

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Машины и технология литейного производства»

С. В. Коренюгин
С. Л. Ровин

ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ КОНТРОЛЬ

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности
1-36 02 01 «Машины и технология литейного производства»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
высших учебных заведений Республики Беларусь по образованию
в области металлургического оборудования и технологий*

Минск
БНТУ
2023

УДК 658.52-049.5+658.562(075.8)
ББК 65.247я7
К66

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра «Металлургия и технологии обработки материалов» ГГТУ
им. П. О. Сухого (декан, канд. техн. наук, доцент *И. Б. Одарченко*);
кафедра «Материаловедение и проектирование технических систем»
Белорусского государственного технологического университета
(зав. кафедрой, канд. техн. наук, доцент *Д. В. Куис*)

Коренюгин, С. В.

К66 Промышленная безопасность и производственный контроль :
учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-36 02 01
«Машины и технология литейного производства» / С. В. Коренюгин,
С. Л. Ровин. – Минск : БНТУ, 2023. – 80 с.
ISBN 978-985-583-860-0.

Учебно-методическое пособие разработано в соответствии с типовой программой по курсу «Промышленная безопасность и производственный контроль», содержит требования и необходимую информацию для выполнения работ по курсовому проектированию, проведению анализа опасностей и оценки рисков возникновения аварий на опасных производственных объектах литейного и металлургического производства. Учебно-методическое пособие предназначено для студентов дневной формы обучения специальности 1-36 02 01 «Машины и технология литейного производства».

УДК 658.52-049.5+658.562(075.8)
ББК 65.247я7

ISBN 978-985-583-860-0

© Коренюгин С. В., Ровин С. Л., 2023
© Белорусский национальный
технический университет, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Основные термины и определения.....	5
2. Декларирование промышленной безопасности в литейном и металлургическом производстве.....	8
2.1. Общие положения.....	8
2.2. Потенциально опасные объекты (оборудование) литейного и металлургического производства.....	9
3. Цель и задачи анализа опасностей и оценки риска аварий.....	11
3.1. Цель анализа риска аварий.....	11
3.2. Задачи, решаемые при проведении анализа опасностей и оценке риска аварий.....	11
4. Показатели риска аварий.....	16
5. Критерии поражения людей и разрушения технических устройств, зданий и сооружений при авариях на ОПО.....	20
5.1. Критерии поражения тепловым излучением.....	21
5.2. Критерии поражения ударной волной.....	25
5.3. Критерии токсического поражения.....	29
6. Методы анализа риска аварий.....	31
7. Надежность технических устройств.....	42
8. Анализ причин и условий возникновения аварийных ситуаций, оценка вероятности и описание возможных сценариев развития аварий на ОПО.....	46
9. Расчет физического взрыва в результате взаимодействия воды с расплавом металла.....	50
10. Расчет поражающих факторов при возникновении пожара в результате разгерметизации внутрицеховой системы газоснабжения.....	64
11. Расчет взрыва угарного газа (CO) в дутьевом коллекторе вагранки.....	70
12. Расчет физического взрыва в результате пролива расплава на влажный, грязный пол при транспортировке.....	75
13. Основные требования к содержанию курсового проекта.....	78
Список литературы.....	79

ВВЕДЕНИЕ

Курсовой проект по курсу «Промышленная безопасность и производственный контроль» является заключительным этапом усвоения знаний по данному курсу. В ходе выполнения проекта необходимо: выполнить анализ риска возникновения аварийной ситуации на опасном производственном объекте литейного или металлургического производства, произвести расчет зон поражения людей, повреждения оборудования, разрушения конструкций различными поражающими факторами и выполнить расчет потенциального и индивидуального рисков для работников этого объекта.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Промышленная безопасность – состояние защищенности жизненно важных интересов личности и общества от возникновения аварий и инцидентов, обеспеченное комплексом организационных и технических мероприятий.

