1

Значения избыточного давления для различных степеней повреждения зданий

| Степень поражения                                                                     | Избыточное давление, кПа |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Полное разрушение зданий                                                              | 100                      |
| 50 %-ное разрушение зданий                                                            | 53                       |
| Средние повреждения зданий                                                            | 28                       |
| Умеренные повреждения зданий (повреждение внутренних перегородок, рам, дверей и т.п.) | 12                       |
| Нижний порог повреждения человека волной давления                                     | 5                        |
| Малые повреждения (разбита часть остекления)                                          | 3                        |

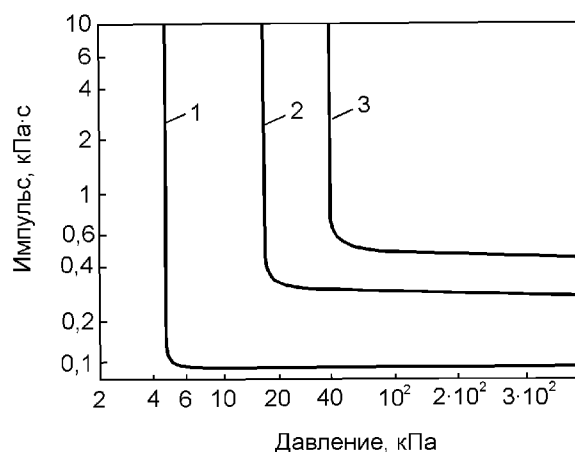


Рисунок 6.2.  $P-i$  диаграмма для оценки уровня поражения промышленных зданий: 1 – граница минимальных повреждений; 2 – граница значительных повреждений; 3 – разрушение зданий (50-75 % стен разрушено)

Поражающее действие теплового излучения характеризуется **интенсивностью теплового излучения**  $q$  – тепловым потоком излучения, падающим на площадку единичного размера ( $\text{кВт/м}^2$ ).

Величины  $q$  для различных степеней поражения человека приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Значения интенсивности теплового излучения для различных степеней поражения человека и повреждения материалов

| Степень поражения                                                                                | Интенсивность излучения, $\text{кВт/м}^2$ |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Без негативных последствий в течение длительного времени                                         | 1,4                                       |
| Безопасно для человека в брезентовой одежде                                                      | 4,2                                       |
| Непереносимая боль через 20-30 с<br>Ожог 1 степени через 15-20 с<br>Ожог 2 степени через 30-40 с | 7,0                                       |
| Непереносимая боль через 3-5 с<br>Ожог 1 степени через 6-8 с<br>Ожог 2 степени через 12-16 с     | 10,5                                      |

Для количественной характеристики уровня токсического воздействия используется показатель «токсодоза». **Ингаляционная токсодоза** – это интеграл по времени концентрации опасного вещества в воздухе; при условно постоянной во времени концентрации опасного вещества в заданной точке – произведение концентрации опасного вещества в воздухе на время экспозиции (время пребывания на зараженной территории). **Смертельная (или летальная) токсодоза** – наименьшая ингаляционная токсодоза опасного вещества, вызывающая у человека, не оснащенного средствами защиты органов дыхания, смерть с 50 % вероятностью. **Пороговая токсодоза** – наименьшая ингаляционная токсодоза опасного вещества, вызывающая у человека, не оснащенного средствами защиты органов дыхания, начальные признаки поражения организма с определенной вероятностью. Ингаляционные токсодозы измеряются в  $\text{мг} \cdot \text{мин} / \text{м}^3$ .

### 6.3 Пожаровзрывоопасность веществ и материалов

Пожаровзрывоопасные свойства веществ и материалов используются для определения возможного вида аварийного процесса, который может сопровождать выброс данного вещества.

Пожаро- и взрывоопасность веществ и материалов определяется показателями, характеризующими предельные условия возникновения горения и максимальную опасность, создаваемую при возникшем горении. В простейшем случае, когда горючим веществом является газ, основными показателями являются: концентрационные пределы распространения пламени (КПР), называемые также пределами воспламенения или взрываемости, нормальная скорость распространения пламени, температура самовоспламенения, минимальная энергия зажигания, максимальное давление взрыва. Производными от них являются: скорость нарастания давления взрыва, минимальное взрывоопасное содержание кислорода.

### ***Концентрационные пределы распространения пламени*** –

минимальное и максимальное содержание горючего вещества в однородной смеси с окислительной средой, при котором возможно распространение пламени по смеси на любом расстоянии от источника зажигания. Предел, определяемый минимальным содержанием горючего компонента в смеси, называется нижним концентрационным пределом распространения пламени (НКПР), а предел, характеризуемый максимально возможным содержанием горючего компонента, при котором еще возможно распространение пламени, называется верхним концентрационным пределом распространения пламени (ВКПР). Для наглядности на рисунке 6.3 КПР показаны схематически. Горение возможно в области составов между НКПР и ВКПР, называемой областью воспламенения. Вне этой области горение в режиме распространения пламени невозможно.

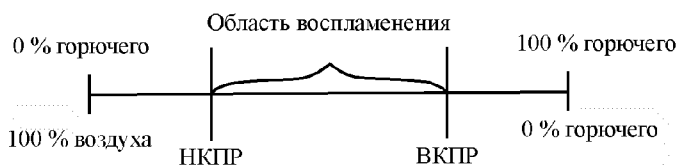


Рисунок 6.3. Схема концентрационных пределов распространения пламени

***Минимальная энергия зажигания*** – наименьшая энергия электрического разряда, способная воспламенить наиболее легковоспламеняющуюся смесь горючего вещества с воздухом.

Параметр используется при обеспечении электростатической искробезопасности технологических процессов.

***Нормальная скорость распространения пламени*** – скорость перемещения фронта пламени относительно несгоревшего газа в направлении, перпендикулярном его поверхности.

***Температура самовоспламенения*** – наименьшая температура окружающей среды, при которой наблюдается самовоспламенение вещества.

**Самовоспламенение** – резкое увеличение скорости экзотермических реакций, сопровождающееся пламенным горением или взрывом.

**Максимальное давление взрыва** – наибольшее избыточное давление, возникающее при дефлаграционном сгорании газо-, паро-, или пылевоздушной смеси в замкнутом сосуде при начальном давлении смеси 101,3 кПа.

**Скорость нарастания давления взрыва** – производная давления взрыва по времени на восходящем участке зависимости давления взрыва горючей смеси в замкнутом сосуде от времени.

**Минимальное взрывоопасное содержание кислорода (МВСК)** – такая концентрация кислорода в горючей смеси, состоящей из горючего вещества, воздуха и флегматизатора, меньше которой распространение пламени в смеси становится невозможным при любой концентрации горючей смеси, разбавленной данным флегматизатором. Обычно МВСК определяют при флегматизации горючих смесей азотом, диоксидом углерода.

При оценке пожароопасности жидкостей перечисленные выше показатели дополняются следующими: температура вспышки; температура воспламенения; температурные пределы воспламенения (ТП: нижний – НТП, верхний - ВТП).

**Температура вспышки ( $T_{всп}$ )** – наименьшая температура конденсированного вещества, при которой в условиях специальных испытаний над его поверхностью образуются пары, способные вспыхивать в воздухе от источника зажигания; устойчивое горение при этом не возникает.

**Вспышка** – быстрое сгорание газопаровоздушной смеси над поверхностью горючего вещества, сопровождающееся кратковременным видимым свечением.

По физическому смыслу температура вспышки – это минимальная температура жидкости, при которой давление насыщенных паров жидкости создает концентрацию паров над жидкостью, соответствующую НКПР. В

зависимости от летучести жидкости, характеризуемой температурой вспышки и позволяющей судить о возможности образования взрывоопасной среды, жидкости подразделяются на легковоспламеняющиеся (ЛВЖ) и горючие (ГЖ). К ЛВЖ относятся жидкости с  $T_{всп} \leq 61^\circ\text{C}$  и к ГЖ – с  $T_{всп} > 61^\circ\text{C}$ .

Нагрева жидкостей до  $T_{всп}$  недостаточно для устойчивого их горения. Для обеспечения требуемой интенсивности испарения для устойчивого горения необходим нагрев жидкости до более высокой температуры, называемой температурой воспламенения

**Температурные пределы воспламенения** – это температуры жидкостей, при которых давление насыщенных паров создает концентрацию паров, соответствующую концентрационному пределу распространения пламени. Зависимость между ТП и КПР выражается следующим образом

$$\text{НКПР} = \frac{P_{\text{НТП}}}{P_a} \cdot 100 (\%); \text{ВКПР} = \frac{P_{\text{ВТП}}}{P_a} \cdot 100 (\%), \quad (6.2)$$

здесь  $P_{\text{НТП}}$ ,  $P_{\text{ВТП}}$  – давление насыщенных паров при нижнем температурном пределе (НТП) и верхнем температурном пределе (ВТП) соответственно;  $P_a$  – атмосферное давление.

#### **6.4 Поведение веществ при наличии источников зажигания**

Явления, сопровождающие зажигание разлития или выход воспламеняющейся жидкости при потере герметичности, зависят от количества пара над разлитием, а не от полного количества разлитой жидкости. Эти явления зависят также от степени смешения воспламеняющихся паров с воздухом.

Удобно разделить все жидкости, способные вызывать пожары, на 6 классов.

*Класс 1* – жидкости, имеющие при окружающей температуре незначительное давление паров. Чтобы такая жидкость загорелась, ее

необходимо нагреть на несколько сотен °С. Хотя такие жидкости не способны самостоятельно поддерживать горение, они могут принять участие в крупном пожаре. Их можно назвать «трудногорящими». Пример – жидкие масла.

*Класс 2* – жидкости с высокой температурой вспышки. Для того, чтобы получить давление паров, соответствующее НКПР, к ним надо подвести определенное количество тепла. Это «воспламеняющиеся» жидкости не представляют собой большой опасности. Пример – п-ксилол (температура вспышки 39°C). Такие жидкости зажигаются от удара пламени и горят в самоподдерживающемся пожаре разлития.

*Класс 3* – жидкости, у которых температура вспышки или равна номинальной температуре окружающей среды, или ниже ее. У таких жидкостей концентрация пара находится в интервале между НКПР и ВКПР. Пример - октан (температура вспышки - 13°C).

*Класс 4* – жидкости, давление паров которых при температуре окружающей среды лежит в интервале между ВКПР и атмосферным давлением. Диэтиловый эфир с концентрацией пара 60 % (ВКПР – 28 %) будет жидкостью класса 4.

Жидкости класса 3 и 4 при зажигании от находящегося рядом источника образуют самоподдерживающийся пожар разлития. Ясно, что расстояние до источника, способного поджечь облако, зависит также от скорости и направления ветра. При зажигании облака жидкости класса 3 образуется пламя, которое быстро распространяется по всему объему паровоздушной смеси с концентрацией выше НКПР. В результате такой вспышки облако способно сгореть целиком. При зажигании облака жидкости класса 4 часть облака, содержащая переобогащенную смесь, будет гореть только на ее границе благодаря диффузии.

*Класс 5* – воспламеняющиеся жидкости, у которых при хранении давление паров близко к атмосферному. Это криогенные воспламеняющиеся

газы, такие как сжиженный природный газ (СПГ). При разлиии примыкающий слой переобогащен горючим и гореть не может, однако при рассеянии заметная доля разлития превратится в горючую смесь. В результате кипения при разлиии объем облака может оказаться значительным, и зажигание может произойти от удаленного источника, что приведет к вспышке перемешанной части облака и поджиганию оболочки парового облака. При очень больших разлииях возможно образование огненного шара.

Жидкости класса 5 способны к пожару разлиия.

*Класс 6* – это сжиженные воспламеняющиеся газы, значительная часть которых при разгерметизации оборудования переходит в пар. Кроме того, в пар увлекаются капли жидкости. Примером жидкости класса 6 может служить сжиженный пропан. Такие жидкости способны загораться от удаленного источника с образованием вспышки, а также пожара разлиия, если мгновенно испарившаяся часть мала (около 0,1, как это может быть в случае бутана). Часть переобогащенного облака будет гореть в диффузионном режиме на границе своей оболочки. Если масса выброса составляет порядка тонны, вспышечный пожар может перерасти в огненный шар. В определенных ситуациях может произойти взрыв парового облака.

## **6.5 Математические модели для расчета зон действия поражающих факторов**

### **6.5.1 Взрыв паровоздушного облака на открытой площадке**

Эффективный энергозапас горючей смеси определяется по соотношению

$$E = m_r \cdot H_{сг}, \quad (6.3)$$

где  $m_{\Gamma}$  – масса горючего вещества, содержащегося в облаке, с концентрацией между нижним и верхним концентрационным пределом распространения пламени, кг;  $H_{\text{сг}}$  – удельная теплота сгорания парогазовой среды, Дж/кг.

Допускается величину  $m_{\Gamma}$  принимать равной массе горючего вещества, содержащегося в облаке, с учетом коэффициента  $Z$  участия горючего вещества во взрыве. При отсутствии данных коэффициент  $Z$  может быть принят равным 0,1.

При расчете параметров взрыва облака, лежащего на поверхности земли, величина эффективного энергозапаса удваивается.

Для вычисления параметров воздушной ударной волны на заданном расстоянии  $R$  от центра облака при дефлаграции (детонации) облака предварительно рассчитывается безразмерное расстояние по соотношению

$$R_x = \frac{R}{(E/P_a)^{1/3}}, \quad (6.4)$$

где  $P_a$  – атмосферное давление, Па.

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

В случае дефлаграционного взрывного превращения облака топливно-воздушной смеси (ТВС):

$$P_x = \left( \frac{V_{\Gamma}}{C_0} \right)^2 \cdot \frac{(\sigma - 1)}{\sigma} \cdot \left( \frac{0,83}{R_x} - \frac{0,14}{R_x^2} \right); \quad (6.5)$$

$$I_x = \left( \frac{V_{\Gamma}}{C_0} \right) \cdot \frac{(\sigma - 1)}{\sigma} \cdot \left( 1 - \frac{0,4 \cdot (\sigma - 1) \cdot V_{\Gamma}}{\sigma \cdot C_0} \right) \cdot \left( \frac{0,06}{R_x} + \frac{0,01}{R_x^2} - \frac{0,0025}{R_x^3} \right), \quad (6.6)$$

где  $V_{\Gamma}$  – скорость видимого фронта пламени, м/с;  $C_0$  – скорость звука в воздухе, м/с;  $C_0 = 340$  м/с;  $\sigma$  – степень расширения продуктов сгорания: для газовых смесей принимается  $\sigma=7$ .

Формулы (6.5), (6.6) справедливы для значений  $R_x$  больших величины  $R_{\text{кр1}} = 0,34$ , в случае, если  $R_x < R_{\text{кр1}}$ , в формулы (6.5), (6.6) вместо  $R_x$  подставляется величина  $R_{\text{кр1}}$ .

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

$$\Delta P = P_x P_a ; \quad (6.7)$$

$$I = \frac{I_x (P_0)^{2/3} E^{1/3}}{C_0} . \quad (6.8)$$

Ожидаемый режим сгорания облака определяется в зависимости от класса горючего вещества и класса загроможденности окружающего пространства (см. Приложение 2 к настоящему пособию).

### 6.5.2 Пожар-вспышка

В случае образования паровоздушной смеси в незагроможденном технологическим оборудованием пространстве и ее зажигании относительно слабым источником (например, искрой) сгорание этой смеси происходит, как правило, с небольшими видимыми скоростями пламени. При этом амплитуды волны давления малы и могут не приниматься во внимание при оценке поражающего воздействия. В этом случае реализуется так называемый пожар-вспышка, при котором зона поражения высокотемпературными продуктами сгорания паровоздушной смеси практически совпадает с максимальным размером облака продуктов сгорания (т.е. поражаются в основном объекты, попадающие в это облако). Радиус воздействия высокотемпературных продуктов сгорания паровоздушного облака при пожаре-вспышке  $R_F$  определяется по формуле

$$R_F = 1,2 \cdot R_{\text{НКПР}} . \quad (6.9)$$

Радиус  $R_{\text{НКПР}}$  (м) зоны, ограничивающей область концентраций, превышающих нижний концентрационный предел распространения пламени (далее - НКПР), при неподвижной воздушной среде определяется по формулам

для горючих газов (далее - ГГ)

$$R_{\text{НКПР}} = 7,8 \cdot \left( \frac{m_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma} \cdot C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,33}; \quad (6.10)$$

для паров ЛВЖ

$$R_{\text{НКПР}} = 7,8 \cdot \left( \frac{m_{\Pi}}{\rho_{\Pi} \cdot C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,33}, \quad (6.11)$$

где  $m_{\Gamma}$  – масса ГГ, поступившего в открытое пространство при пожароопасной ситуации, кг;  $\rho_{\Gamma}$  – плотность ГГ при расчетной температуре и атмосферном давлении, кг/м<sup>3</sup>;  $m_{\Pi}$  – масса паров ЛВЖ, поступивших в открытое пространство за расчетное время испарения, кг;  $\rho_{\Pi}$  – плотность паров ЛВЖ при расчетной температуре, кПа;  $C_{\text{НКПР}}$  – нижний концентрационный предел распространения пламени ГГ или паров, % об.

За начало отсчета горизонтального размера зоны принимают геометрический центр пролива, а в случае, если  $R_{\text{НКПР}}$  меньше габаритных размеров пролива, – внешние габаритные размеры пролива.

### 6.5.3 Взрыв резервуара с перегретой жидкостью

Если происходит внезапное разрушение сосуда (системы) с перегретой жидкостью, она быстро испаряется с образованием паров в окружающей среде и формированием ударных волн. Разрушающая способность взрыва может характеризоваться внешней удельной работой термодинамического перехода из состояния жидкости при регламентированных (предаварийных) условиях в состояние при атмосферных условиях и выражаться как  $E = U_1 - U_2$  ( $U$  – внутренняя энергия).

Избыточное давление  $\Delta P$  и импульс  $I^+$  в волне давления, образующиеся при взрыве резервуара с перегретой ЛВЖ, ГЖ или сжиженным углеводородным газом (далее – СУГ) в очаге пожара, определяются по формулам

$$\Delta P = P_a \cdot \left( 0,8 \cdot \frac{m_{np}^{0,33}}{r} + 3 \cdot \frac{m_{np}^{0,66}}{r^2} + 5 \cdot \frac{m_{np}}{r^3} \right); \quad (6.12)$$

$$I^+ = 123 \cdot \frac{m_{np}^{0,66}}{r}; \quad (6.13)$$

$$m_{np} = \left( \frac{E_{eff}}{4,52} \right) \cdot 10^{-6}, \quad (6.14)$$

где  $P_a$  – атмосферное давление, кПа (допускается принимать равным 101 кПа);  $r$  – расстояние от центра резервуара, м;  $E_{eff}$  – эффективная энергия взрыва, рассчитываемая по формуле

$$E_{eff} = k \cdot C_p \cdot m \cdot (T_{жс} - T_{кип}), \quad (6.15)$$

где  $k$  – доля энергии волны давления (допускается принимать равной 0,5);  $C_p$  – удельная теплоемкость жидкости (допускается принимать равной 2000 Дж/(кг · К);  $m$  – масса ЛВЖ, ГЖ или СУГ, содержащаяся в резервуаре, кг;  $T_{жс}$  – температура жидкой фазы, К;  $T_{кип}$  – нормальная температура кипения, К.

#### 6.5.4 Взрыв сосуда со сжатым инертным газом

Избыточное давление  $\Delta P$  и импульс  $I^+$  в волне давления, образующиеся при взрыве сосуда со сжатым инертным газом, определяются по формулам (6.12) и (6.13).

Энергия взрыва рассчитывается как работа адиабатического расширения сжатого газа  $A$ :

$$A = \frac{1}{\gamma - 1} P V' \left[ 1 - \left( \frac{P_a}{P_0} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right], \quad (6.16)$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты;  $P_0$  – давление в аппарате, Па;  $V'$  – объем аппарата, занятый газом;  $P_a$  – атмосферное давление, Па.

При этом  $m_{np}$  определяется соотношением

$$m_{np} = \left( \frac{A}{4,52} \right) \cdot 10^{-6}. \quad (6.17)$$

### 6.5.5 Огненный шар

Расчет интенсивности теплового излучения «огненного шара»  $q_{o.ш.}$ , кВт/м<sup>2</sup>, проводят по формуле

$$q_{o.ш.} = E_f F_q \tau, \quad (6.18)$$

где  $E_f$  – среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени, кВт/м<sup>2</sup>;  $F_q$  – угловой коэффициент облученности;  $\tau$  – коэффициент пропускания атмосферы.

Величина  $E_f$  определяется на основе имеющихся экспериментальных данных. Допускается принимать  $E_f$  равной 350 кВт/м<sup>2</sup>.

Значение  $F_q$  определяется по формуле

$$F_q = \frac{D_s^2}{4 \cdot (H^2 + r^2)}, \quad (6.19)$$

где  $H$  – высота центра огненного шара, м;  $D_s$  – эффективный диаметр огненного шара, м;  $r$  – расстояние от облучаемого объекта до точки на поверхности земли непосредственно под центром огненного шара, м.

Эффективный диаметр «огненного шара»  $D_s$  определяется по формуле

$$D_s = 6,48 \cdot m^{0,325}, \quad (6.20)$$

где  $m$  – масса продукта, поступившего в окружающее пространство, кг.

Величину  $H$  допускается принимать равной  $D_s$ .

Время существования огненного шара  $t_s$  (с) определяется по формуле

$$t_s = 0,852 \cdot m^{0,26}. \quad (6.21)$$

Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau$  рассчитываем по формуле

$$\tau = \exp \left[ -7,0 \cdot 10^{-4} \left( \sqrt{r^2 + H^2} - \frac{D_s}{2} \right) \right]. \quad (6.22)$$

### 6.5.6 Пожар пролива

Интенсивность теплового излучения  $q_{п.п.}$ , кВт/м<sup>2</sup>, для пожара пролива горючей жидкости вычисляется по формуле

$$q_{п.п.} = E_f F_q \tau, \quad (6.23)$$

где  $E_f$  – среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени, кВт/м<sup>2</sup>;  $F_q$  – угловой коэффициент облученности;  $\tau$  – коэффициент пропускания атмосферы.

Значение  $E_f$  принимается на основе имеющихся экспериментальных данных или по табл. 6.4.

Таблица 6.4

Среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени в зависимости от диаметра очага и удельная массовая скорость выгорания для некоторых жидких углеводородных топлив

| Топливо                   | $E_f$ , кВт/м <sup>2</sup> |          |          |          |          | $m'$ ,<br>кг/(м <sup>2</sup> ·с) |
|---------------------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------------------------------|
|                           | $d=10$ м                   | $d=20$ м | $d=30$ м | $d=40$ м | $d=50$ м |                                  |
| СПГ (метан)               | 220                        | 180      | 150      | 130      | 120      | 0,08                             |
| СУГ<br>(пропан-<br>бутан) | 80                         | 63       | 50       | 43       | 40       | 0,1                              |
| Бензин                    | 60                         | 47       | 35       | 28       | 25       | 0,06                             |
| Дизельное<br>топливо      | 40                         | 32       | 25       | 21       | 18       | 0,04                             |

При отсутствии данных для нефти и нефтепродуктов допускается величину  $E_f$  (кВт/м<sup>2</sup>) определять по формуле

$$E_f = 140 \cdot e^{-0,12 \cdot d} + 20 \cdot (1 - e^{-0,12 \cdot d}), \quad (6.24)$$

где  $d$  – эффективный диаметр пролива, м.

При отсутствии данных для однокомпонентных жидкостей допускается величину  $E_f$  (кВт/м<sup>2</sup>) определять по формуле

$$E_f = \frac{0,4 \cdot m' \cdot H_{\text{сг}}}{\left(1 + 4 \cdot \frac{L}{d}\right)}, \quad (6.25)$$

где  $m'$  – удельная массовая скорость выгорания, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $H_{\text{сг}}$  – удельная теплота сгорания, кДж/кг;  $L$  – длина пламени, м.

При отсутствии данных для однокомпонентных жидкостей допускается величину  $m'$  (кг/(м<sup>2</sup>·с)) определять по формуле

$$m' = \frac{0,001 \cdot H_{\text{сг}}}{\Delta H + C_p (T_{\text{кип}} - T_a)}, \quad (6.26)$$

где  $\Delta H$  – удельная теплота испарения жидкости, кДж/кг;  $C_p$  – удельная теплоемкость жидкости, кДж/(кг·К);  $T_{\text{кип}}$  – температура кипения жидкости при атмосферном давлении, К;  $T_a$  – температура окружающей среды, К.

Для многокомпонентных жидкостей допускается определение значений  $E_f$  и  $m'$  по компонентам, для которых величины  $E_f$  и  $m'$  максимальны.

Угловой коэффициент облученности  $F_q$  определяется по формуле

$$F_q = \sqrt{F_V^2 + F_H^2}, \quad (6.27)$$

где  $F_V$ ,  $F_H$  – факторы облученности для вертикальной и горизонтальной площадок соответственно, определяемые для площадок, расположенных в 90° секторе в направлении наклона пламени, по следующим формулам

$$F_V = \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ -E \cdot \arctg D + E \cdot \left[ \frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot b \cdot (1 + a \cdot \sin \theta)}{A \cdot B} \right] \cdot \arctg \left( \frac{A \cdot D}{B} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\cos \theta}{C} \cdot \left[ \arctg \left( \frac{a \cdot b - F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) + \arctg \left( \frac{F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) \right] \right\}; \quad (6.28)$$

$$F_H = \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \arctg \left( \frac{1}{D} \right) + \frac{\sin \theta}{C} \cdot \left[ \arctg \left( \frac{a \cdot b - F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) + \arctg \left( \frac{F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) \right] - \right. \\ \left. - \left[ \frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot (b+1 + a \cdot b \cdot \sin \theta)}{A \cdot B} \right] \cdot \arctg \left( \frac{A \cdot D}{B} \right) \right\}; \quad (6.29)$$

$$a = \frac{2 \cdot L}{d}; \quad (6.30)$$

$$b = \frac{2 \cdot X}{d}; \quad (6.31)$$

$$A = \sqrt{(a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot a \cdot (b+1) \cdot \sin \theta)}; \quad (6.32)$$

$$B = \sqrt{(a^2 + (b-1)^2 - 2 \cdot a \cdot (b-1) \cdot \sin \theta)}; \quad (6.33)$$

$$C = \sqrt{(1 + (b^2 - 1) \cdot \cos^2 \theta)}; \quad (6.34)$$

$$D = \sqrt{\left(\frac{b-1}{b+1}\right)}; \quad (6.35)$$

$$E = \frac{a \cdot \cos \theta}{b - a \cdot \sin \theta}; \quad (6.36)$$

$$F = \sqrt{(b^2 - 1)}, \quad (6.37)$$

где  $X$  – расстояние от геометрического центра пролива до облучаемого объекта, м;  $d$  – эффективный диаметр пролива, м;  $L$  – длина пламени, м;  $\theta$  – угол отклонения пламени от вертикали под действием ветра.

Для площадок, расположенных вне указанного сектора, а также в случаях отсутствия ветра факторы облученности для вертикальной и горизонтальной площадок рассчитываются по формулам (6.28)÷(6.37), принимая  $\theta = 0$ .

Эффективный диаметр пролива  $d$  (м) рассчитывается по формуле

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi}}, \quad (6.38)$$

где  $F$  – площадь пролива, м<sup>2</sup>.

Длина пламени  $L$  (м) определяется по формулам

при  $u_* \geq 1$

$$L = 55 \cdot d \cdot \left( \frac{m'}{\rho_a \sqrt{g \cdot d}} \right)^{0,67} \cdot u_*^{0,21}, \quad (6.39)$$

при  $u_* < 1$

$$L = 42 \cdot d \cdot \left( \frac{m'}{\rho_a \sqrt{g \cdot d}} \right)^{0,61}, \quad (6.40)$$

где

$$u_* = \frac{w_0}{\sqrt[3]{\frac{m' \cdot g \cdot d}{\rho_{\Pi}}}}, \quad (6.41)$$

где  $m'$  – удельная массовая скорость выгорания топлива, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $\rho_a$  – плотность окружающего воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\Pi}$  – плотность насыщенных паров топлива при температуре кипения, кг/м<sup>3</sup>;  $w_0$  – скорость ветра, м/с;  $g$  – ускорение свободного падения (9,81 м/с<sup>2</sup>).

Угол отклонения пламени от вертикали под действием ветра  $\theta$  рассчитывается по формуле

$$\cos \theta = \begin{cases} 1, & \text{при } u_* < 1 \\ u_*^{-0,5}, & \text{при } u_* \geq 1 \end{cases}. \quad (6.42)$$

Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau$  для пожара пролива определяется по формуле

$$\tau = \exp[-7,0 \cdot 10^{-4} (X - 0,5 \cdot d)]. \quad (6.43)$$

### 6.5.7 Факельное горение

Длина факела  $L_F$  (м) при струйном горении определяется по формуле

$$L_F = K \cdot G^{0,4}, \quad (6.44)$$

где  $G$  – расход продукта, кг/с;  $K$  – эмпирический коэффициент, который при истечении сжатых газов принимается равным 12,5; при истечении паровой фазы равным 13,5; при истечении жидкой фазы равным 15.

Ширина факела  $D_F$  (м) при струйном горении определяется по формуле

$$D_F = 0,15 \cdot L_F. \quad (6.45)$$

Тепловое излучение от факелов определяется по формулам

(6.23)÷(6.45), принимая  $H$  равным  $L_F$ ,  $d$  равным  $D_F$ .

## 6.6 Примеры по Главе 6

### ***Пример 6.1 Провести оценку зон действия поражающих факторов для объекта хранения сжиженного пропана***

*Исходные данные:*

Резервуары объемом  $600 \text{ м}^3$  расположены на территории резервуарного парка склада сжиженных газов. Схема территории склада и прилегающей к нему местности показана на рисунке 6.4. Площадь, занимаемая резервуарным парком и ограниченная обвалованием, равна  $2000 \text{ м}^2$ . Количество резервуаров – 6. Степень заполнения резервуара 80 % (по объему). Температура  $38^\circ\text{C}$ . Произвести расчет зон действия поражающих факторов (взрыв, огненный шар, сгорание облака) при полной разгерметизации резервуара. Физические свойства веществ и материалов представлены в табл. 6.4.

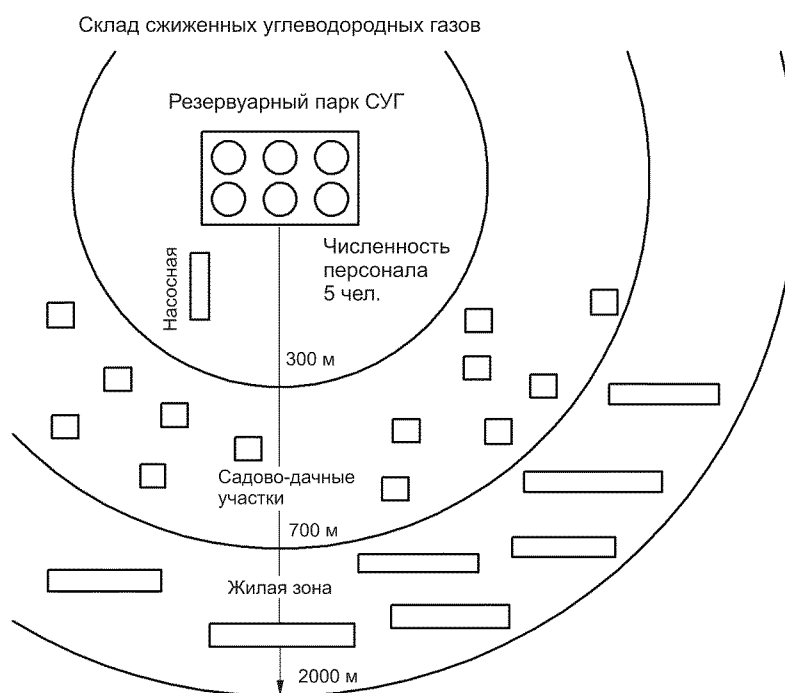


Рисунок 6.4. Схема территории склада и прилегающей к нему местности

Таблица 6.4

## Физические свойства веществ и материалов

| Параметр                                                                                   | Значение |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Плотность сжиженного газа $\rho_{ж}$ , кг/м <sup>3</sup>                                   | 480      |
| Удельная теплоемкость жидкости $C_{p,ж}$ , Дж/(кг·К)                                       | 2800     |
| Теплота испарения жидкости $\Delta H$ , Дж/кг                                              | 434200   |
| Температура кипения жидкости при атмосферном давлении, °С                                  | -42,05   |
| Молярная масса $M$ , кг/кмоль                                                              | 44       |
| Коэффициент теплопроводности материала подстилающей поверхности $\lambda_{под}$ , Вт/(м·К) | 1,3      |
| Плотность материала подстилающей поверхности $\rho_{под}$ , кг/м <sup>3</sup>              | 2300     |
| Удельная теплоемкость материала подстилающей поверхности $C_{p,под}$ , Дж/(кг·К)           | 1000     |
| Удельная теплота сгорания горючего газа $E_{уд}$ , кДж/кг                                  | 46454    |
| Нижний концентрационный предел распространения пламени $C_{НКПР}$ , % об.                  | 2,3      |

*Решение:*

1. Расчет количества опасного вещества, участвующего в аварии

Масса жидкой фазы, поступившей в окружающее пространство из аварийного резервуара, определяется по формуле (3.14) и равна

$$m_{ж} = 0,8 \cdot 600 \cdot 480 = 230400 \text{ кг.}$$

Количество жидкости, мгновенно вскипающей при разгерметизации оборудования, определяется по формуле (3.13) и равно

$$G_{мгн} = 230400 \cdot \left( 1 - \exp \left( - \frac{2800 \cdot (311 - 231,1)}{434200} \right) \right) = 92770 \text{ кг.}$$

Так как хранение сжиженного резервуара осуществляется под собственным давлением насыщенных паров, принимаем давление в аппарате  $P_0$ , равное давлению насыщенных паров  $P_n$ .

Давление насыщенных паров сжиженного газа при температуре окружающей среды определяется по формуле (1.5) и равно

$$P_{\text{н}} = 101325 \cdot \exp\left(\frac{434200 \cdot 44}{8310} \left( \frac{1}{(-42,05 + 273,15)} - \frac{1}{(38 + 273,15)} \right)\right) = 1309896 \text{ Па}.$$

Количество пара в свободном объеме резервуара определяется по формуле (3.12) и равно

$$G_{\text{св}} = (1 - 0,8) \frac{0,044}{8,31} \frac{1309896 \cdot 600}{273,15 + 38} = 2675 \text{ кг}.$$

Площадь пролива жидкости, оставшейся после мгновенного вскипания, на неограниченной поверхности определяется по формуле (2.7) и равна

$$F_{\text{ж}} = 150 \cdot (230400 - 92700) / 480 = 43031 \text{ м}^2.$$

Так как площадь пролива, определенная для случая розлива на неограниченной поверхности,  $F_{\text{ж}} = 43031 \text{ м}^2$  больше площади, ограниченной обвалованием  $F_{\text{ж}} = 2000 \text{ м}^2$ , то окончательно принимаем  $F_{\text{ж}} = 2000 \text{ м}^2$ .

Время парообразования из пролива (время контакта жидкости с поверхностью пролива) принимается равным времени полного испарения СУГ, но не более 3600 с.

Масса паров, образующихся при кипении пролива, определяется по формуле (3.16) и равна:

$$G_{\text{кип}} = 2 \frac{38 - (-42,05)}{434200} \frac{\sqrt{1,3 \cdot 2300 \cdot 1000}}{\sqrt{3,14}} \frac{2000^2}{2000} \sqrt{3600} = 43177 \text{ кг}.$$

Давление насыщенных паров СУГ при расчете интенсивности испарения из пролива по формуле (1.5) принято равным атмосферному давлению, так как температура жидкости в проливе не превышает температуру кипения при атмосферном давлении.

Интенсивность испарения из пролива, обусловленного диффузионными процессами, по формуле (2.5)

$$W = 10^{-6} \cdot 1 \cdot \sqrt{44} \cdot 101,325 = 0,000672 \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{ с}).$$

Общее количество испарившейся жидкости определяется по формуле (2.6) и равно

$$G_{\text{исп}} = 0,000672 \cdot 2000 \cdot 3600 = 4838 \text{ кг}.$$

Суммарное количество пара, участвующего в образовании паровоздушного облака, равно (3.11)

$$m=92770+2675+43177+4838=143460 \text{ кг.}$$

## 2. Расчет параметров поражающих факторов

Вычисляем интенсивность теплового излучения огненного шара  $q_{\text{о.ш.}}$ , а также избыточное давление  $\Delta P$  и импульс  $i$  при взрыве паровоздушной смеси на различных расстояниях от резервуара по формулам, приведенным в разделе 6.5 настоящего пособия и рекомендациям Приложения 2 к настоящему пособию.

Радиус воздействия высокотемпературных продуктов сгорания паровоздушного облака при пожаре-вспышке определяем по формуле (6.9).

При расчете эффективного диаметра  $D_s$  и времени существования огненного шара  $t_s$  масса продукта, поступившего в окружающее пространство, принято равным  $m_{\text{ж}}=230400$  кг.

При расчете интенсивности теплового излучения от пожара пролива значение площади пролива принято равным  $F_{\text{ж}}=2000 \text{ м}^2$ .

Эффективный энергозапас горючей паровоздушной смеси определен с учетом коэффициента участия горючего вещества во взрыве  $Z$  и с учетом расположения облака на поверхности земли и равен формуле (6.3)

$$E = 143460 \cdot 46,454 \cdot 0,1 \cdot 2 = 1332858 \text{ МДж.}$$

При расчете параметров взрыва скорость фронта пламени определена исходя из класса горючего вещества и класса загроможденности пространства (см. Приложение 2 к настоящему пособию) и принята равной  $V_{\text{г}}=300 \text{ м/с}$ .

При расчете параметров «пожара-вспышки» радиус зоны, ограниченной НКПР,  $R_{\text{НКПР}}$  определяется по формуле (6.10) и равен

$$R_{\text{НКПР}} = 7,8 \cdot \left( \frac{143460}{1,72 \cdot 2,3} \right)^{0,33} = 249 \text{ м.}$$

Результаты расчетов параметров поражающих факторов для огненного шара и взрыва представлены в табл. 6.5.

Таблица 6.5

Результаты расчетов параметров поражающих факторов

| Расстояние $r$ , м | Огненный шар                    | Взрыв            |            |
|--------------------|---------------------------------|------------------|------------|
|                    | $q_{o.ш.}$ , кВт/м <sup>2</sup> | $\Delta P$ , кПа | $i$ , Па·с |
| 50                 | 75,53                           | 83,2             | 7860,9     |
| 100                | 70,93                           | 79,7             | 6485,1     |
| 200                | 56,75                           | 53,1             | 3179,5     |
| 300                | 42,05                           | 38,3             | 2057,6     |
| 400                | 30,33                           | 29,8             | 1513,2     |
| 500                | 21,89                           | 24,4             | 1194,4     |
| 600                | 15,99                           | 20,6             | 985,8      |
| 700                | 11,88                           | 17,8             | 838,9      |
| 800                | 8,98                            | 15,7             | 729,9      |
| 900                | 6,89                            | 14,1             | 645,9      |
| 1000               | 5,37                            | 12,7             | 579,1      |
| 1200               | 3,38                            | 10,7             | 479,9      |
| 1400               | 2,22                            | 9,2              | 409,6      |
| 1600               | 1,50                            | 8,1              | 357,3      |
| 1800               | 1,05                            | 7,2              | 316,8      |
| 2000               | 0,74                            | 6,5              | 284,6      |

**Пример 6.2 Провести оценку зон действия поражающих факторов для объекта хранения бензина**

*Исходные данные:*

Резервуары объемом 2000 м<sup>3</sup> расположены на территории резервуарного парка склада бензина. Площадь, занимаемая резервуарным парком и ограниченная обвалованием, равна 3000 м<sup>2</sup>. Физические свойства веществ и материалов представлены в табл. 6.6. Остальные исходные данные принять из примера 6.1.

## Физические свойства веществ и материалов

| Параметр                                                                                | Значение |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Температура кипения (пределы выкипания) бензина, °С                                     | 35÷215   |
| Удельная теплота сгорания паров бензина $E_{уд}$ , кДж/кг                               | 43641    |
| Нижний концентрационный предел распространения пламени паров бензина $C_{НКПР}$ , % об. | 1,0      |

*Решение:*

1. Расчет количества опасного вещества, участвующего в аварии

Бензин при температуре окружающей среды является стабильной жидкостью, поэтому при расчете количества вещества, участвующего в образовании взрывоопасной паровоздушной смеси, принимали, что  $G_{мгн}=0$  и  $G_{книг}=0$ . В связи с этим, сценарий образования огненного шара далее не рассматривался.