Авария – разрушение опасных производственных объектов (далее – ОПО) и (или) потенциально опасных объектов (технические устройства и оборудование), в том числе эксплуатируемых на опасном производственном объекте, неконтролируемые взрыв и (или) выброс опасных веществ.

Инцидент – отказ в работе или повреждение потенциально опасных объектов, эксплуатируемых на опасном производственном объекте, технических устройств, эксплуатируемых на потенциально опасном объекте, отклонение от параметров, обеспечивающих безопасность ведения технологического процесса, не приводящее к аварии.

Опасные производственные объекты – объекты, указанные в «Перечне опасных производственных объектов» приложения 1 Закона Республики Беларусь «О промышленной безопасности».

Потенциально опасные объекты – объекты, указанные в «Перечне потенциально опасных объектов в области промышленной безопасности» приложения 2 Закона Республики Беларусь «О промышленной безопасности».

Декларация промышленной безопасности опасного производственного объекта (далее – декларация безопасности) – документ, разработанный в установленном порядке, в котором отражены характер и масштабы опасностей на ОПО и разработанные мероприятия по обеспечению промышленной безопасности, готовности к действиям в техногенных чрезвычайных ситуациях.

Риск аварий – мера опасности, характеризующая вероятность нежелательного происшествия – аварии на ОПО, и тяжесть ее последствий

Анализ риска аварии – процесс выявления (идентификации) и оценки опасностей, которые могут привести к аварии.

Опасное вещество – вещество, которое вследствие своих физических, химических, биологических или токсикологических свойств представляет опасность для жизни и здоровья людей и окружающей среды. К опасным относятся воспламеняющиеся, окисляющие,

горючие, взрывчатые и токсичные вещества (перечень опасных веществ приведен в приложениях 1 и 2 к Порядку разработки декларации безопасности производственных объектов Республики Беларусь [2]).

Промышленная катастрофа – крупная промышленная авария, повлекшая за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей, либо разрушение и уничтожение объектов, материальных ценностей в значительных размерах, а также приведшая к серьезному ущербу окружающей природной среде.

Техногенная чрезвычайная ситуация – обстановка на производственном объекте или определенной территории, сложившаяся в результате возникновения аварии, катастрофы, которые повлекли или могут повлечь за собой человеческие жертвы, вред здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушения условий жизнедеятельности людей.

Допустимый риск аварии – установленные либо полученные согласно формализованной установленной процедуре значения риска аварии на ОПО, превышение которых характеризует угрозу возникновения аварии.

Идентификация опасностей аварии – выявление источников возникновения аварий и определение соответствующих им типовых сценариев аварии.

Оценка риска аварии – определение качественных и (или) количественных характеристик опасности аварии.

Качественная оценка риска аварии – описание качественных характеристик и признаков возможности возникновения и соответствующей тяжести последствий реализации аварии для жизни и здоровья человека, имущества и окружающей среды.

Количественная оценка риска аварии – определение численных значений вероятности (частоты) и соответствующей тяжести последствий реализации различных сценариев аварий на ОПО для жизни и здоровья человека, имущества и окружающей среды.

Барьеры безопасности – организационные и технические меры безопасности. Барьеры безопасности могут быть техническими (материалы, предохранительный клапан, запорная арматура, обвалование, противопожарные преграды и т. д.) или организационными (экспертиза, инспекции, обучение, тренинг и т. д.).

Поражающий эффект – физическое, физико-химическое явление, приводящее к возникновению поражающих факторов аварии.

Поражающий фактор аварии – термическое, барическое (ударно-волновое), токсическое, радиационное или иное воздействие, проявляющееся при возникновении аварии и способное привести к гибели людей, разрушению зданий и технических устройств, ущерб окружающей среде.

Надежность – свойство объекта (технического устройства, системы, ее элемента) выполнять требуемые функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в установленных пределах в течение заданного времени. Под объектом в данном случае понимаются техническое устройство, система, а также любая их часть, элемент, подсистема, которые можно рассматривать самостоятельно.

2. ДЕКЛАРИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ЛИТЕЙНОМ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

2.1. Общие положения

В соответствии с Законом Республики Беларусь «О промышленной безопасности» субъект промышленной безопасности: *«обязан иметь декларацию промышленной безопасности на эксплуатируемые опасные производственные объекты I и II типов опасности»*. Разделение опасных производственных объектов на типы и их идентифицированные признаки определяются Перечнем опасных производственных объектов, приведенным в приложении 1 к Закону «О промышленной безопасности» [1].

Согласно этому перечню, объекты (производственные участки, цехи) на которых получают, транспортируются, используются расплавы черных и (или) цветных металлов и сплавы на основе этих расплавов в количестве 500 тонн и более в год относятся ко II типу опасности и соответственно подлежат обязательному декларированию.

Эксплуатация опасных производственных объектов I и II типов опасности без наличия декларации промышленной безопасности запрещается.

Декларация промышленной безопасности разрабатывается субъектом промышленной безопасности либо организацией, имеющей разрешение на право разработки этой декларации, выданное Госпромнадзором.

В декларации промышленной безопасности отражаются сведения об опасном производственном объекте (тип опасности, данные о технологическом процессе и аппаратурном оформлении), результаты анализа состояния промышленной безопасности, информация об условиях возникновения возможных аварий, схемы возникновения и развития возможных аварий, перечень принятых субъектом промышленной безопасности мер по обеспечению промышленной безопасности, включая меры по готовности субъекта промышленной безопасности к локализации и ликвидации аварий и инцидентов на опасном производственном объекте и их последствий [1].

Декларация промышленной безопасности оформляется в двух экземплярах.

После получения положительного заключения экспертизы промышленной безопасности сведения о декларации промышленной безопасности вносятся Госпромнадзором в государственный реестр опасных производственных объектов. Один экземпляр декларации передается в Госпромнадзор, второй – остается у субъекта промышленной безопасности.

Декларация промышленной безопасности подлежит пересмотру субъектом промышленной безопасности в случаях реконструкции, технического переоснащения, консервации опасного производственного объекта, изменения технологических процессов, требований промышленной безопасности, но не реже одного раза в пять лет с даты ее утверждения руководителем субъекта промышленной безопасности [1].

2.2. Потенциально опасные объекты (оборудование) литейного и металлургического производства

К потенциально опасному оборудованию, применяемому в металлургическом и литейном производстве, относятся установки, аппараты, технические устройства, включенные в Перечень потенциально опасных объектов в области промышленной безопасности, приведенный в приложении 2 к Закону Республики Беларусь «О промышленной безопасности» [1]:

1. Оборудование металлургических производств, рассчитанное на максимальное количество расплава 50 тонн и более:

- установки внепечной обработки стали с печь-ковшами, циркуляционными и ковшевыми вакууматорами;
- машины непрерывного литья заготовок;
- разливочные и промежуточные ковши;
- подъемно-поворотные стенды;
- шлаковые чаши;
- сталево­зы;
- шлаковозы;
- скраповые корзины;
- стенды для скачивания жидкого металла из сталеразливочных ковшей.

2. Оборудование литейных производств, рассчитанное на максимальное количество расплава 0,5 тонны и более:

- вагранки;

- индукционные, дуговые, вакуумные, пламенные печи;
- электрические печи сопротивления;
- термические печи;
- печи для химико-термической обработки;
- разливочные ковши;
- заливочные установки;
- формовочно-разливочные линии и установки;
- машины для литья под давлением;
- установки центробежного литья;
- оборудование для специальных методов литья.

3. Объекты газораспределительной системы и газопотребления, на которых находятся или могут находиться природный газ с избыточным давлением до 1,2 МПа или сжиженный углеводородный газ с избыточным давлением до 1,6 МПа, в том числе:

- газопроводы и газовое оборудование промышленных предприятий;
- газорегуляторные пункты, газорегуляторные установки и шкафные регуляторные пункты;
- стационарные установки для газопламенной обработки металлов.

3. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ АНАЛИЗА ОПАСНОСТЕЙ И ОЦЕНКИ РИСКА АВАРИЙ

3.1. Цель анализа риска аварий

Основная цель анализа риска аварий – установление степени аварийной опасности ОПО и (или) его составных частей для заблаговременного предупреждения угроз причинения вреда жизни, здоровью людей, вреда животным, растениям, окружающей среде, безопасности государства, имуществу физических и юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, угроз возникновения аварий и (или) чрезвычайных ситуаций техногенного характера, разработки, плановой реализации и своевременной корректировки обоснованных рекомендаций по снижению риска аварий и (или) мероприятий, направленных на снижение масштаба последствий аварий и размера ущерба, нанесенного в случае аварии на ОПО, а также мер, компенсирующих отступления от требований норм и правил в области промышленной безопасности.

3.2. Задачи, решаемые при проведении анализа опасностей и оценке риска аварий

На стадии обоснования инвестиций, проектирования, подготовки технической документации или размещения ОПО анализ риска аварий включает в себя решение следующих задач:

- проведение идентификации опасностей аварий и качественной и (или) количественной оценки риска аварий с учетом воздействия поражающих факторов аварий на персонал, население, имущество и окружающую среду;

- обоснование оптимальных вариантов применения технических и технологических решений, размещения технических устройств, зданий и сооружений, составных частей и самого ОПО с учетом расположения близлежащих объектов производственной и транспортной инфраструктуры, особенностей окружающей местности, а также территориальных зон (охранных, санитарно-защитных, жилых, общественно-деловых, рекреационных);

- определение степени опасности аварий для выбора наиболее безопасных проектных решений, а также при разработке декларации

безопасности стандартов предприятий, инструкций, технологических регламентов и планов мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий на ОПО;

- обоснование, корректировка и модернизация организационных и технических мер безопасности;

- разработка обоснованных рекомендаций по снижению риска аварий на ОПО и (или) его составных частях.

На стадиях ввода в эксплуатацию, консервации или ликвидации ОПО анализ риска аварий включает в себя:

- уточнение идентификации опасностей аварий с оценкой вероятности и возможных последствий аварий, актуализацию полученных ранее качественных или количественных оценок риска аварий;

- уточнение степени опасности аварий и оценку достаточности специальных мер по снижению риска аварий в переходный период.

На стадиях эксплуатации, реконструкции или технического перевооружения ОПО анализ риска аварий включает в себя:

- уточнение и актуализацию данных об основных опасностях аварий, в том числе, сведений, представленных в декларации промышленной безопасности ОПО, сведений об оценке максимального возможного количества потерпевших для целей страхования ответственности, технических данных и организационной информации по обследованию технического состояния объекта;

- определение и контроль частоты и периодичности диагностирования технических устройств, зданий и сооружений на ОПО, в том числе методами неразрушающего контроля;

- проведение мониторинга степени аварийной опасности и оценки эффективности мер по снижению риска аварий на ОПО, в том числе для оценки эффективности систем управления промышленной безопасностью;

- разработку рекомендаций по обеспечению безопасности и при необходимости корректировку мер по снижению риска аварий;

- совершенствование инструкций по эксплуатации и техническому обслуживанию, планов мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий на ОПО.

Общая схема анализа опасностей и оценки риска аварий на опасном производственном объекте представлена на рис. 1.