Площадь пролива жидкости на неограниченной поверхности (материал подстилающей поверхности – грунт) при полной разгерметизации резервуара будет равна (2.7)

$$F_{ж} = 20 \cdot 0,8 \cdot 2000 = 32000 \text{ м}^2.$$

Так как площадь пролива, определенная для случая розлива на неограниченной поверхности  $F_{ж}=32000 \text{ м}^2$  больше площади, ограниченной обвалованием  $F_{ж}=3000 \text{ м}^2$ , то окончательно принимаем  $F_{ж}=3000 \text{ м}^2$ .

При расчете массы газа в свободном объеме резервуара, давление  $P$  в формуле (3.12) принимаем равным давлению насыщенных паров бензина  $P_{н}$ . По ГОСТ Р 51105-97 «Топлива для двигателей внутреннего сгорания. Неэтилированный бензин» давление насыщенных паров бензина летнего класса не должно быть более 70 кПа, поэтому принимаем  $P_{н}=70 \text{ кПа}$ . Молекулярную массу паров бензина в свободном объеме резервуара и при расчете интенсивности испарения с поверхности пролива принимаем равной молекулярной массе наиболее легколетучего компонента (н-бутан).

Количество пара в свободном объеме резервуара равно (3.12)

$$G_{\text{св}} = (1 - 0,8) \frac{0,058}{8,31} \frac{70000 \cdot 2000}{273,15 + 38} = 628 \text{ кг.}$$

Интенсивность испарения из пролива, обусловленного диффузионными процессами (2.5),

$$W = 10^{-6} \cdot 1 \cdot \sqrt{58} \cdot 70 = 0,000533 \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{ с}).$$

Общее количество испарившейся жидкости по формуле (2.6)

$$G_{\text{исп}} = 0,000533 \cdot 3000 \cdot 3600 = 5756 \text{ кг.}$$

Суммарное количество пара, участвующего в образовании паровоздушного облака, равно

$$m = 628 + 5756 = 6384 \text{ кг.}$$

## 2. Расчет параметров поражающих факторов

Вычисляем интенсивность теплового излучения пожара пролива  $q_{\text{п.п.}}$ , а также избыточное давление  $\Delta P$  и импульс  $i$  при взрыве паровоздушной смеси на различных расстояниях от резервуара по формулам, приведенным в разделе 6.5 настоящего пособия и рекомендациям Приложения 2 к настоящему пособию.

Радиус воздействия высокотемпературных продуктов сгорания паровоздушного облака при пожаре-вспышке определяем по формуле (6.9).

При расчете интенсивности теплового излучения от пожара пролива значение площади пролива принято равным  $F_{\text{ж}} = 3000 \text{ м}^2$ .

Эффективный энергозапас горючей паровоздушной смеси определен с учетом коэффициента участия горючего вещества во взрыве  $Z$  и с учетом расположения облака на поверхности земли равен (6.3)

$$E = 5756 \cdot 43,641 \cdot 0,1 \cdot 2 = 50239,5 \text{ МДж.}$$

При расчете параметров взрыва скорость фронта пламени определена исходя из класса горючего вещества и класса загроможденности пространства (см. Приложение 2 к настоящему пособию) и принята равной  $V_{\text{г}} = 200 \text{ м/с}$ .

При расчете параметров пожара-вспышки радиус зоны, ограниченной НКПР,  $R_{\text{НКПР}}$  определяется по формуле (6.10) и равен

$$R_{\text{НКПР}} = 7,8 \cdot \left( \frac{6384}{2,27 \cdot 1,0} \right)^{0,33} = 107 \text{ м.}$$

Результаты расчетов параметров поражающих факторов при пожаре пролива и взрыве представлены в табл. 6.7.

Таблица 6.7

Результаты расчетов параметров поражающих факторов

| Расстояние $r$ , м | Пожар пролива                          | Взрыв            |            |
|--------------------|----------------------------------------|------------------|------------|
|                    | $q_{\text{п.п.}}$ , кВт/м <sup>2</sup> | $\Delta P$ , кПа | $i$ , Па·с |
| 50                 | 8,754                                  | 65,1             | 1455,8     |
| 100                | 2,879                                  | 38,5             | 694,2      |
| 200                | 0,698                                  | 20,7             | 332,6      |
| 300                | 0,285                                  | 14,1             | 217,9      |
| 400                | 0,148                                  | 10,7             | 161,9      |
| 500                | 0,087                                  | 8,6              | 128,7      |
| 600                | 0,056                                  | 7,2              | 106,9      |
| 700                | 0,038                                  | 6,2              | 91,3       |
| 800                | 0,027                                  | 5,5              | 79,7       |
| 900                | 0,020                                  | 4,9              | 70,8       |
| 1000               | 0,015                                  | 4,4              | 63,6       |
| 1200               | 0,009                                  | 3,7              | 52,9       |
| 1400               | 0,006                                  | 3,1              | 45,3       |
| 1600               | 0,004                                  | 2,8              | 39,6       |
| 1800               | 0,003                                  | 2,4              | 35,1       |
| 2000               | 0,002                                  | 2,2              | 31,6       |

## ЛИТЕРАТУРА

1. Bernatik, A. Loss prevention in heavy industry: Risk assessment of large gasholders /, M. Libisova // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2004. – N 17 (4). – P.271.
2. Bosch, C.J.H. van den Yellow Book, Methods for the calculation of the physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases) / C.J.H. van den Bosch, R.A.P.M. Weterings - Third edition. - The Netherlands: Committee for the Prevention of Disasters, CPR-14E, The Hague, 1997. – 870 p.
3. Blocken, B. CFD simulation of the atmospheric boundary layer / B. Blocken, T. Stathopoulos, J. Carmeliet // Atmospheric Environment. – 2007. – N 41(2). – P.238.
4. Britter, R. Toxic industrial chemical (TIC) source emissions modeling for pressurized liquefied gases / R. Britter, J. Weil, J. Leung, S. Hanna // Atmospheric Environment. – 2011. – N 45. – P. 1.
5. Choudhury, D. Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling / D. Choudhury. - Lebanon, NH: Fluent Inc., 1993. – 70 p.
6. Conrado, C. The influence of chemical composition on vaporization of LNG and LPG on unconfined water surfaces / C. Conrado, V. Vesovic // Chemical engineering science. – 2000. – V 55. – P.4549.
7. Crowl, D.A. Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications / D.A. Crowl, J.F. Louvar. - 3 Ed. - Prentice Hall, 2011. – 752 p.
8. Fauske, H.K. Flashing flows: some practical guidelines for emergency releases / H.K. Fauske // Plant/Operation Progress. – 1985. – N 4. – P.132.
9. Fauske, H.K. Source term considerations in connection with chemical accidents and vapour cloud modeling / H.K. Fauske, M. Epstein // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 1988. – N 1. – P.75.

10. Fingas, M. F. Studies on the evaporation of crude oil and petroleum products: I. The relationship between evaporation rate and time / M. F. Fingas // J. Hazardous Materials. – 1997. – N 3. – P.227.
11. Fingas, M. F. Studies on the evaporation of crude oil and petroleum products: II. Boundary layer regulation / M. F. Fingas // J. Hazardous Materials. - 1998. – N 1-3. – P.41.
12. Fingas, M. F. Modeling evaporation using models that are not boundary layer regulated / M. F. Fingas // J. Hazardous Materials. – 2004. – N 1-2. – P.27.
13. Fluent Inc. Fluent 6.3.21. User's Guide [Электронный ресурс]. - Lebanon, 2006. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
14. Gavelli, F. Application of CFD (Fluent) to LNG spills into geometrically complex environments / F. Gavelli, E. Bullister, H. Kytomaa // J. Hazard. Mater. – 2008. – N 159. – P .158.
15. Hanna, S. R. Modeling VOC emissions and air concentration from the Exxon Valdez oil spill / S. R. Hanna, P. J. Drivas // Air & Waste. – 1993. – N 3. – P.298.
16. Hansen, O. R. Validation of FLACS against experimental data sets from the model evaluation database for LNG vapor dispersion / O. R. Hansen, F. Gavelli, M. Ichard, S. G. Davis // J. Loss Prev. Process Ind. – 2010. – N 23. – P.857.
17. Incropera, F.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer / F.P. Incropera, D. P. DeWitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine. - 6th Edition. - Wiley, 2006. – 1024 p.
18. Kalinin, E.K. Film boiling heat transfer / E.K. Kalinin, I.I. Berlin, V.V. Kostyuk // Advances in Heat Transfer. – 1975. – N 11. – P.51.
19. Khajehnajafi, S. Correlations for mass transfer from a liquid spill: comparisons and recommendations / S. Khajehnajafi, R. Pourdarvish // Process Safety Progress. – 2011. – N 2. – P.178.

20. Launder, B. E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence / B. E. Launder D. B. Spalding. - London, England: Academic Press, 1972. – 169 p.
21. Law, C.K. Combustion physics / C.K. Law. - New York: Cambridge University Press, 2006. – 722 p.
22. Leonelli, P. The modeling of pool vaporization / P. Leonelli, C. Stramigioli, G. Spadoni // J. Loss Prevention Process Industries. – 1994. – N 6. – P. 443.
23. Luketa-Hanlin, A. On the application of computational fluid dynamics codes for liquefied natural gas dispersion / A. Luketa-Hanlin, R.P. Koopman, D.L. Ermak // Journal of Hazardous Materials. – 2007. – N 140. – P.504.
24. Mikesell, J. L. Evaporation of contained spills of multicomponent nonideal solutions / J. L. Mikesell, A. C. Buckland, V. Diaz, J. J. Kives // Proceedings of International Conference and Workshop on Modeling and Mitigating the Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials. - 1991. CCPS, AIChE. – P.103.
25. Okamoto, K. Evaporation characteristics of multi-component liquid. / K. Okamoto, N. Watanabe, Y. Hagimoto, K. Miwa, H. Ohtahi // J. Loss Prevention Process Industries. – 2010. – N 1. – P.89.
26. Papanikolau, E. Validation of a numerical code for the simulation of a short-term CO<sub>2</sub> release in an open environment: Effect of wind conditions and obstacles / E. Papanikolau, M. Heitsch, D. Baraldi // Journal of Hazardous Materials. – 2011. – N 190. – P. 268.
27. Shih, T. H. A new k- $\epsilon$  eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows – model development and validation / T. H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, J. Zhu // Computers & Fluids. - 1995. – N 3. – P.227.
28. Schlichting, H. Boundary-Layer Theory / H. Schlichting. - 6th Edition. - New York: McGraw-Hill Book Company, 1968. – 817 p.

29. Sklavounos, S. Simulation of Coyote series trials – Part I: CFD estimation of non-isothermal LNG releases and comparison with box-model predictions / S Sklavounos, F. Rigas // Chem Eng Sci. – 2006. – V 61. – P.1434.
30. TNO Yellow Book. Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases) // Committee for the Prevention of Disasters, CRP 14E, The Hague, The Netherlands, 1997. – 870 p.
31. Troen, I. European Wind Atlas / I. Troen, Petersen E.L. – Denmark, Roskilde: Risø National Laboratory, 1989. – 656 p.
32. Woodward, J.L., 1995. Aerosol drop correlation and corrected rainout data using models of drop evaporation, pool absorption, and pool evaporation. In: CCPS/AIChE Int. Conf. and Workshop on Modeling and Mitigating the Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials. AIChE/CCPS, 345 East 47th St., New York, NY 10017, pp. 117 – 148.
33. Акимов, В.А. Надежность технических систем и техногенный риск / В.А. Акимов и др. - М.: ЗАО ФИД "Деловой экспресс", 2002. – 368 с.
34. Александров, И.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты / И.А. Александров. – М.: Химия, 1978. – 280 с.
35. Баратов, А.Н. Пожарная безопасность: учебное пособие/ А.Н. Баратов, В.А. Пчелинцев – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. – 144 с.
36. Белов, И.А. Моделирование турбулентных течений. Учебное пособие. / И.А. Белов, С.А. Исаев – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. – 109 с.
37. Бесчастнов, М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение / М.В. Бесчастнов – М.: Химия, 1991. – 432 с.
38. Брусиловский, А.И. Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа / А.И. Брусиловский. – М.: Грааль, 2002. – 575 с.
39. Брушлинский, Н.Н. Моделирование пожаров и взрывов / Н.Н. Брушлинский, А.Я. Корольченко. – М.: Изд. «Пожнаука», 2000. – 492с.

40. Бусингер, Д.А. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / Дж. А. Бусингер, Х. Теннекес, Дж. К. Вингаард; под ред. Ф. Т. М. Ньистадта, Х. Ван Допа; пер. с англ. под ред. А. М. Яглома. – М.: Гидрометеиздат, 1985. – 351 с.
41. Галеев, А.Д. Моделирование формирования взрывоопасного облака при испарении с поверхности аварийного пролива нефти / А.Д. Галеев, С.И. Поникаров // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – N 2. – С. 22.
42. Галеев, А.Д. Образование и распространение облаков тяжелых газов при авариях на объектах химической и нефтехимической промышленности: дис. ... канд. тех. наук: 05.26.03 / Галеев Айнура Дамирович. – Казань, 2006. – 227 с.
43. Галеев, А.Д. Численный анализ процесса испарения нагретой нефти с поверхности аварийного пролива / А.Д. Галеев, С. И. Поникаров // Инженерно-физический журнал. – 2011. – N 6. – С.1297.
44. Гиргидов, А.Д. Механика жидкости и газа (гидравлика): Учебник для вузов / А.Д. Гиргидов. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 545 с.
45. Иванов, А.В. Разработка методических основ оценки последствий химических промышленных аварий (на примере металлургического комбината): дис. ... канд. тех. наук: 05.26.04 / Иванов Андрей Валерьевич. – М., 1999. – 243 с.
46. Калверт, С. Защита атмосферы от промышленных загрязнений. Справочник. В 2 ч. / С. Калверт, Г. Инглумд; пер. с англ. под ред. А. Г. Сутугина, Е. Н. Теверовского. – М.: Металлургия, 1988. – 712 с.
47. Колодкин, В.М. Количественная оценка риска химических аварий / В.М. Колодкин, А.В. Мушин, А.К. Петров, В.Г. Горский. – Ижевск: Издательский дом «Удмуртский университет», 2001 – 228с.
48. Кольман, В. Методы расчета турбулентных течений: Пер. с англ. / В. Кольмана. – М.: Мир, 1984. – 462 с.

49. Котляревский, В.А. Безопасность резервуаров и трубопроводов / В.А. Котляревский, А.А. Шаталов, Х.М. Ханухов. – М.: Изд-во «Экономика и информатика», 2000. – 555 с.
50. Кочетов, Н.М. Моделирование процесса парообразования сжиженных газов при их аварийном разливе / Н.М. Кочетов // Проблемы анализа риска. – 2009. – N 3. – С.64.
51. Мартынюк, В.Ф. Защита окружающей среды в чрезвычайных ситуациях: учебное пособие для вузов / В.Ф. Мартынюк, Б.Е. Прусенко. - М.: ФГУП Изд-во "Нефть и газ" РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 336 с.
52. Маршалл, В. Основные опасности химических производств / В. Маршалл. – М.: Мир, 1989. – 671 с.
53. Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ: [руководство по безопасности: утв. приказом Ростехнадзора от 20.04.2015 N 158].
54. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах: [методика: утв. Приказом МЧС РФ от 10.07.2009 N 404].
55. Методика оценки последствий химических аварий (Методика «Токси-2.2»): сб. док-тов // Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах. Сер. 27. Вып. 2 / Кол. авт. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: ГУП НТЦ «Промышленная безопасность», 2006. – 208 с.
56. Методические рекомендации по классификации аварий и инцидентов на опасных производственных объектах химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности: [РД 09-398-01: утв. Приказом Госгортехнадзора России от 31.01.01 №7].
57. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств:

[Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности: утв. Приказом Ростехнадзора от 11.03.2013 г. № 96].

58. Райст, П. Аэрозоли. Введению в теорию / П. Райст. – М.: Мир, 1987. – 280 с.

59. Рудин, М.Г. Карманный справочник нефтепереработчика / М.Г. Рудин, В.Е. Сомов, А.С. Фомин. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 2004. – 336 с.

60. Салин, А.А. Методика прогнозирования последствий аварийных проливов бинарных растворов: дис. ... канд. тех. наук: 05.26.03 / Салин Алексей Александрович. - Казань, 2013. – 142 с.

61. Сафонов, В.С. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности / В.С. Сафонов, Г.Э. Одишария, А.А. Швыряев. - М.: НУМЦ Минприроды России, 1996. – 208 с.

62. Старовойтова, Е.В. Прогнозирование последствий аварийных залповых выбросов сжиженных газов: дис. ... канд. тех. наук: 05.26.03 / Старовойтова Евгения Валерьевна. – Казань, 2012. – 195 с.

63. Цыкало, А.Л. Испарение и рассеивание аммиака при его разливах и утечках. Серия: Азотная промышленность / А.Л. Цыкало, И. Л. Стрижевский, А. Д. Багмет. – М.: НИИТЭХИМ, 1982. – 48 с.

64. Якуш, С.Е. Гидродинамика и горение газовых и двухфазных выбросов в открытой атмосфере: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.02.05 / Якуш Сергей Евгеньевич. – М., 2000. – 336 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

*Пример.* Выполнить расчет поля концентраций для случая залпового выброса 6 тонн сжиженного аммиака из емкости. Температура жидкости в емкости принята равной 35°C. Время экспозиции равно 10 мин. Скорость ветра на высоте 10 м – 1 м/с, состояние атмосферы – изотермия.

### 1. Расчет параметров источника

Количество жидкости, мгновенно вскипающей при разгерметизации оборудования, вычисляется по формуле

$$G_{\text{мгн}} = m_{\text{ж}} \left( 1 - \exp \left( - \frac{C_p (T_0 - T_{\text{кип}})}{\Delta H} \right) \right); \quad (\text{П1.1})$$

$$G_{\text{мгн}} = 6000 \cdot \left( 1 - \exp \left( - \frac{4600 \cdot (308 - 239,57)}{1380000} \right) \right) = 1224 \text{ кг.}$$

В результате мгновенного вскипания жидкости происходит дробление жидкой фазы на фрагменты, потеря устойчивости последних с образованием более мелких капель – аэрозолей. Количество вещества, переходящего в первичное облако в виде аэрозолей:

$$G_{\text{жс}} = \min \{ G_{\text{мгн}}, m_{\text{ж}} - G_{\text{мгн}} \}; \quad (\text{П1.2})$$

$$G_{\text{жс}} = 1224 \text{ кг.}$$

Представляем источник первичного облака в виде цилиндра с радиусом равным высоте. Радиус цилиндра равен

$$R_f = H = \sqrt[3]{\frac{G_{\text{мгн}}}{\pi \cdot \rho_{\text{кип}}}}, \quad (\text{П1.3})$$

где  $\rho_{\text{кип}}$  – плотность пара при температуре кипения и атмосферном давлении, кг/м<sup>3</sup>.

Плотность пара определяем по формуле

$$\rho_{\text{кип}} = \frac{M}{22,4} \cdot \frac{273}{T_{\text{кип}}}; \quad (\text{П1.4})$$

$$\rho_{\text{кип}} = \frac{17}{22,4} \cdot \frac{273}{239,72} = 0,86 \text{ кг/м}^3.$$

Радиус (высота) первичного облака равен

$$R_f = H = \sqrt[3]{\frac{1224}{3,14 \cdot 0,86}} \approx 8 \text{ м.}$$

При определении размеров пролива принимается, что оставшаяся после мгновенного вскипания жидкость растекается на подстилающей поверхности с образования слоя толщиной 0,05 м. Исходя из данного условия радиус пролива определяем по формуле

$$R_s = \sqrt{\frac{m_{\text{жс}} - G_{\text{мгн}} - G_{\text{жс}}}{0,05 \cdot \pi \cdot \rho_{\text{жс}}}}; \quad (\text{П1.5})$$

$$R_s = \sqrt{\frac{6000 - 1224 - 1224}{0,05 \cdot 3,14 \cdot 680}} \approx 6 \text{ м.}$$

Интенсивность парообразования с поверхности аварийного пролива определим по формуле

$$W = \frac{(\lambda_{\text{под}} \cdot C_{\text{Р,под}} \cdot \rho_{\text{под}})^{0,5} \cdot (T_0 - T_{\text{кин}})}{\Delta H \cdot (\pi \cdot t)^{0,5}} + \frac{0,035 \cdot U^{0,8} \cdot \lambda_a \cdot (T_0 - T_{\text{кин}})}{v_a^{0,8} \cdot d^{0,2} \cdot \Delta H}, \quad (\text{П1.6})$$

где  $\lambda_{\text{под}}$  – коэффициент теплопроводности материала, на поверхность которого разливается жидкость, Вт/(м·К) (для бетона  $\lambda_{\text{под}}=1,28$  Вт/(м·К));  $C_{\text{Р,под}}$  – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К) (для бетона  $C_{\text{Р,под}}=1130$  Дж/(кг·К));  $\rho_{\text{под}}$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup> (для бетона  $\rho_{\text{под}}=2300$  кг/м<sup>3</sup>);  $T_0$  – начальная температура материала, К;  $t$  – текущее время с момента начала испарения, с (но не менее 10 с);  $\lambda_a$  – коэффициент теплопроводности воздуха при температуре  $T_0$ , Вт/(м·К) ( $\lambda_a=0,045$  Вт/(м·К));  $U$  – скорость воздушного потока над поверхностью испарения, м/с ( $U=2$  м/с);  $d$  – характерный диаметр пролива, м;  $v_a$  – кинематическая вязкость воздуха при  $T_0$ , м<sup>2</sup>/с ( $v_a=0,000025$  м<sup>2</sup>/с).