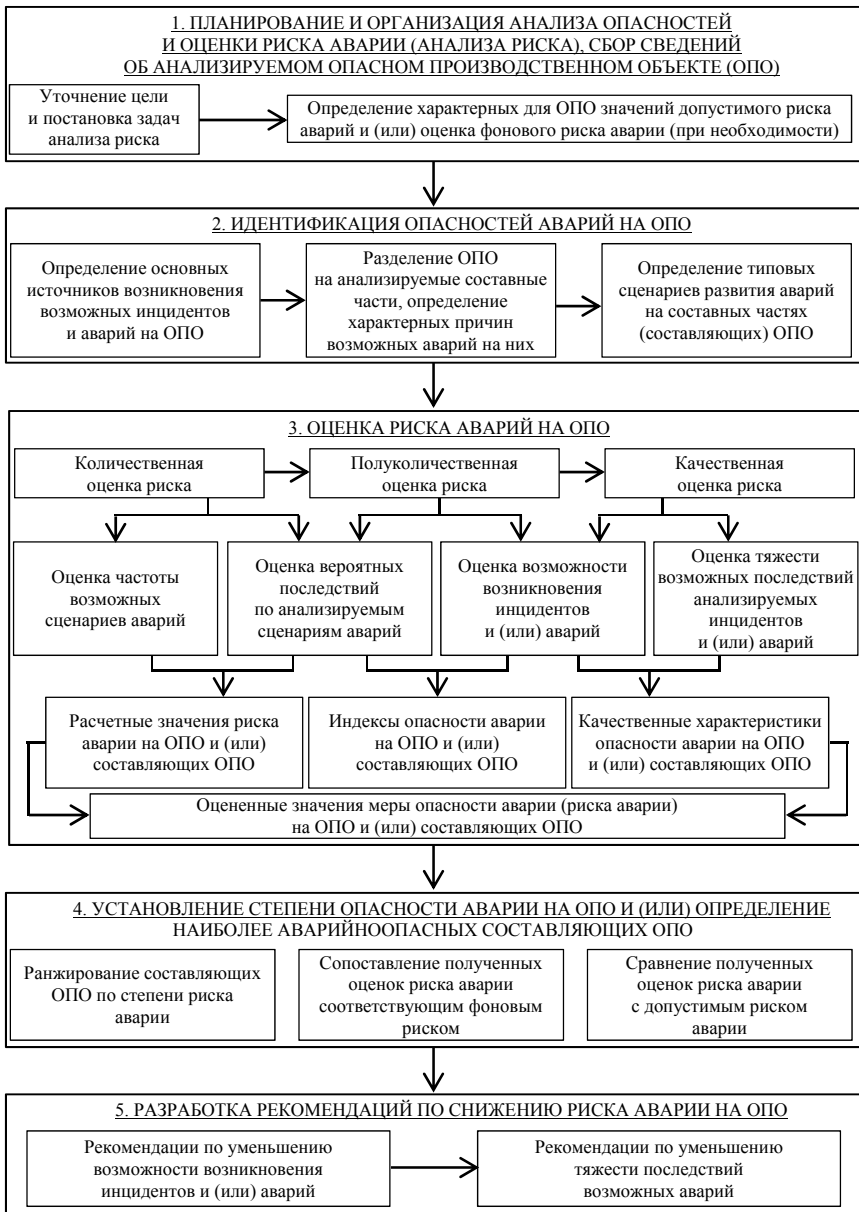


Рис. 1. Общая схема анализа опасностей и оценки риска аварий на ОПО

На этапе идентификации опасностей аварий необходимо:

- определить источники возникновения возможных инцидентов и аварий, связанных с разрушением сооружений и (или) технических устройств на ОПО, неконтролируемыми выбросами и (или) взрывами опасных веществ;

- провести разделение ОПО на составные части (при необходимости), выделить характерные причины возникновения аварий на ОПО или его составных частях;

- определить основные (типовые) сценарии аварий с их предварительной оценкой и ранжированием с учетом последствий и их вероятности, при этом рассмотреть инициирующие и последующие события, приводящие к возможному возникновению поражающих факторов аварий.

На этапе оценки риска аварий в зависимости от поставленных задач могут применяться методы количественной и качественной оценки или их возможные сочетания (полуколичественная оценка риска аварий). Рекомендуется последовательное выполнение качественной и (или) количественной оценки:

- возможности возникновения и развития инцидентов и аварий;

- тяжести последствий и (или) ущербов от возможных инцидентов и аварий;

- опасности аварий и связанных с ними угроз в значениях показателей риска.

Для оценки частоты нежелательных событий аварий рекомендуется использовать:

- статистические данные по аварийности, надежности технических устройств и технологических систем, соответствующие отраслевой специфике ОПО или виду производственной деятельности;

- экспертные специальные знания в области аварийности и травматизма на ОПО литейного и металлургического производства;

- логико-графические методы «Анализ деревьев событий», «Анализ деревьев отказов», имитационные модели возникновения аварий на ОПО;

Оценка последствий и ущерба от возможных аварий включает описание и определение размеров возможных воздействий на людей, имущество и (или) окружающую среду. При этом оценивают физические эффекты аварийных событий (разрушение технических устройств, зданий, сооружений, пожары, взрывы, выбросы токсичных

веществ), уточняют объекты, которые могут подвергнуться воздействиям поражающих факторов аварий, используют соответствующие модели аварийных процессов совместно с критериями поражения человека и групп людей, а также критерии разрушения технических устройств, зданий и сооружений.

Завершается этот этап проведением анализа неопределенности и достоверности полученных результатов, в том числе влияния исходных данных на рассчитываемые показатели риска.

На этапе установления степени опасности аварий на ОПО, рекомендуется проводить сопоставительное сравнение значений полученных показателей опасностей и оценок риска аварий с:

- допустимым риском аварий и (или) уровнем;
- значениями риска аварий на других составных частях ОПО (ранжирование составных частей ОПО в порядке возрастания опасностей);
- фоновым риском аварий для данного типа ОПО или аналогичных ОПО, с фоновым риском гибели людей в техногенных происшествиях;
- значениями риска аварий, полученными с учетом фактических отступлений от требований промышленной безопасности, а также возможного и фактического внедрения компенсирующих мероприятий.

На этапе разработки мероприятий по снижению риска аварий рекомендуется в качестве первоочередных планировать и разрабатывать:

- обоснованные рекомендации по снижению риска аварий для наиболее опасных составных частей ОПО;
- способы предупреждения возникновения возможных инцидентов и аварий на ОПО.

Выбор рекомендаций по снижению риска аварий имеет следующие приоритеты:

- меры, снижающие возможность возникновения аварий;
- меры, снижающие тяжесть последствий возможных аварий;
- меры обеспечения готовности к локализации и ликвидации последствий аварий.

В качестве приоритетных способов предупреждения возникновения возможных инцидентов и аварий рекомендуется использовать:

- пассивную защиту эффективным расстоянием (включая физические барьеры) от опасного воздействия поражающих факторов возможных аварий на стадии проектирования ОПО;
- активную защиту (датчики контроля) от перерастания аварийной опасности в угрозу аварии для жизни и здоровья человека, имущества и окружающей среды на стадии эксплуатации ОПО.

4. ОСНОВНЫЕ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РИСКА АВАРИЙ

Основным показателем опасности на ОПО является риск аварий, который учитывает вероятностный характер превращения аварийной опасности на ОПО в непосредственную угрозу возникновения аварий с последующим возможным причинением вреда жизни, здоровью людей, вреда животным, растениям, окружающей среде, безопасности государства, имуществу физических и юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу. Количественной мерой вреда является ущерб от аварий (в натуральных или стоимостных единицах).

Для оценки риска аварий рекомендуется использовать следующие показатели риска: индивидуальный риск $R_{инд}$, потенциальный риск $R_{пот}$, коллективный риск $R_{колл}$, социальный риск $F(x)$, частота реализации аварии с гибелью не менее одного человека R_1 .

Показатели индивидуального риска $R_{инд}$ и коллективного риска $R_{колл}$ рекомендуется представлять в виде значений вероятности гибели человека и ожидаемого количества погибших из числа выбранной группы лиц в течение одного года.

Распределение потенциального риска $R_{пот}$ рекомендуется представлять на ситуационном плане в виде изолиний, кратных отрицательной степени числа 10, показывающих распределение значений риска гибели людей от поражающих факторов аварий по территории ОПО и прилегающей местности в течение 1 года.