Подставив значения постоянных величин в формулу (П1.6), получим следующую функцию  $W(t)$

$$W(t) = 0,051 \cdot t^{-0,5} + 0,000228 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}). \quad (\text{П1.7})$$

Так как величина  $W(t)$  переменная по времени, то необходимо задать ее в программе Ansys Fluent с помощью пользовательской функции (User-Defined Function). Код пользовательской функции представлен ниже. Поскольку интенсивность парообразования в программе Ansys Fluent будет задаваться в единицах  $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ , то данная величина отнесена к высоте пристенной ячейки.

Для задания профилей скорости и турбулентных характеристик на входе в расчетную область будем использовать следующие уравнения

скорость ветра  $U$ , м/с:

$$U = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{y + y_0}{y_0}\right), \quad (\text{П1.8})$$

где  $u_*$  – скорость трения, м/с (так как данная величина принимается постоянной по высоте, то ее можно определить при известном значении скорости ветра на определенной высоте, что и сделано в коде);  $y_0$  – аэродинамическая шероховатость подстилающей поверхности, м;  $y$  – координата по вертикали, м;  $\kappa$  – константа Кармана ( $\kappa=0,4187$ ).

турбулентная кинетическая энергия,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ :

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}}, \quad (\text{П1.9})$$

где  $C_\mu$  – константа ( $C_\mu=0,09$ ).

скорость диссипации турбулентной кинетической энергии,  $\text{м}^2/\text{с}^3$ :

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa \cdot (y + y_0)}. \quad (\text{П1.10})$$

Данные профили задаются в программе Ansys Fluent с помощью пользовательских функций. Коды пользовательских функций для расчета интенсивности парообразования из пролива и задания профилей гидродинамических характеристик представлены ниже. Данные пользовательские функции объединены в одном файле (в рабочей папке под именем `udf_pravov.c`) и могут быть интегрированы в программу Ansys Fluent

с помощью соответствующей команды. Для обеспечения физичности результатов в коды для расчета гидродинамических характеристик введены некоторые ограничения.

## **2. Пользовательские функции**

```
#include "udf.h"
```

```
#define CMU 0.09
```

```
#define y0 0.01
```

```
#define VKC 0.4187
```

```
#define U10 1
```

```
#define h_cell 0.2
```

```
real UFR;
```

```
/* vaporization rate */
```

```
DEFINE_SOURCE(vaporization_rate,c,t,dS,eqn)
```

```
{
```

```
real current_time, source;
```

```
current_time = RP_Get_Real("flow-time");
```

```
source =(0.051*1/sqrt(current_time)+0.000228)/h_cell;
```

```
dS[eqn] =-0.0255*pow(current_time, -1.5)/h_cell;
```

```
return source;
```

```
}
```

```
/* profile for x-velocity */
```

```
DEFINE_PROFILE(x_velocity,t,i)
```

```
{
```

```
real y, x[ND_ND]; /* variable declarations */
```

```

real h = 200;
face_t f;
UFR=U10*VKC/(log((10+y0)/y0));

begin_f_loop(f,t)
{
F_CENTROID(x,f,t);
y = x[1];
if (y <= 200)
F_PROFILE(f,t,i) = UFR/VKC*log((y+y0)/y0);
else
F_PROFILE(f,t,i) = UFR/VKC*log((h+y0)/y0);
}
end_f_loop(f,t)
}

/* profile for kinetic energy */

DEFINE_PROFILE(k_profile,t,i)
{
real y, x[ND_ND];
real h = 30;
face_t f;
UFR=U10*VKC/(log((10+y0)/y0));

begin_f_loop(f,t)
{
F_CENTROID(x,f,t);
y=x[1];

```

```

if (y <= h)
F_PROFILE(f,t,i)=pow(UFR, 2)/sqrt(CMU);
else
F_PROFILE(f,t,i)=0.0001;
}
end_f_loop(f,t)
}

/* profile for dissipation energy */

DEFINE_PROFILE(dissip_profile,t,i)
{
real y, x[ND_ND];
real h = 100;
face_t f;

begin_f_loop(f,t)
{
F_CENTROID(x,f,t);
y=x[1];

if (y <= h)
F_PROFILE(f,t,i)=pow(UFR, 3)/VKC/(y+y0);
else
F_PROFILE(f,t,i)=pow(UFR, 3)/VKC/(h+y0);
}
end_f_loop(f,t)
}

```

### 3. Расчет распространения аммиака при залповом выбросе в среде пакета Ansys Fluent

#### 1. Запуск программы

Из меню Пуск запускаем программу Fluent 17.0 из папки ANSYS 17.0 - > Fluid Dynamics (рис. П1.1).

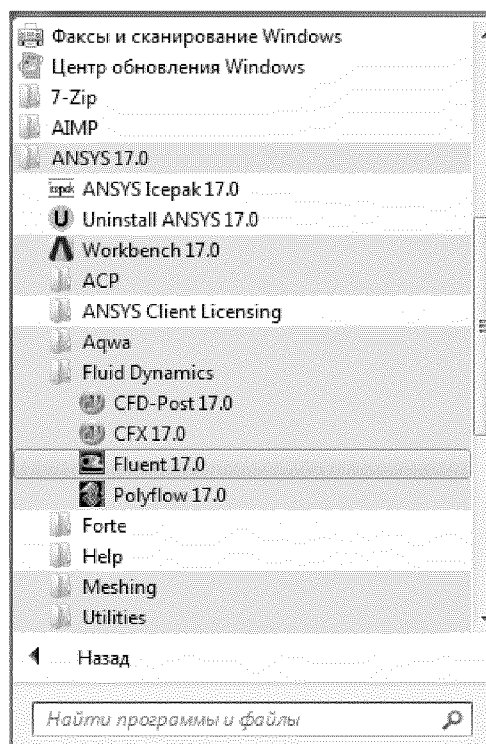


Рис. П1.1. Запуск программы Fluent 17.0 из меню Пуск

В поле окна Fluent Launcher в строке Working Directory (рис. П1.2) указываем путь рабочей папки D:\Text\agd\pravov. Выбираем параллельную версию Fluent, отметив галочкой Parallel (Local Machine), в поле Processes указываем 3. Нажимаем ОК.

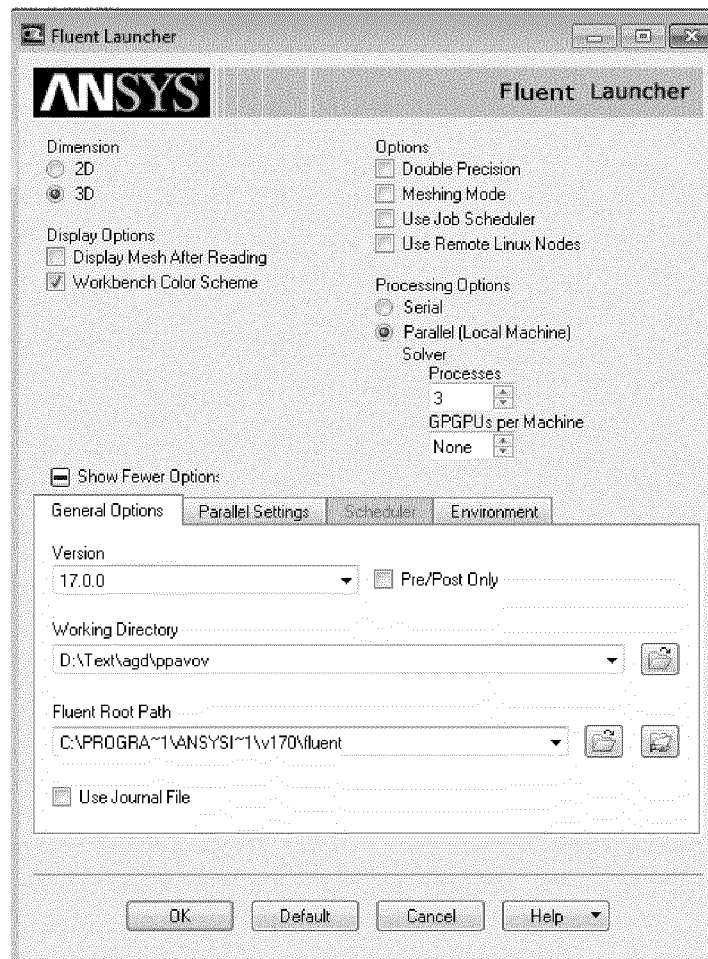


Рис. П1.2. Диалоговое окно Fluent Launcher

## 2. Импорт сетки

С помощью команды выпадающего меню File → Read → Mesh открываем файл PPAVOV\_GRID.msh. Нажав на кнопку Display меню General можно посмотреть открывшуюся сетку (рис. П1.3), выбрав при этом соответствующие поверхности в поле Surfaces.

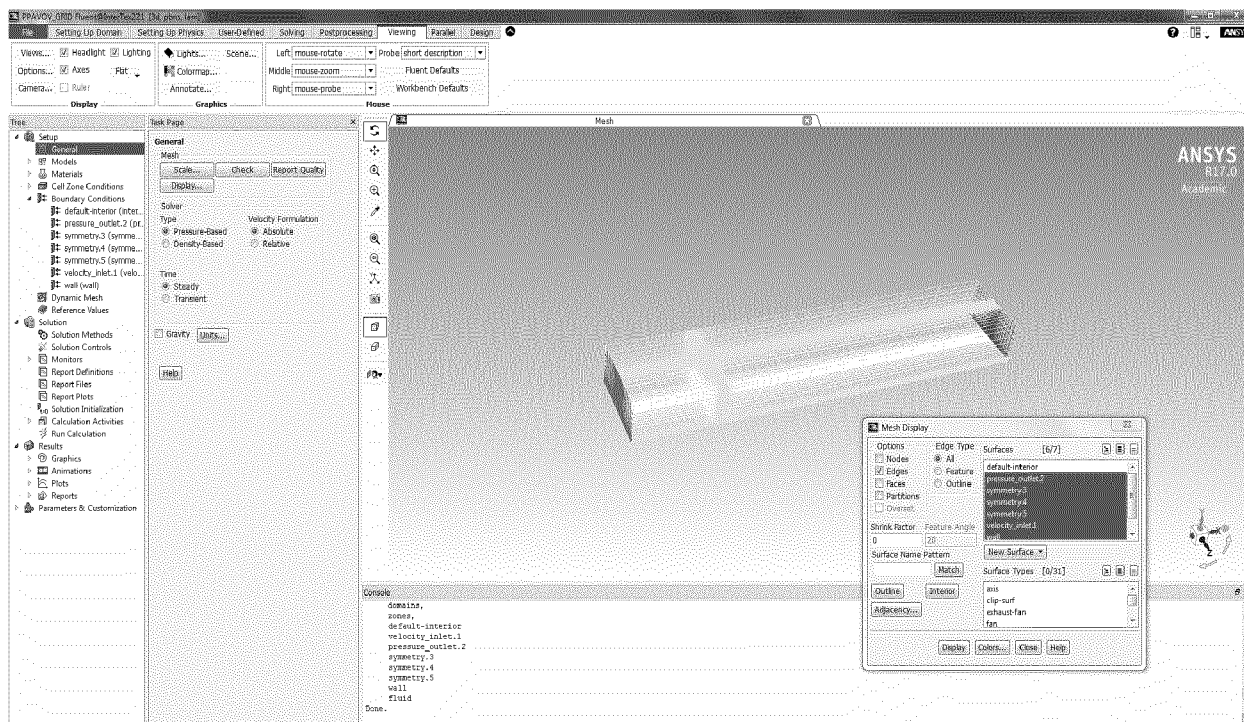


Рис. П1.3. Изображение расчетной сетки

### 3. Задание моделей

В меню General подключаем в модель силу тяжести, поставив галочку напротив Gravity и задав значение ускорения свободного падения Gravitational Acceleration в направлении оси Y, равное  $-9.81 \text{ м/с}^2$  (рис. П1.4).

Из меню Models запускаем окно Energy и подключаем уравнение для переноса энергии Energy Equation (рис. П1.5).

Из меню Models запускаем окно Viscous Model, где выбираем модель турбулентности Realizable k-ε. Нажимаем OK (рис. П1.6).

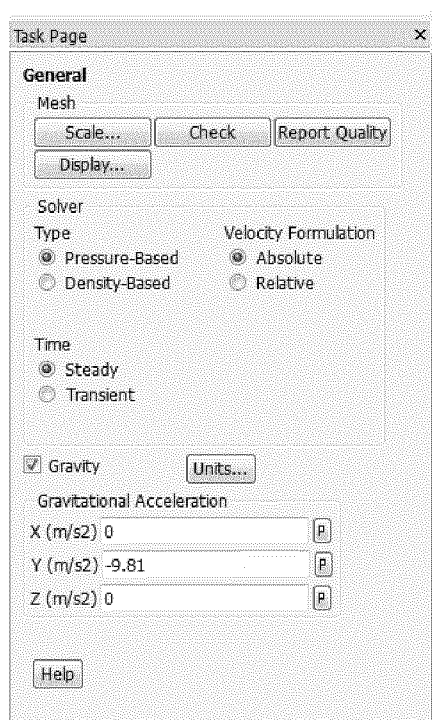


Рис. П1.4. Задание силы тяжести и ускорения свободного падения

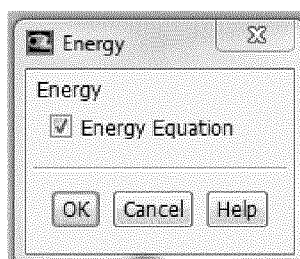


Рис. П1.5. Диалоговое окно для подключения уравнения энергии

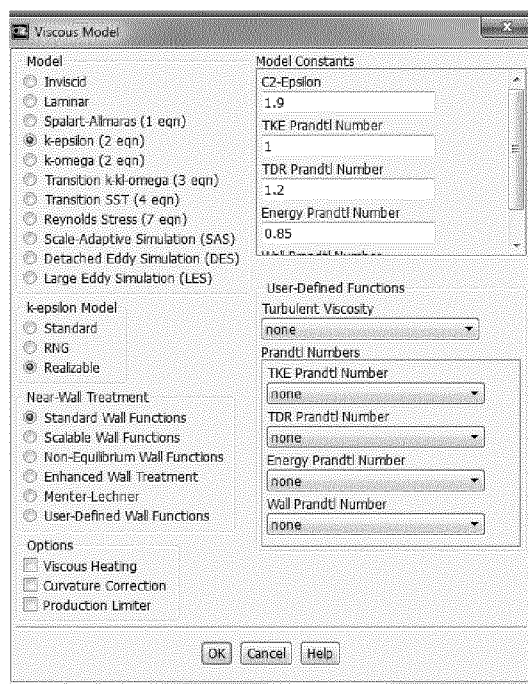


Рис. П1.6. Диалоговое окно для задания модели турбулентности

В диалоговом окне Species Model меню Models подключаем модель переноса примесей Species Transport (рис. П1.7). Нажимаем ОК.

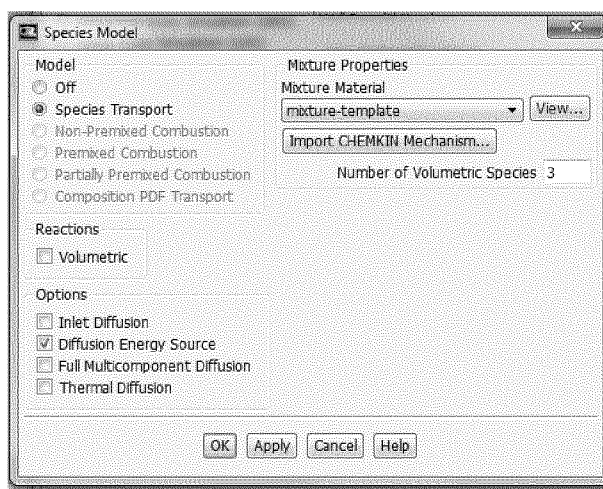


Рис. П1.7. Диалоговое окно для подключения уравнения переноса примесей

#### 4. Задание веществ

Из меню Materials запускаем окно Create/Edit Materials, нажав кнопку Create/Edit. Открываем базу веществ, нажав кнопку Fluent Database. Запускается диалоговое окно Fluent Database Materials (рис. П1.8). В выпадающем меню Material Type выбираем fluid. В списке Fluent Fluid Materials находим вещество ammonia-vapor (nh3) и нажимаем кнопку Copy. Закрываем окно Fluent Database Materials.

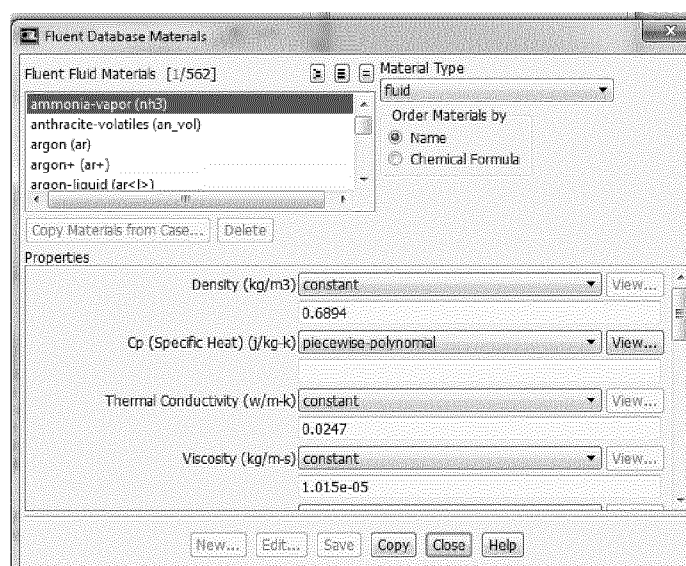


Рис. П1.8. Диалоговое окно Fluent Database Materials

В окне Create/Edit Materials выбираем в выпадающем меню Material Type (тип вещества) mixture. Задаем компоненты, нажав кнопку Edit слева от Mixture Species. В открывшемся окне Species выбираем компоненты air и ammonia-vapor (nh3), выделив соответствующие компоненты в левом окне и нажав кнопку Add. Выбранные компоненты отобразятся в окне Selected Species (рис. П1.9). Остальные компоненты удаляем из окна Selected Species, выделив их и нажав кнопку Remove. Нажимаем ОК. Задаем физические свойства газовой смеси: Density (kg/m3) – incompressible-ideal-gas; Cp (Specific Heat) (j/kg-k) – mixing-law; Thermal Conductivity (w/m-k) – mass-weighted-mixing-law; Viscosity (kg/m-s) – mass-weighted-mixing-law; Mass Diffusivity (m2-s) – constant-dilute-appx (1.9e-05). Сохраним внесенные изменения, нажав кнопку Change/Create. Закрываем окно Create/Edit Materials, нажав кнопку Close.

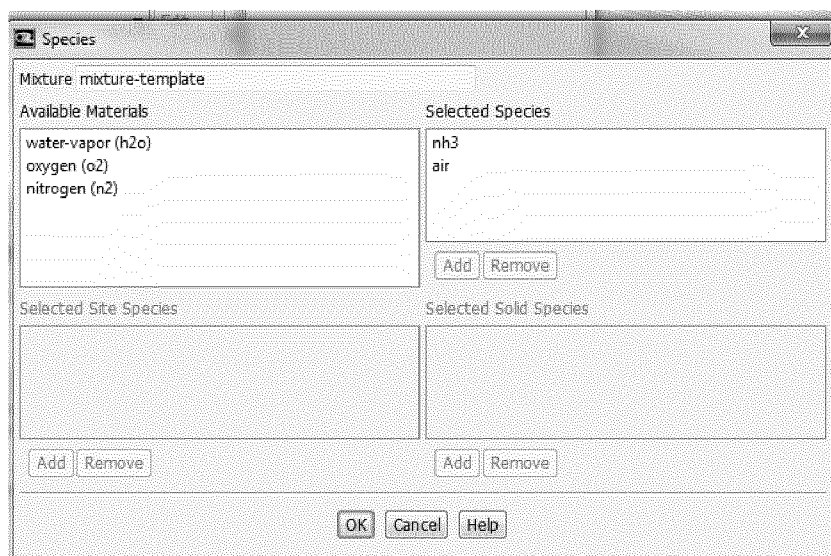


Рис. П1.9. Выбор компонентов

## 5. Задание геометрии источника

В программе Fluent значение расхода источника будем задавать в единицах  $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ , то есть расходы источника, определенные в п.1 должны быть отнесены к объемам источников первичного и вторичного облаков. Время действия источника первичного облака задаем равным 1 с. Для того,

чтобы определить источники, необходимо выделить области источников из основного объема расчетной области.

Из главного меню запускаем окно Region Adaption (рис. П1.10) с помощью команды Setting Up Domain → Mark/Adapt Cells → Region. В открывшемся окне выбираем геометрию области Cylinder из списка Shapes. Вводим координаты оси цилиндра (источник первичного облака) такие же как на рисунке, только в поле Y-Axis Max (m) задаем значение равное высоте цилиндра (источник первичного облака), определенного в п.1. Радиус цилиндра, определенный в п.1, задаем в поле Radius (m). Нажимаем кнопку Mark (отмечаем ячейки цилиндрической области с заданными размерами). Далее в окне Region Adaption отметим ячейки, для которых будет задан расход газа из пролива. Для этого в поле Y-Axis Max (m) устанавливаем значение 0.2 (размер ячейки по вертикали, прилегающей к нижней границе расчетной области), а в поле Radius (m) устанавливаем значение, соответствующее радиусу пролива. Нажимаем кнопку Mark. Закрываем окно Region Adaption.

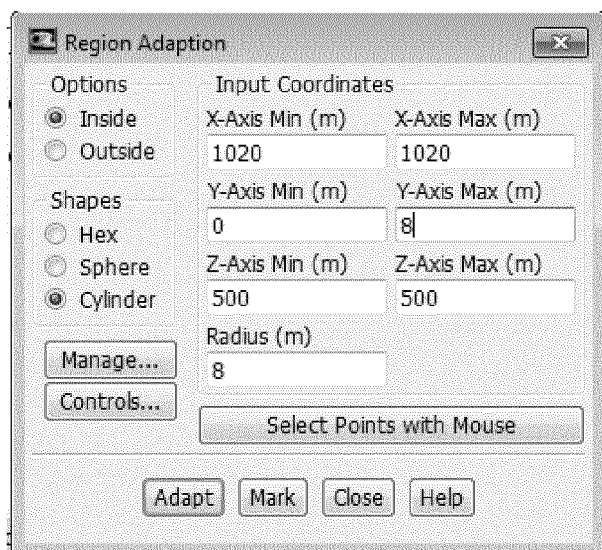


Рис. П1.10. Выбор ячеек для задания источника первичного облака в окне Region Adaption

Из главного меню запускаем окно **Separate Cell Zones** с помощью команды **Setting Up Domain → Separate → Cells**. В открывшемся окне выделяем в поле **Registers** **cylinder-r0**, а в поле **Zones** **fluid** (рис. П1.11). Нажимаем кнопку **Separate**. При этом из основной области (**fluid**) будет выделена новая область (**fluid:014**), которая будет определять источник первичного облака. Далее в поле **Registers** выбираем **cylinder-r1**, а в поле **Zones** **fluid:014**, нажимаем **Separate**. Из области **fluid:014** будет выделена новая область (**fluid:014:019**), определяющая источник вторичного облака. Переименовываем область **fluid:014** на **fluid:cloud**, а область **fluid:014:019** на **fluid:pool**, вводя новое имя в поле **Zone Name** окна **Fluid**, вызываемого двойным щелчком левой кнопки мыши по названию области в подменю **Cell Zone Conditions**.

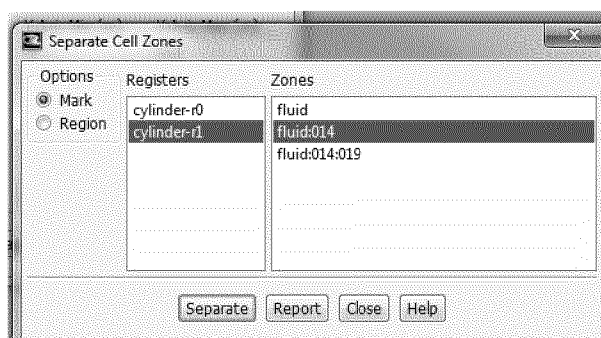


Рис. П1.11. Выделение источников первичного и вторичного облаков из расчетной области с помощью диалогового окна **Separate Cell Zones**

## 6. Задание граничных условий

На входе в расчетную область необходимо задать профили скорости и турбулентных характеристик. Данные профили зададим с помощью пользовательской функции. Из главного меню запускаем окно **Interpreted UDFs** (рис. П1.12) с помощью команды **User-Defined → Functions → Interpreted**. С помощью **Browse** выбираем файл **pravov\_udf.txt** и нажимаем кнопку **Interpret**. После выполнения команды **Interpret** пользовательские функции становятся доступными для выбора в диалоговых окнах программы **Ansys Fluent**.

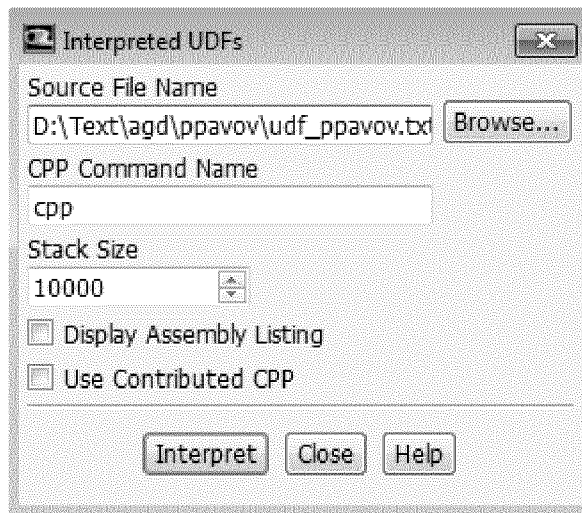


Рис. П1.12. Подключение пользовательской функции с помощью команды Interpret

Запускаем диалоговое окно Velocity Inlet (рис. П1.13) из окна Tree с помощью команды Setup → Boundary Conditions → Edit, выбрав в поле Zone границу velocity\_inlet.1. Для границы velocity\_inlet.1 во вкладке Momentum диалогового окна устанавливаем величины скорости и турбулентных характеристик как показано на рис. П1.13. Во вкладке Thermal в поле Temperature устанавливаем значение 308 К. Нажимаем ОК.

Для границы pressure\_outlet.2 во вкладке Momentum задаем граничные условия как показано на рис. П1.14. Во вкладке Thermal в поле Temperature устанавливаем значение 308 К. Нажимаем ОК.

Для твердых стенок wall, wall:009, wall:009:015, имитирующих подстилающую поверхность, во вкладке Momentum задаем значения высоты шероховатости (Roughness Height) и константы шероховатости (Roughness Constant) как показано на рис. П1.15. Нажимаем ОК.

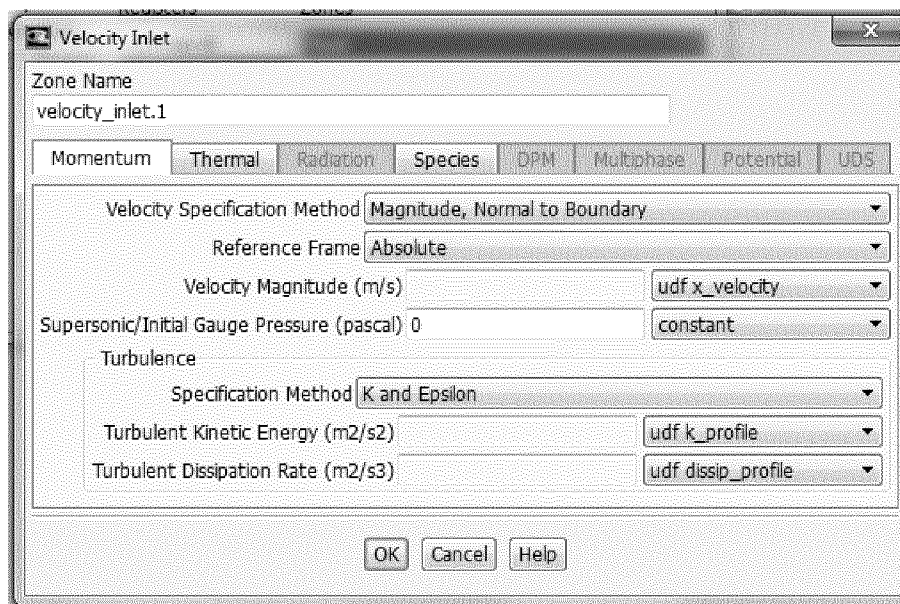


Рис. П1.13. Задание граничных условий для входной границы расчетной области

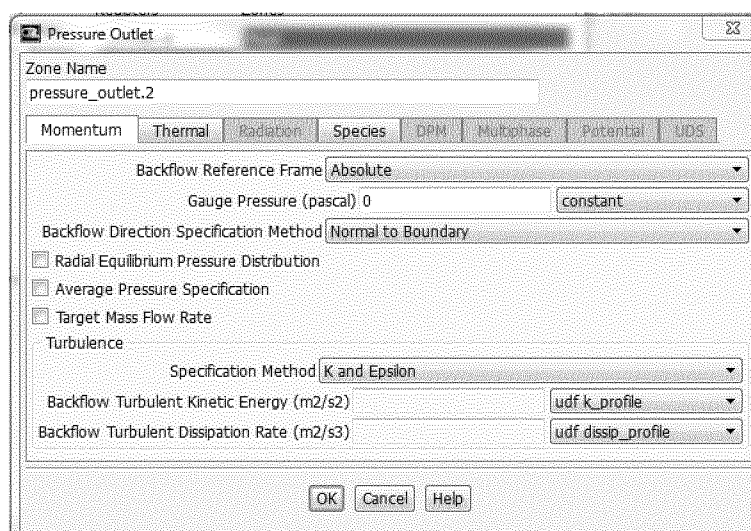


Рис. П1.14. Задание граничных условий для выходной границы расчетной области

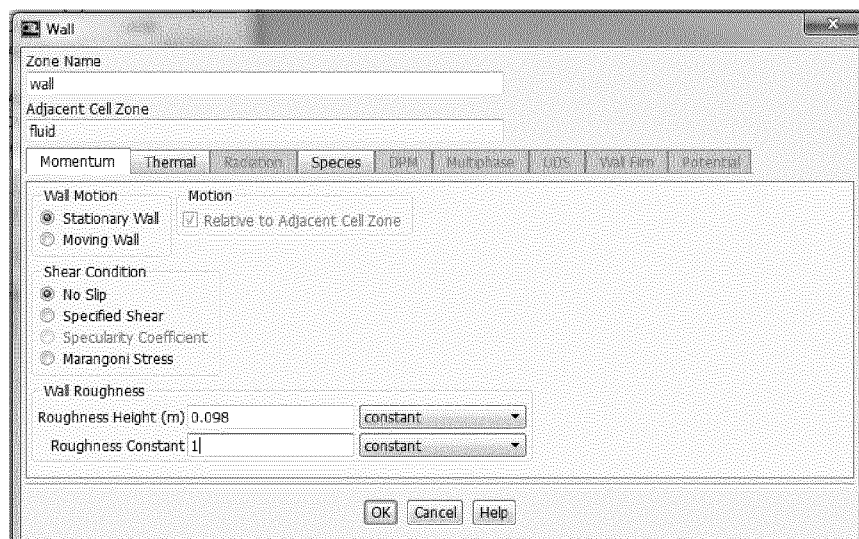


Рис. П1.15. Задание граничных условий для твердых стенок

## 7. Задание параметров точности расчета

Из окна Tree с помощью команды Solution → Monitors → Residuals-Print, Plot → Edit запускаем диалоговое окно Residual Monitors (рис. П1.16) и устанавливаем значения (Absolute Criteria) параметров точности (Residual) для характеристик турбулентности  $k$  и  $\epsilon$  равными 0.00001.

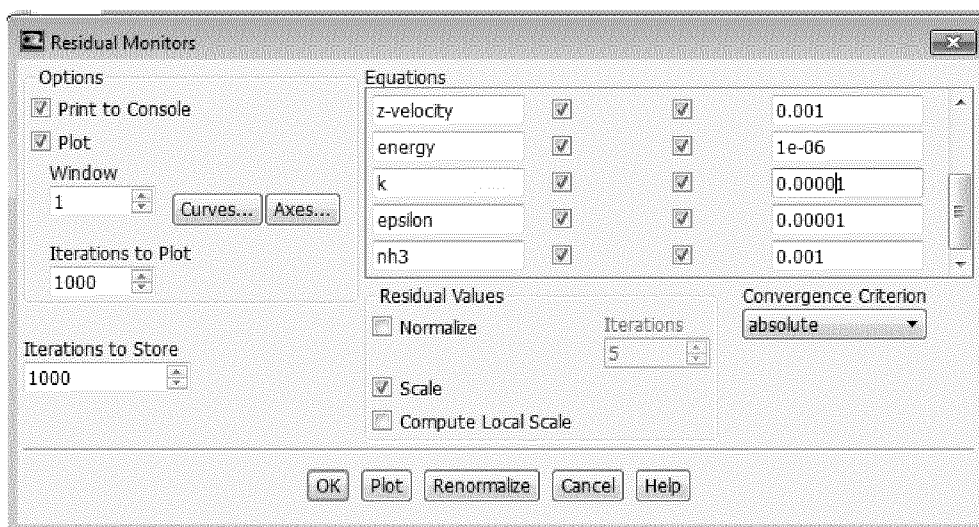


Рис. П1.16. Задание параметров точности расчета

## 8. Инициализация решения и запуск на расчет поля ветра

При расчете поля ветра следует отключить лишние уравнения (уравнение энергии и переноса примеси). Для этого открываем окно

Equations (рис. П1.17) с помощью команды Solution → Solution Controls → Equations. В открывшемся окне деактивируем уравнения для переноса примеси (nh3) и уравнение переноса энергии (Energy). Нажимаем ОК.

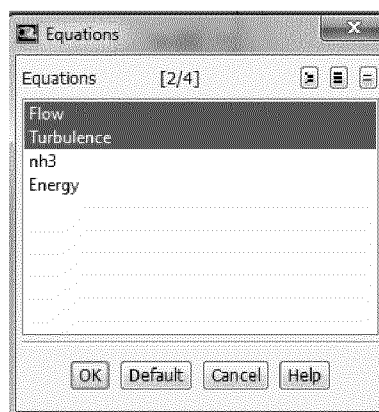


Рис. П1.17. Выбор уравнений

Из окна Tree с помощью команды Solution → Solution Initialization запускаем диалоговое окно Solution Initialization (рис. П1.18), где задаются начальные приближения параметров для последующего итерационного расчета. Для ускорения сходимости значения гидродинамических характеристик задаются отличными от тех, которые планируются получить. Выбираем метод инициализации Standard Initialization и устанавливаем в открывшемся списке следующие значения: для X-velocity - 5 m/s, для Turbulent Kinetic Energy ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) - 0.1, для Turbulent Dissipation Rate ( $\text{m}^2/\text{s}^3$ ) - 0.01, для Temperature (K) - 308. Остальные значения оставляем по умолчанию. Нажимаем кнопку Initialize.

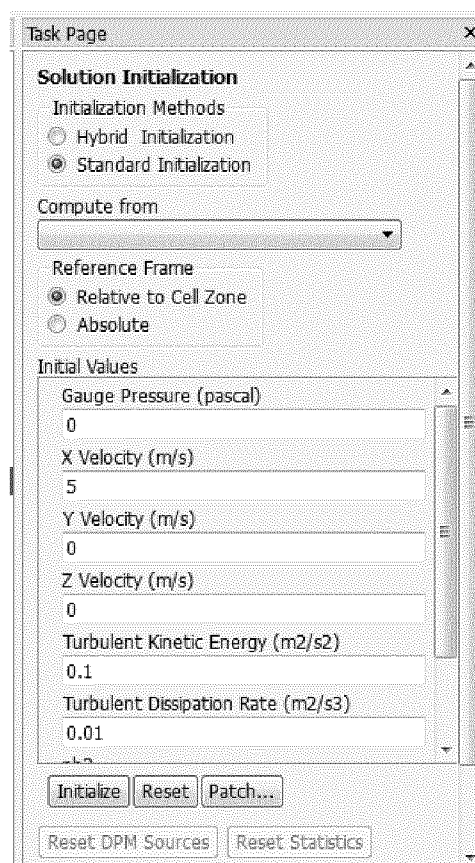


Рис. П1.18. Инициализация решения

Из окна Tree с помощью команды Solution → Run Calculation запускаем окно Run Calculation (рис. П1.19). В открывшемся окне задаем количество итераций (Number of Iterations) = 10000. Нажимаем кнопку Calculate. Расчет прекратится, когда появится сообщение !solution is converged (решение сошлось). После того, как решение сошлось, сохраняем файл с помощью команды File → Write → Case & Data.

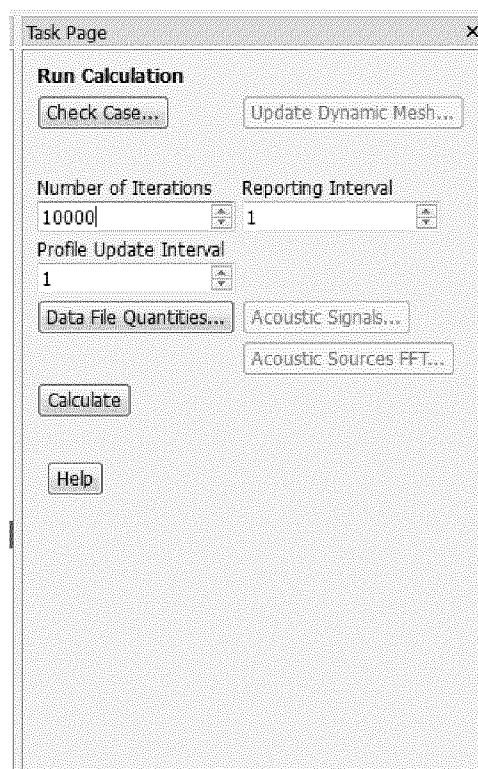


Рис. П1.19. Запуск на расчет

## 9. Анализ результатов расчета поля ветра

Для отображения расчетных профилей скорости ветра и параметров турбулентности внутри расчетной области создаем вспомогательную вертикальную линию с помощью команды Setting Up Domain → Create → Line/Rake. В открывшемся окне задаем координаты начальной и конечной точек вспомогательной линии как показано на рис. П1.20. В поле New Surface Name вводим наименование линии line-profile. Нажимаем кнопку Create.

С помощью команды Setting Up Domain → Display открываем окно Mesh Display. Выбираем в поле Surfaces следующие поверхности и линии: wall, wall:009, wall:009:015, velocity\_inlet.1, pressure\_outlet.2, line-profile. Нажимаем Display. В окне программы можно будет видеть расположение построенной линии относительно выбранных границ расчетной области (рис.П1.21).

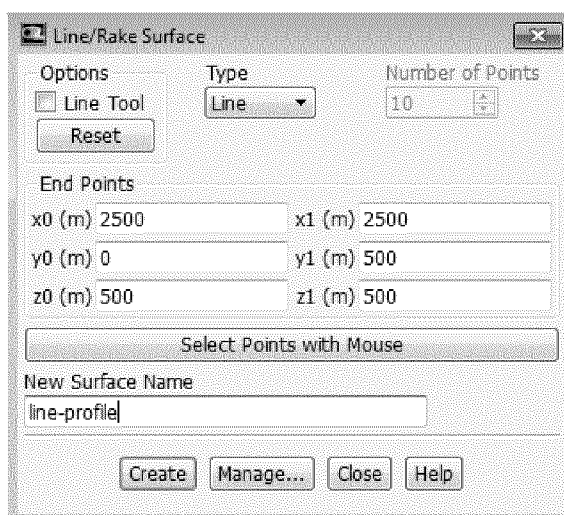


Рис. П1.20. Задание координат вспомогательной линии для отображения профилей скорости и турбулентных характеристик

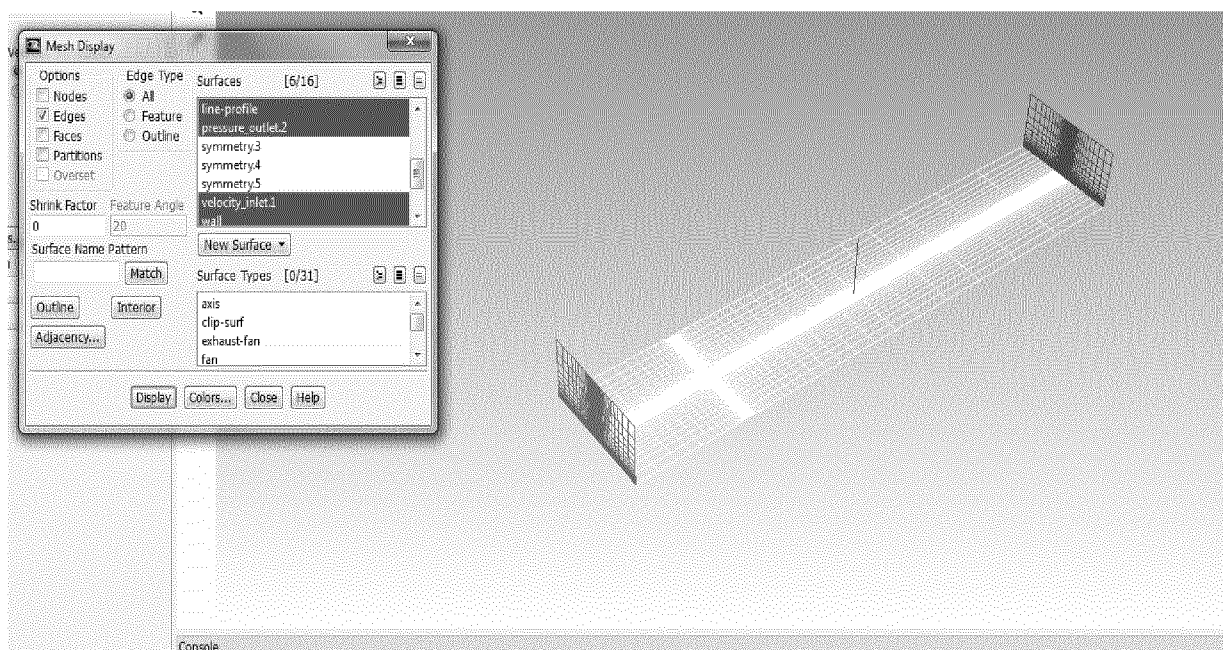


Рис. П1.21. Изображение вспомогательной линии

С помощью команды Plots → XY Plot открываем окно Solution XY Plot (рис. П1.22). Устанавливаем в поле Plot Direction значения 0;1;0 для осей X, Y, Z соответственно. Выбираем из меню Y Axis Function параметр Velocity Magnitude. В поле Surfaces выбираем line-profile и нажимаем Plot.

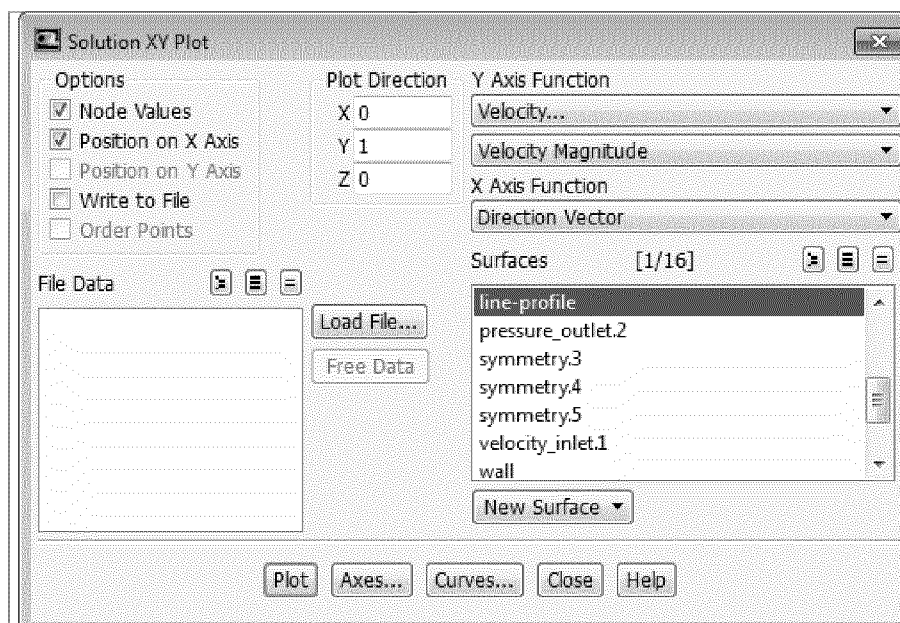


Рис. П1.22. Диалоговое окно для графического отображения результатов расчета

В графическом окне программы Fluent (рис. П1.23) отобразится профиль скорости по направлению Y (по вертикали от стенки). Аналогичным образом отображаем изменения по высоте величин турбулентности (Turbulent Kinetic Energy и Turbulent Dissipation Rate).

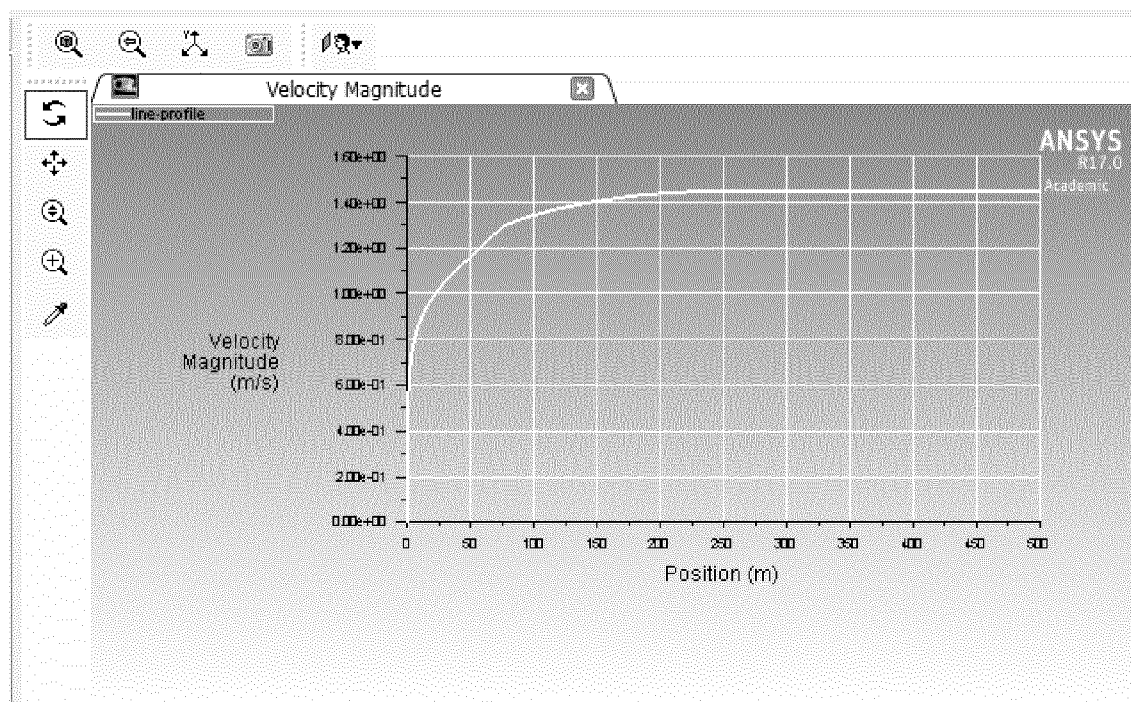


Рис. П1.23. Расчетный вертикальный профиль скорости

## 10. Задание параметров источников газовой фазы

Расчет распространения опасного вещества в поле ветра проводим в нестационарной постановке, то есть уравнения сохранения решались без учета нестационарных членов. Для учета нестационарности в окне General необходимо поставить галочку напротив Transient (рис. П1.24).

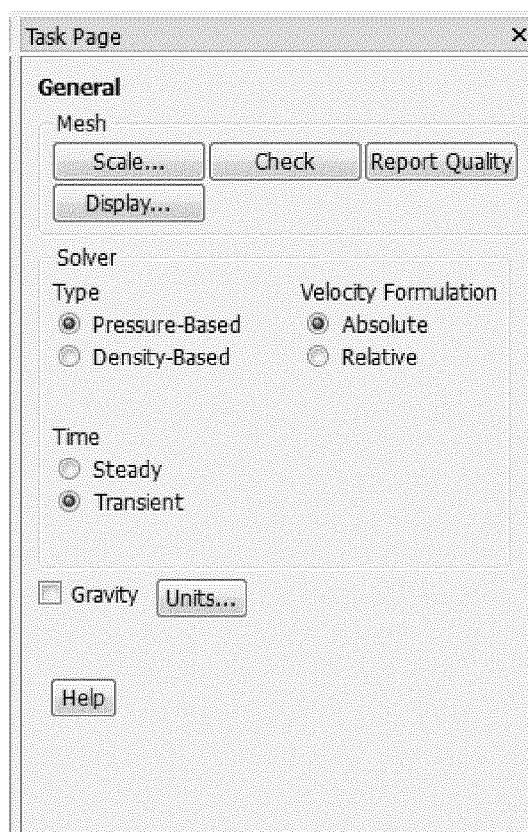


Рис. П1.24. Выбор нестационарной постановки

Так как интенсивность источника задается в единицах  $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ , то необходимо знать объем источника первичного облака. Для источника вторичного облака его интенсивность задана в единицах  $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$  в коде пользовательской функции. Для того чтобы посмотреть объем источника запускаем из окна Tree команду Reports  $\rightarrow$  Volume Integrals. В открывшемся окне (рис. П1.25) в поле Report Type выбираем Volume, а в поле Cell Zones ту область (в нашем случае, fluid:cloud) объем, которой необходимо определить. Нажимаем кнопку Compute. В поле Total Volume ( $\text{м}^3$ ) отобразится значение объема выбранной области.

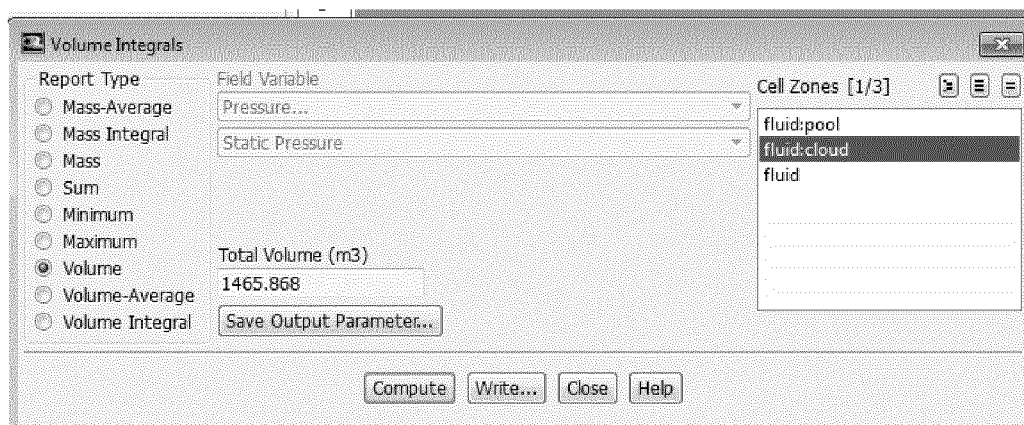


Рис. П1.25. Диалоговое окно Volume Integrals

Зададим параметры источника первичного облака, вызвав окно Fluid двойным щелчком левой кнопки мыши по названию области (fluid:cloud) в окне Cell Zone Conditions. В диалоговом окне Fluid ставим галочку напротив Source Terms и входим во вкладку Source Terms. Редактирование параметров источника осуществляется нажатием кнопки Edit (рис. П1.26). В поле Mass задаем Number of Mass sources=1 и постоянное значение источника массы (constant), равное отношению количества мгновенной вскипевшей жидкости к объему источника (определено с помощью команды Reports → Volume Integrals) и времени действия источника (1с). В поле nh3 также задаем Number of Mass sources=1 и постоянное значение источника массы (constant), равное значению, указанному в поле Mass. В поле Mass задается источник массы для уравнения неразрывности, а в поле nh3 задается источник массы для уравнения переноса компонента.

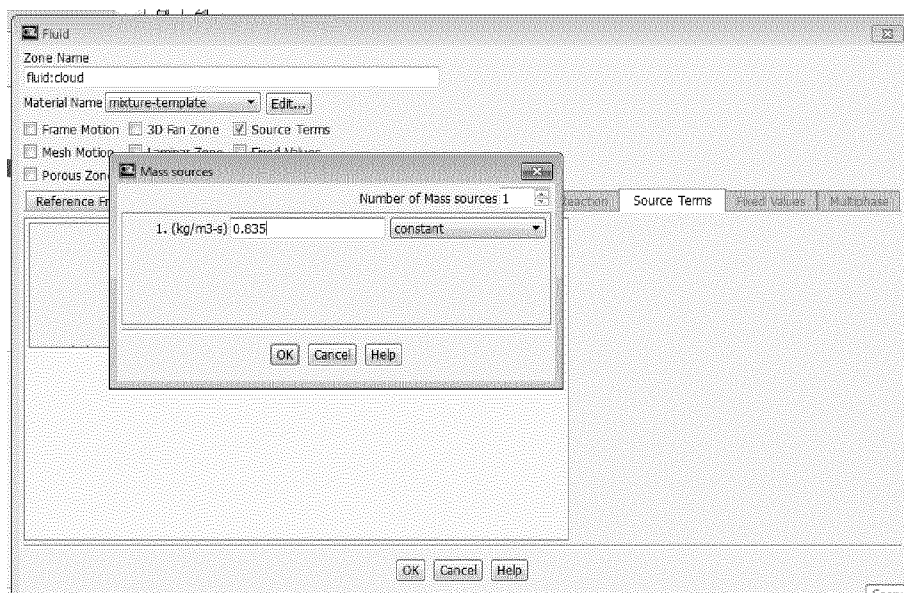


Рис. П1.26. Задание параметров источника первичного облака

Задаем источник газа, поступающего в атмосферу из пролива, вызвав окно Fluid двойным щелчком левой кнопки мыши по названию области (fluid:pool) в окне Cell Zone Conditions. Здесь в полях Mass и nh3 во вкладке Source Terms выбирается пользовательская функция (рис. П1.27).

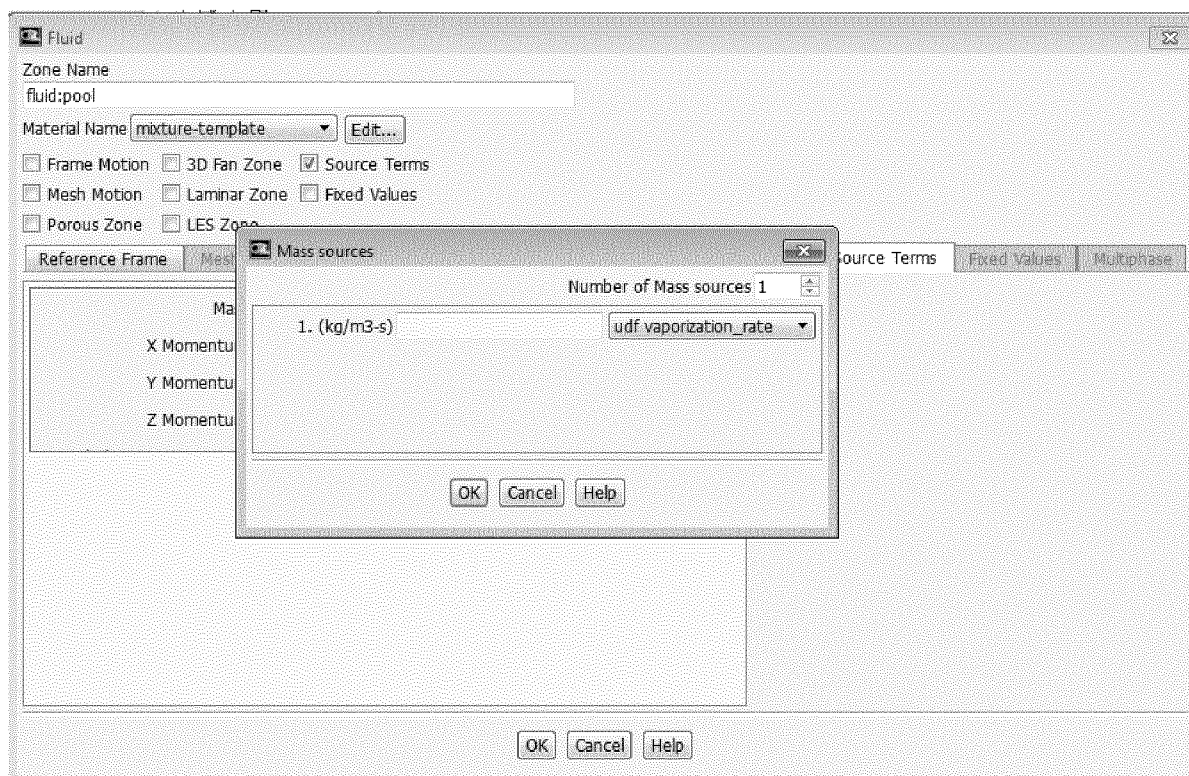


Рис. П1.27. Задание параметров источника вторичного облака

## 11. Задание параметров источника аэрозоля

Из окна Models двойным щелчком запускаем окно Discrete Phase Model. В открывшемся окне устанавливаем опции и значения параметров как показано на рис. П1.28. Другие опции оставляем по умолчанию.

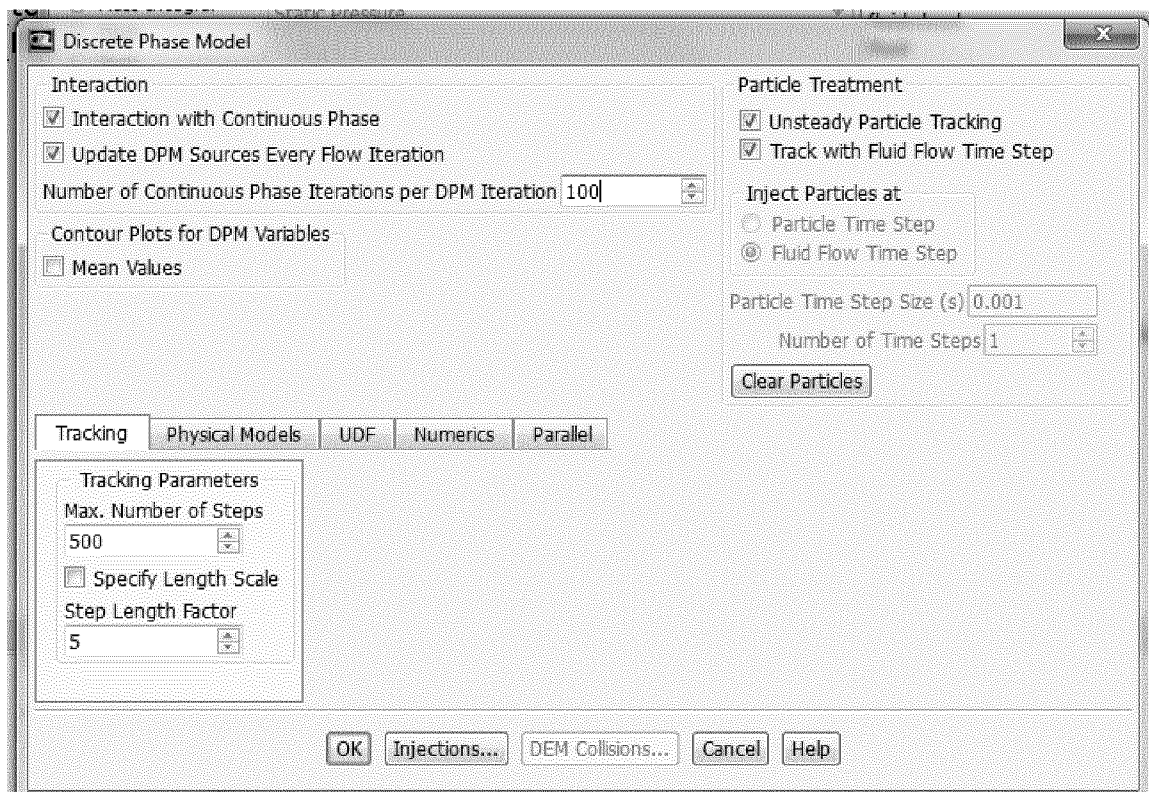


Рис. П1.28. Задание параметров расчета дисперсной фазы

Нажимаем кнопку Injections. В открывшемся окне нажимаем кнопку Create. В появившемся окне Set Injection Properties (рис. П1.29) из выпадающего меню Injection Type выбираем surface. В поле Release From Surfaces выбираем default-interior:013. В поле Particle Type выбираем Droplet. В выпадающем меню Material оставляем то вещество, которое предложит программа. В строке Evaporating Species должно быть выбрано вещество nh3. В строке Diameter Distribution выберите rosin-rammler. Во вкладке Point Properties задайте следующие значения величин: Temperature – 239.72 K; Start Time (s) - 0; Stop Time (s) - 1; Total Flow Rate (kg/s) - 1224; Min Diameter (m) - 1e-05; Max Diameter (m) - 1e-04; Mean Diameter (m) - 5e-05; Spread Parameter - 2.5; Number of Diameters - 10. Нажимаем OK.

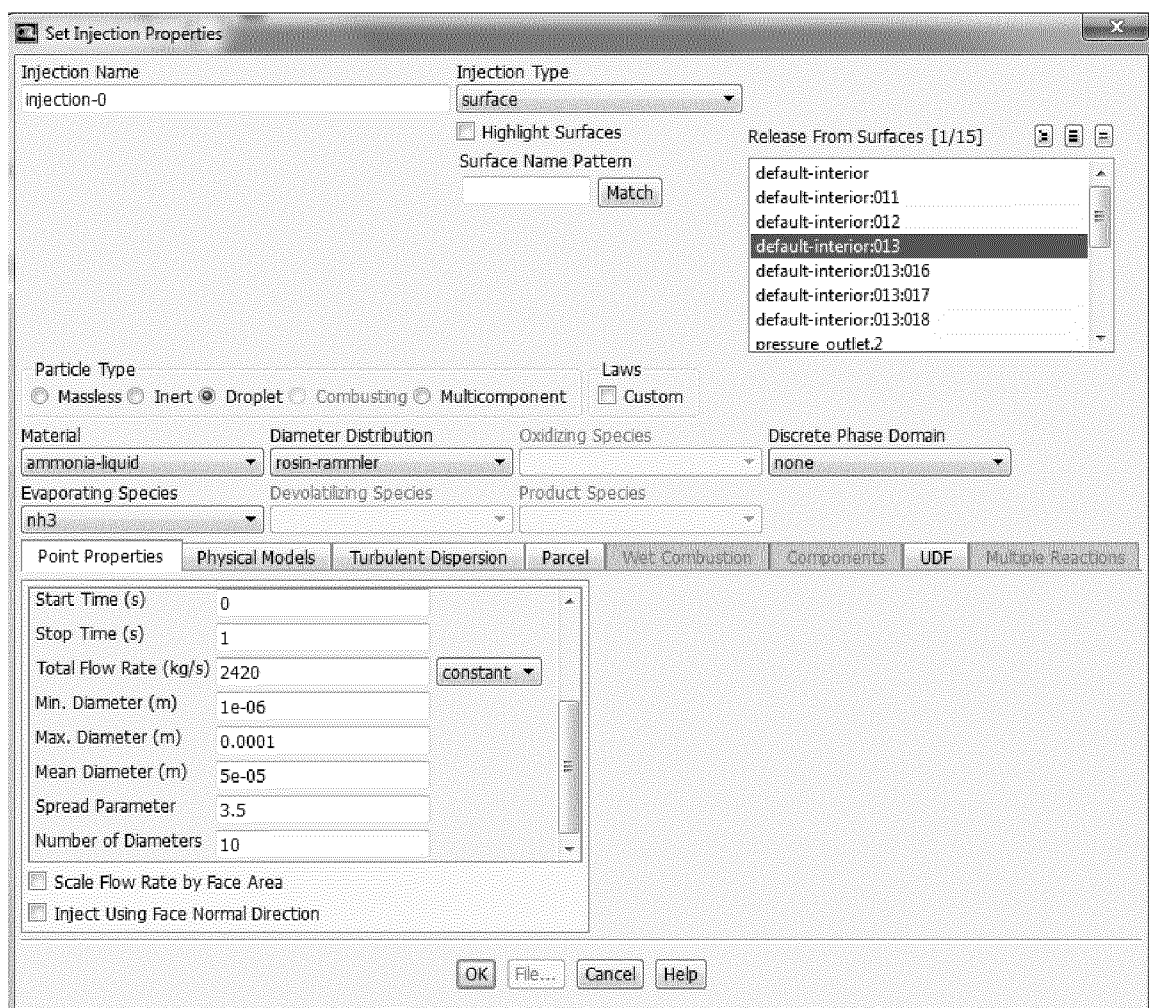


Рис. П1.29. Параметры дисперсной фазы

Для того, чтобы задать физические свойства капель аммиака запускаем окно Create/Edit Materials (рис. П1.30). Из строки Material Type выбираем droplet-particle. В поле Name вводим ammonia-liquid. В поле Chemical Formula -  $\text{nh}_3$ . В поле Density ( $\text{kg/m}^3$ ) значение плотности жидкого аммиака  $680 \text{ kg/m}^3$ ; в поле Cp (Specific Heat) ( $\text{J/kg-K}$ ) значение удельной теплоемкости жидкого аммиака  $4380 \text{ Дж/(кг-K)}$ ; в поле Latent Heat значение удельной теплоты парообразования  $1370000 \text{ Дж/кг}$ ; в поле Vaporization Temperature (k) значение минимальной температуры испарения  $160 \text{ K}$ ; в поле Boiling Point (k) значение температуры кипения при атмосферном давлении  $239.57 \text{ K}$ ; в поле Binary Diffusivity ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) значение коэффициента бинарной диффузии  $1.9\text{e-}05 \text{ m}^2/\text{s}$ ; в поле Saturation Vapor Pressure (pascal) задаем

значение давления насыщенных паров с помощью кусочно-линейной функции (piecewise-linear). Для редактирования параметров кусочно-линейной функции давления насыщенных паров от температуры нажимаем кнопку Edit. В открывшемся окне Piecewise-Linear Profile (рис. П1.31) в поле Points указываем количество точек 8. Далее задаем значения давления насыщенных паров при различных температурах в соответствии с табл. П1.1.

Таблица П1.1

Параметры кусочно-линейной функции давления насыщенных паров аммиака от температуры

| Point number | Temperature (K) | Value (pascal) |
|--------------|-----------------|----------------|
| Point 1      | 180             | 1574           |
| Point 2      | 190             | 3910           |
| Point 3      | 200             | 8750           |
| Point 4      | 210             | 17931          |
| Point 5      | 220             | 34100          |
| Point 6      | 230             | 60836          |
| Point 7      | 235             | 79560          |
| Point 8      | 238             | 92883          |

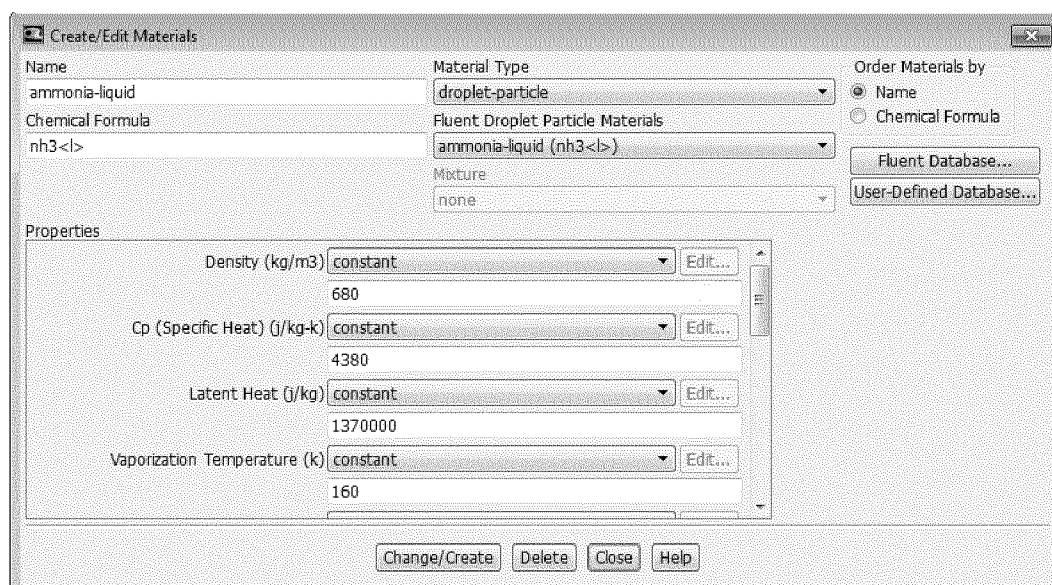


Рис. П1.30. Диалоговое окно для задания физических свойств капель аммиака

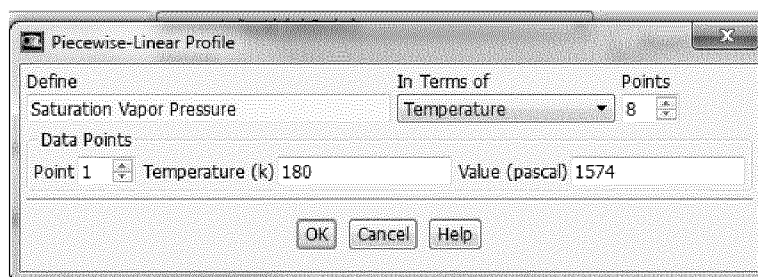


Рис.П1.31. Диалоговое окно для задания параметров кусочно-линейной функции давления насыщенных паров от температуры

Из выпадающего меню **Vaporization Model** выбираем **convection/diffusion-controlled**. Остальные параметры оставляем по умолчанию. Запускаем окно **Set Injection Properties** с помощью команды **Models → Discrete Phase - On → Injections → Set**. Убеждаемся, что из выпадающего меню **Material** выбрано вещество **ammonia-liquid**. Нажимаем **OK**.

## 12. Расчет поля концентраций

При расчете поля концентраций следует подключить дополнительные уравнения (уравнение энергии и переноса примеси). Для этого запускаем окно **Equations** (рис. П1.32) с помощью команды **Solution → Solution Controls → Equations**. В открывшемся окне активируем уравнение для переноса примеси (**nh3**) и уравнение переноса энергии (**Energy**). Нажимаем **OK**.

С помощью команды **Solution → Monitors → Residuals-Print, Plot → Edit** запускаем окно **Residual Monitors** и устанавливаем значения (**Absolute Criteria**) параметров точности (**Residual**) для характеристик турбулентности **k** и **epsilon** равными 0.001, а для **nh3** - 0.0001. Остальные поля оставляем без изменений.

В окне **Limits** (команда **Solution → Solution Controls → Limits**) устанавливаем значения для минимальной и максимальной температур (**Minimal Temperature** и **Maximal Temperature**) 160 и 310 К соответственно.

Запускаем окно **Run Calculation** (рис. П1.33) с помощью команды **Solution → Run Calculation**. В открывшемся окне в поле **Time Step Size (s)**

задаем шаг по времени 0.1 с. В поле Number of Time Steps – 10. Нажимаем кнопку Calculate. По окончании расчета необходимо отключить источник первичного облака, открыв окно Fluid двойным щелчком левой кнопки по названию области (fluid:cloud) в окне Cell Zone Conditions. В диалоговом окне Fluid убираем галочку напротив Source Terms. Продолжаем расчет, задав в поле Time Step Size (s) шаг по времени 0.5 с. В поле Number of Time Steps – 1798. После завершения расчета будут получены поля концентраций опасного вещества для времени  $t=15$  мин.

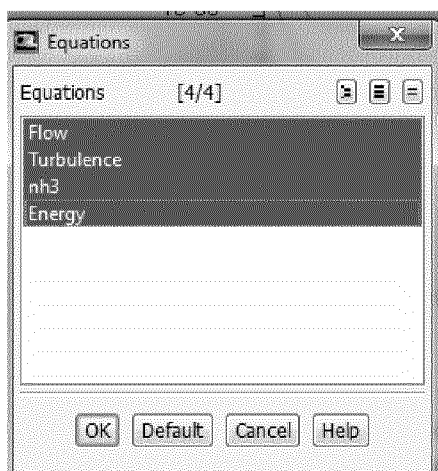


Рис. П1.32. Диалоговое окно для активации уравнений

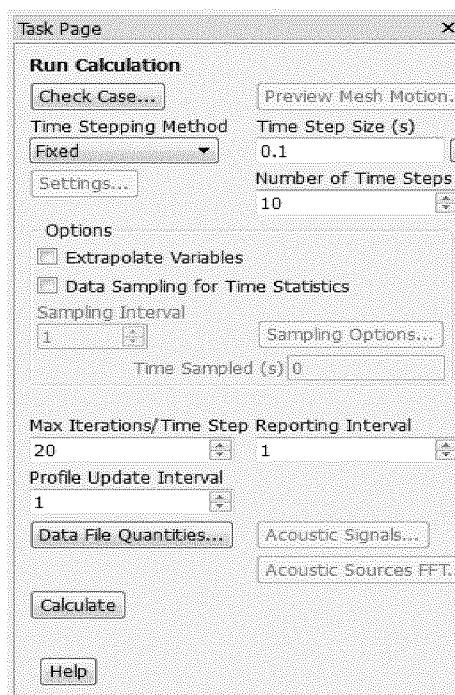


Рис. П1.33. Окно задач для запуска на расчет

### 13. Анализ результатов

Проанализируем распределение концентраций на оси облака на высоте 1 м. Из графика определим расстояние достижения летальной и пороговой концентраций. Для аммиака летальная и пороговая концентрации равны 10000 и 1000 мг/м<sup>3</sup> соответственно (при времени воздействия 15 мин). Так как в программе Ansys Fluent концентрация не отображается в единицах мг/м<sup>3</sup>, создадим функцию для отображения концентрации в требуемых единицах с помощью инструмента Custom Field Function Calculator (запускается из главного меню с помощью команды User-Defined → Custom Field Function Calculator). В поле Definition (рис.П1.34) задается функция путем выбора полевых переменных из выпадающего меню Field Functions и использования кнопок с цифрами и знаками арифметических действий. Создайте функцию concentration как показано на рис. П1.34. После того как в поле Definition введено необходимое выражение для перевода концентрации из единиц кг/кг в мг/м<sup>3</sup> нажмите кнопку Define.

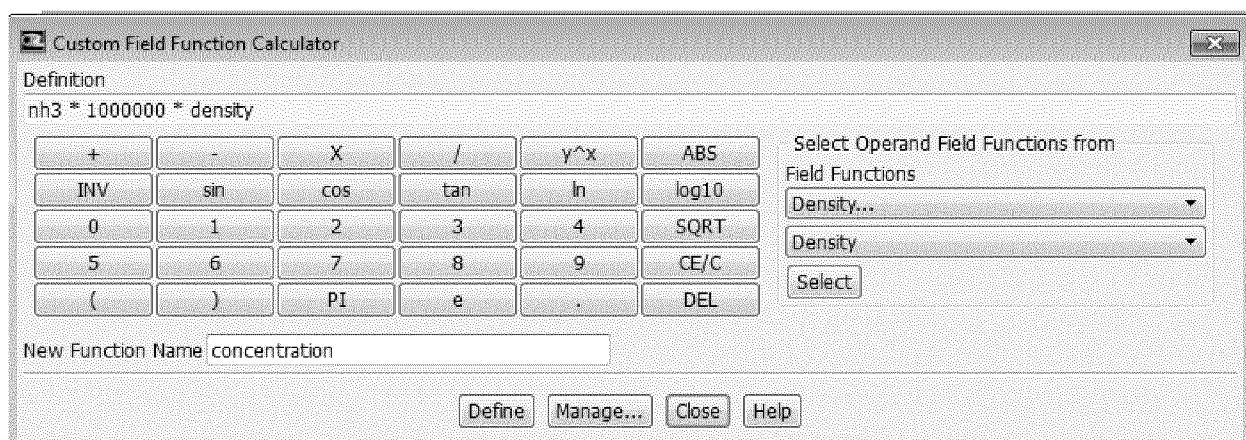


Рис. П1.34. Создание функции с помощью инструмента Custom Field Function Calculator

Для отображения расчетных профилей скорости ветра и параметров турбулентности внутри расчетной области создаем вспомогательную линию с помощью команды Setting Up Domain → Create → Line/Rake. В открывшемся окне задаем координаты начальной и конечной точек вспомогательной линии

как показано на рис. П1.35. В поле New Surface Name вводим наименование линии centerline. Нажимаем кнопку Create. С помощью команды Setting Up Domain → Display открываем окно Mesh Display. Выбираем в поле Surfaces следующие поверхности и линии: wall, wall:009, wall:009:015, velocity\_inlet.1, pressure\_outlet.2, centreline. Нажимаем Display. В окне программы можно будет видеть расположение построенной линии относительно выбранных границ расчетной области.

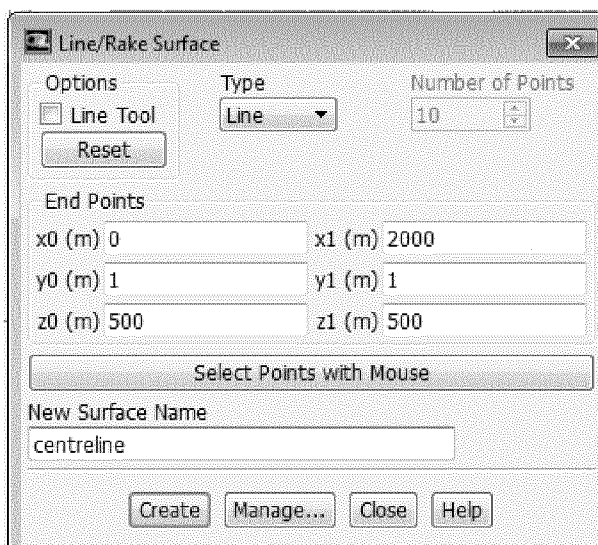


Рис. П1.35. Координаты вспомогательной линии

С помощью команды Plots → XY Plot открываем окно Solution XY Plot. Устанавливаем в поле Plot Direction значения 1;0;0 для осей X, Y, Z соответственно. Выбираем из выпадающего меню Y Axis Function из перечня функций Custom Field Functions функцию concentration. В поле Surfaces выбираем centreline и нажимаем Plot. В графическом окне программы Fluent отобразится график изменения концентрации (в единицах  $\text{мг/м}^3$ ) на оси облака по направлению X (по направлению ветра) как показано на рис. П1.36.

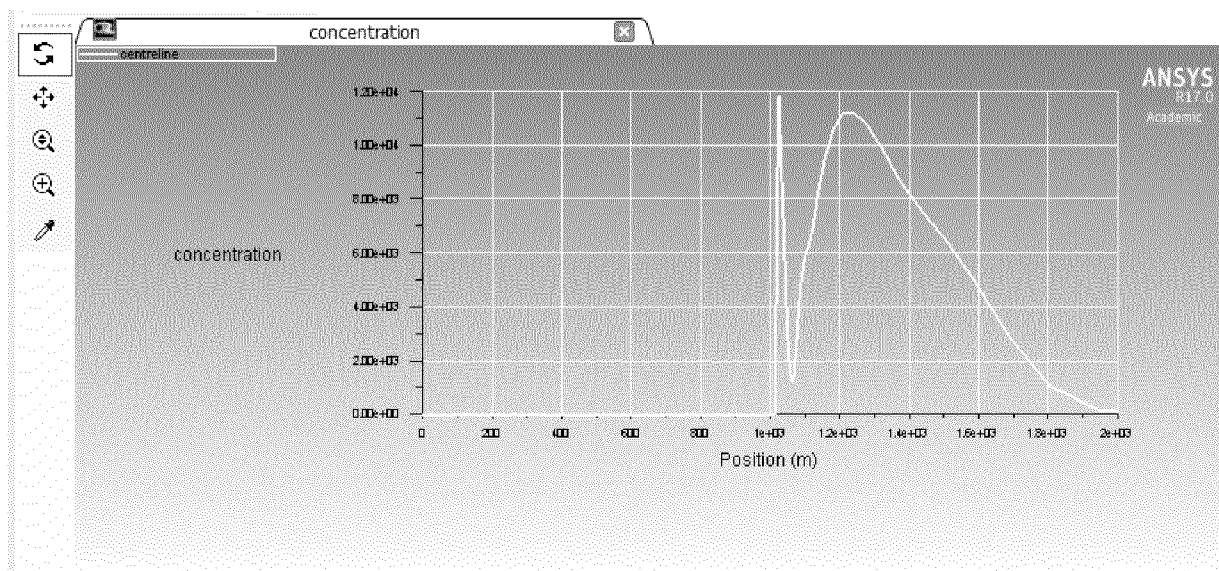


Рис. П1.36. График изменения концентрации на оси облака (координата центра источников  $X=1020$  м)

Для отображения контурного графика распределения концентрации из окна Tree с помощью команды Results → Graphics → Contours запускаем диалоговое окно Contours (рис. П1.37). Из строки Contours of выбираем из перечня функций Custom Field Functions функцию concentration. В поле Surfaces выбираем поверхности wall, wall:009, wall:009:015. При нажатии кнопки Display в графическом окне программы отобразится контурный график распределения концентрации на подстилающей поверхности, как показано на рис.П1.38. Из графика видно, что в момент времени  $t=900$  сек летальная концентрация будет достигнута на расстоянии примерно 300 м от источника выброса, пороговая – на расстоянии 800 м.

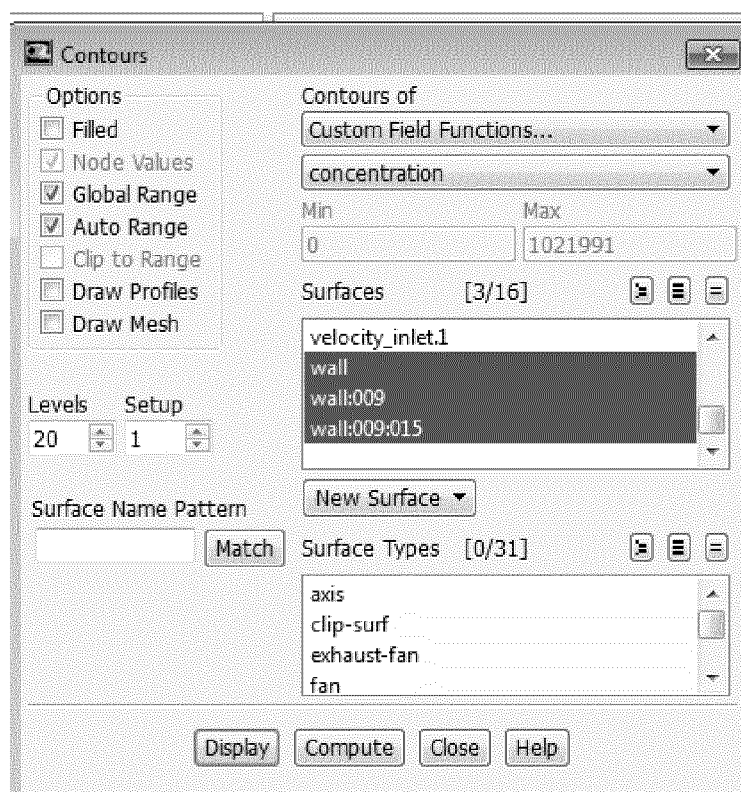


Рис. П1.37. Диалоговое окно Contours

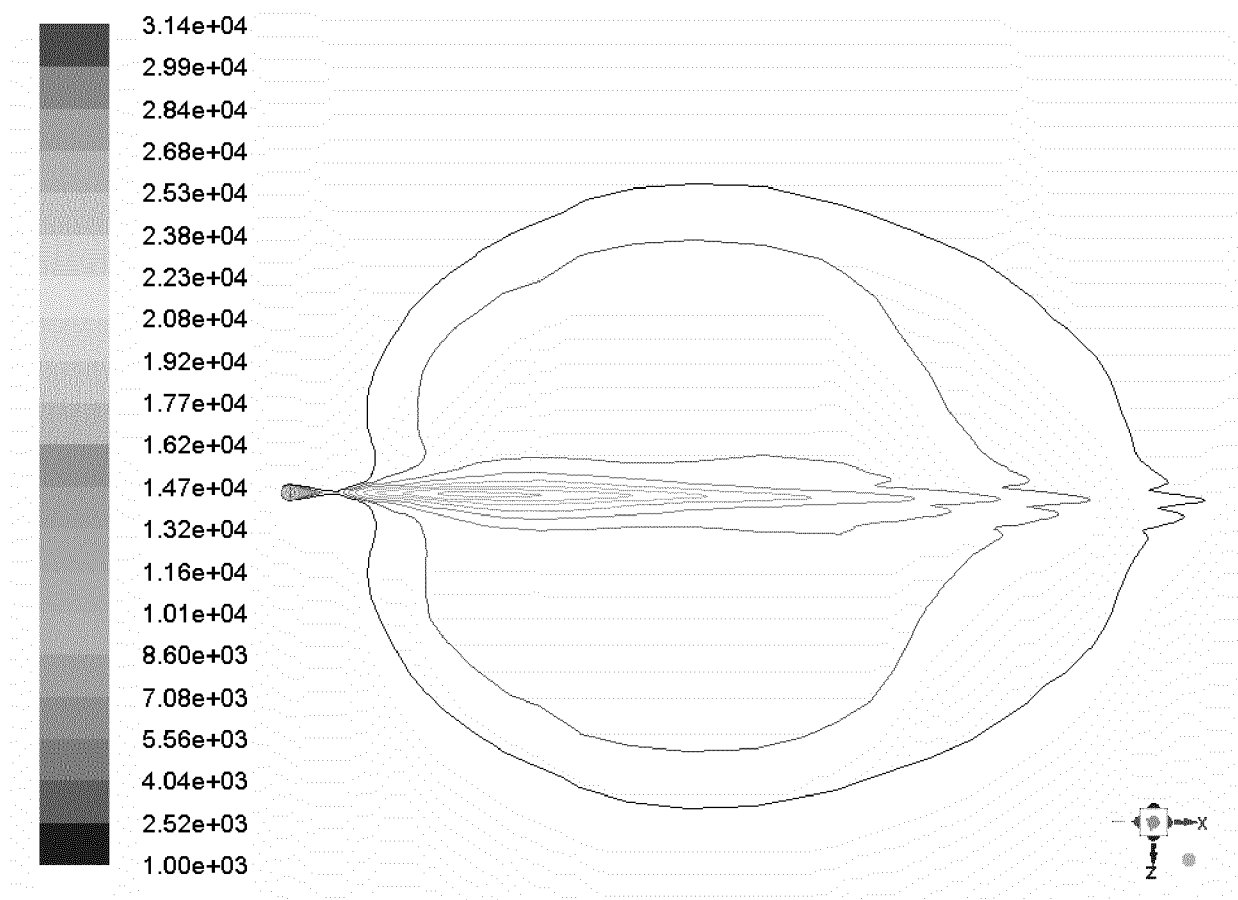


Рис. П1.38. Контурный график распределения концентрации

### Определение ожидаемого режима сгорания облака

Ожидаемый режим сгорания облака зависит от типа горючего вещества и степени загроможденности окружающего пространства.

#### *Классификация горючих веществ по степени чувствительности*

Вещества, способные к образованию горючих смесей с воздухом, по степени своей чувствительности к возбуждению взрывных процессов разделены на четыре класса:

класс 1 - особо чувствительные вещества (размер детонационной ячейки менее 2 см);

класс 2 - чувствительные вещества (размер детонационной ячейки лежит в пределах от 2 до 10 см);

класс 3 - средне чувствительные вещества (размер детонационной ячейки лежит в пределах от 10 до 40 см);

класс 4 - слабо чувствительные вещества (размер детонационной ячейки больше 40 см).

Классификация наиболее распространенных в промышленном производстве горючих веществ приведена в табл. П2.1. В случае, если вещество не внесено в классификацию, его следует классифицировать по аналогии с имеющимися в списке веществами, а при отсутствии информации о свойствах данного вещества, его следует отнести к классу 1, т.е. рассматривать наиболее опасный случай.

Таблица П2.1

| Класс 1         | Класс 2        | Класс 3          | Класс 4        |
|-----------------|----------------|------------------|----------------|
| Ацетилен        | Акрилонитрил   | Ацетальдегид     | Бензол         |
| Винилацетилен   | Акролеин       | Ацетон           | Декан          |
| Водород         | Бутан          | Бензин           | о-Дихлорбензол |
| Гидразин        | Бутилен        | Винилацетат      | Додекан        |
| Изопропилнитрат | Бутадиен       | Винилхлорид      | Метан          |
| Метилацетилен   | 1,3-Пентадиен  | Гексан           | Метилбензол    |
| Нитрометан      | Пропан         | Изооктан         | Метилмеркаптан |
| Окись пропилена | Пропилен       | Метиламин        | Метилхлорид    |
| Окись этилена   | Сероуглерод    | Метилацетат      | Окись углерода |
| Этилнитрат      | Этан           | Метилбутилкетон  | Этиленбензол   |
|                 | Этилен         | Метилпропилкетон |                |
|                 | Эфиры:         | Метилэтилкетон   |                |
|                 | диметиловый    | Октан            |                |
|                 | дивиниловый    | Пиридин          |                |
|                 |                | Сероводород      |                |
|                 | метилбутиловый | Спирты:          |                |
|                 |                | метиловый        |                |
|                 |                | этиловый         |                |
|                 |                | пропиловый       |                |
|                 |                | амиловый         |                |
|                 |                | изобутиловый     |                |
|                 |                | изопропиловый    |                |
|                 | Широкая        | Циклогексан      |                |
|                 | фракция легких | Этилформиат      |                |
|                 | углеводородов  | Этилхлорид       |                |

При оценке масштабов поражения волнами давления должно учитываться различие химических соединений по теплоте сгорания, используемой для расчета полного запаса энергосодержания. Для типичных углеводородов принимается в расчет значение удельной теплоты сгорания  $E_{уд0} = 44$  МДж/кг. Для иных горючих веществ в расчетах используется удельное энергосодержание  $E_{уд} = \beta E_{уд0}$ . Здесь  $\beta$  – корректировочный параметр. Для условно выделенных классов горючих веществ величины параметра  $\beta$  представлены в табл. П2.2.

Таблица П2.2

| Классы горючих веществ | $\beta$ | Классы горючих веществ                                     | $\beta$                      |
|------------------------|---------|------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Класс 1                |         | Класс 3                                                    |                              |
| Ацетилен               | 1,1     | Кумол                                                      | 0,84                         |
| Метилацетилен          | 1,05    | Метиламин                                                  | 0,70                         |
| Винилацетилен          | 1,03    | Спирты:<br>Метиловый<br>Этиловый<br>Пропиловый<br>Амиловый | 0,45<br>0,61<br>0,69<br>0,79 |
| Окись этилена          | 0,62    |                                                            |                              |
| Гидразин               | 0,44    |                                                            |                              |
| Изопропилнитрат        | 0,41    |                                                            |                              |
| Этилнитрат             | 0,30    | Циклогексан                                                | 1                            |
| Водород                | 2,73    | Ацетальальдегид                                            | 0,56                         |
| Нитрометан             | 0,25    | Винилацетат                                                | 0,51                         |
| Класс 2                |         | Бензин                                                     | 1                            |
| Этилен                 | 1,07    | Гексан                                                     | 1                            |
| Диэтилэфир             | 0,77    | Изооктан                                                   | 1                            |
| Дивинилэфир            | 0,77    | Пиридин                                                    | 0,77                         |
| Окись пропилена        | 0,7     | Циклопропан                                                | 1                            |
| Акролеин               | 0,62    | Этиламин                                                   | 0,80                         |
| Сероуглерод            | 0,32    | Класс 4                                                    |                              |
| Бутан                  | 1       |                                                            |                              |
| Бутилен                | 1       |                                                            |                              |
| Бутадиен               | 1       |                                                            |                              |
| 1,3-Пентадиен          | 1       | Метан                                                      | 1,14                         |
| Этан                   | 1       | Трихлорэтан                                                | 0,15                         |
| Диметилэфир            | 0,66    | Метилхлорид                                                | 0,12                         |
| Диизопропиловый эфир   | 0,82    | Бензол                                                     | 1                            |
| ШФЛУ                   | 1       | Декан                                                      | 1                            |
| Пропилен               | 1       | Додекан                                                    | 1                            |
| Пропан                 | 1       | Метилбензол                                                | 1                            |
| Класс 3                |         | Метилмеркаптан                                             | 0,53                         |
| Винилхлорид            | 0,42    | Окись углерода                                             | 0,23                         |
| Сероводород            | 0,34    | Дихлорэтан                                                 | 0,24                         |
| Ацетон                 | 0,65    | Дихлорбензол                                               | 0,42                         |
|                        |         | Трихлорэтан                                                | 0,14                         |

### *Классификация окружающего пространства по степени загроможденности*

Характером загроможденности окружающего пространства в значительной степени определяется скорость распространения пламени при сгорании облака и, следовательно, параметры волны давления. Характеристики загроможденности окружающего пространства разделяются на четыре класса:

класс I - наличие длинных труб, полостей, каверн, заполненных горючей смесью, при сгорании которой возможно ожидать формирование турбулентных струй продуктов сгорания, имеющих размеры не менее трех размеров детонационной ячейки данной смеси. Если размер детонационной ячейки для данной смеси не известен, то минимальный характерный размер 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;

класс II - сильно загроможденное пространство: наличие полузамкнутых объемов, высокая плотность размещения технологического оборудования, лес, большое количество повторяющихся препятствий;

класс III - средне загроможденное пространство: отдельно стоящие технологические установки, резервуарный парк;

класс IV - слабо загромождение и свободное пространство.

### *Классификация режимов сгорания облака*

Для оценки воздействия сгорания облака возможные режимы сгорания разделяются на шесть классов по диапазонам скоростей их распространения следующим образом:

класс 1 - детонация или горение со скоростью фронта пламени 500 м/с и более;

класс 2 - дефлаграция, скорость фронта пламени 300 - 500 м/с;

класс 3 - дефлаграция, скорость фронта пламени 200 - 300 м/с;

класс 4 - дефлаграция, скорость фронта пламени 150 - 200 м/с;

класс 5 - дефлаграция, скорость фронта пламени определяется по формуле

$$u = k_1 \cdot M^{1/6}, \quad (\text{П2.1})$$

где  $k_1$  – константа, равная 43;  $M$  – масса горючего вещества, содержащегося в облаке, кг.

класс 6 - дефлаграция, скорость фронта пламени определяется по формуле

$$u = k_2 \cdot M^{1/6}, \quad (\text{П2.2})$$

где  $k_2$  – константа, равная 26;  $M$  – масса горючего вещества, содержащегося в облаке, кг.

Ожидаемый режим сгорания облака определяется с помощью табл. П2.3, в зависимости от класса горючего вещества и класса загроможденности окружающего пространства.

Таблица П2.3

| Класс горючего вещества | Класс загроможденности окружающего пространства |    |     |    |
|-------------------------|-------------------------------------------------|----|-----|----|
|                         | I                                               | II | III | IV |
| 1                       | 1                                               | 1  | 2   | 3  |
| 2                       | 1                                               | 2  | 3   | 4  |
| 3                       | 2                                               | 3  | 4   | 5  |
| 4                       | 3                                               | 4  | 5   | 6  |

При определении максимальной скорости фронта пламени для режимов сгорания 2-4 классов дополнительно рассчитывается видимая скорость фронта пламени по соотношению (П2.1). В том случае, если полученная величина больше максимальной скорости, соответствующей данному классу, она принимается за верхнюю границу диапазона ожидаемых скоростей сгорания облака.

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

*Задание.* Провести оценку зон действия поражающих факторов для объекта хранения опасного вещества. Исходные данные, не указанные в таблице настоящего Приложения, принять из примера 6.1.

Таблица ПЗ.1

Варианты заданий для самостоятельного выполнения

| №  | Опасное вещество | Объем резервуара, м <sup>3</sup> | Количество резервуаров, шт. | Площадь резервуарного парка, ограниченная обвалованием, м <sup>2</sup> |
|----|------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 1  | i-бутан          | 200                              | 6                           | 900                                                                    |
| 2  | н-пентан         | 200                              | 8                           | 2000                                                                   |
| 3  | i-пентан         | 200                              | 8                           | 2000                                                                   |
| 4  | гексан           | 400                              | 8                           | 2500                                                                   |
| 5  | гексен           | 400                              | 8                           | 2500                                                                   |
| 6  | нефть            | 3000                             | 6                           | 5000                                                                   |
| 7  | бутен            | 200                              | 6                           | 1000                                                                   |
| 8  | этилацетат       | 400                              | 8                           | 2000                                                                   |
| 9  | пропилен         | 100                              | 8                           | 800                                                                    |
| 10 | изобутилен       | 200                              | 6                           | 1000                                                                   |
| 11 | ацетальдегид     | 300                              | 6                           | 2000                                                                   |
| 12 | винилхлорид      | 200                              | 6                           | 2000                                                                   |
| 13 | спирт этиловый   | 400                              | 6                           | 2000                                                                   |
| 14 | циклогексан      | 400                              | 8                           | 2500                                                                   |
| 15 | дивиниловый эфир | 200                              | 8                           | 2000                                                                   |
| 16 | бутадиен         | 200                              | 6                           | 1200                                                                   |
| 17 | диметиловый эфир | 200                              | 8                           | 2000                                                                   |
| 18 | бутен            | 600                              | 6                           | 2500                                                                   |
| 19 | пропилен         | 200                              | 6                           | 1000                                                                   |
| 20 | i-бутан          | 600                              | 6                           | 2000                                                                   |

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

*Задание.* Выполнить расчет поля концентраций для случая залпового выброса сжиженного токсичного газа из емкости. Наименование вещества и объем емкости для каждого из вариантов приведены в табл. П4.1. Температуру жидкости в емкости принять равной 35°C. Для учебных целей время экспозиции примем равным 10 мин. Скорость ветра на высоте 10 м – 1 м/с, состояние атмосферы – изотермия. Значения физических свойств и величин для расчета параметров источника выброса приведены в табл. П4.2.

Таблица П4.1

Варианты заданий для самостоятельного выполнения

| № варианта | Вещество | Объем емкости, м <sup>3</sup> |
|------------|----------|-------------------------------|
| 1          | Хлор     | 1                             |
| 2          | Хлор     | 1,5                           |
| 3          | Хлор     | 2                             |
| 4          | Хлор     | 3                             |
| 5          | Хлор     | 4                             |
| 6          | Хлор     | 5                             |
| 7          | Хлор     | 6                             |
| 8          | Хлор     | 8                             |
| 9          | Хлор     | 10                            |
| 10         | Хлор     | 12                            |
| 11         | Хлор     | 16                            |
| 12         | Хлор     | 20                            |
| 13         | Аммиак   | 1                             |
| 14         | Аммиак   | 1,5                           |
| 15         | Аммиак   | 2                             |
| 16         | Аммиак   | 3                             |
| 17         | Аммиак   | 4                             |
| 18         | Аммиак   | 5                             |
| 19         | Аммиак   | 6                             |
| 20         | Аммиак   | 8                             |
| 21         | Аммиак   | 10                            |
| 22         | Аммиак   | 12                            |
| 23         | Аммиак   | 16                            |
| 24         | Аммиак   | 20                            |
| 25         | Аммиак   | 30                            |

## Физические свойства веществ

| Наименование                                                                          | Аммиак  | Хлор   |
|---------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------|
| Удельная теплоемкость $C_{p,ж}$ , Дж/(кг·К)                                           | 4600    | 927    |
| Температура кипения $T_{кип}$ , К                                                     | 239,72  | 239,15 |
| Удельная теплота парообразования $\Delta H$ , Дж/кг                                   | 1380000 | 268000 |
| Плотность жидкости при температуре кипения $T_{кип}$ , $\rho_{ж}$ , кг/м <sup>3</sup> | 680     | 1580   |

А.Д. Галеев, Е.В. Старовойтова, А.А. Салин, С.И. Поникаров

# **ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ АВАРИЙ**