Показатель социального риска $F(x)$ рекомендуется представлять в виде графика ступенчатой функции, описывающей зависимость ожидаемой частоты аварий, в которых может погибнуть не менее (x) человек, от общего числа погибших.

Для оценки последствий каждого рассматриваемого i -го сценария проводится расчет количества пострадавших, которое определяется числом людей (целое значение), оказавшихся в зоне действия поражающих факторов:

$$N_{постр} = \left[\iint_{\Omega_i} \mu_{\sigma}(x, y) dx dy \right] \Omega_i = \bigcup_{j=1}^{\Phi_i} \Omega_{ij}, \quad (1)$$

где $\mu_{\partial}(x, y)$ – функция, описывающая территориальное распределение людей в пределах зоны действия поражающих факторов (плотность распределения людей, чел/м²) с учетом изменения распределения людей в зависимости от смены персонала, проведения аварийных (регламентных) ремонтных или строительных работ на территории ОПО, периодического появления массового скопления людей вблизи ОПО, а также влияния организационных и технических мероприятий, направленных на скорейшую эвакуацию людей из зоны воздействия поражающих факторов, прибытия аварийно-спасательных формирований;

$[...]$ – ближайшее большее целое число;

Φ_i – количество поражающих факторов, которые могут действовать одновременно при реализации i -го сценария;

Ω_{ij} – область действия j -го поражающего фактора в пределах зоны поражения, определяемой в соответствии с детерминированными критериями поражения или по границе достижения вероятности гибели: $v_{\text{уяз}}(x, y) \cdot P_{\text{гиб}}^{ij}(x, y) \geq 0,01$ (с учетом защищенности людей) при реализации i -го сценария аварий.

Для каждого i -го сценария расчет количества погибших $N_{\text{гиб}}^i$ в зоне действия поражающих факторов с площадью S_j^i может быть выполнен по формуле:

$$N_{\text{гиб}}^i = \int_S \mu_{\partial}(x, y) \cdot \min \left(1, 1 - \prod_{j=1}^{\Phi(x, y)} (1 - v_{\text{уяз}}^{ij}(x, y) \cdot P_{\text{гиб}}^{ij}(x, y)) \right) ds, \quad (2)$$

где $v_{\text{уяз}}^{ij}(x, y)$ – коэффициент уязвимости человека, находящегося в точке территории с координатами (x, y) от j -го поражающего фактора, который может реализоваться в ходе i -го сценария аварии и зависит от защитных свойств помещения, укрытия, в котором может находиться человек в момент аварии, и изменяющийся от 0 (человек неуязвим) до 1 (человек не защищен из-за незначительных защитных свойств укрытия), или превышать 1 в случае гибели людей при обрушении зданий;

$\Phi_i(x, y)$ – количество поражающих факторов, которые могут действовать одновременно при реализации i -го сценария в точке с координатами (x, y) ;

$P_{гиб}^{ij}(x, y)$ – условная вероятность гибели незащищенного человека на открытом пространстве в точке территории с координатами (x, y) от j -го поражающего фактора при реализации i -го сценария аварии.

Величину потенциального риска $R_{пот}(x, y)$ год⁻¹ в определенной точке (x, y) на территории площадочного объекта и в зонах, граничащих с площадочным объектом, рекомендуется определять по формуле:

$$R_{пот} = \sum_{i=1}^I Q_i \cdot \min \left(1, 1 - \prod_{j=1}^{\Phi_i(x,y)} (1 - \nu_{уязв}^{ij}(x, y) \cdot P_{гиб}^{ij}(x, y)) \right), \quad (3)$$

где I – число сценариев развития аварий;

Q_i – частота реализации в течение года i -го сценария развития аварии, год⁻¹.

Индивидуальный риск рекомендуется оценивать частотой поражения определенного человека (группы людей) в результате аварий в течение года:

$$R_{инд}^i = \sum_{k=1}^G q_{ki} \cdot R_{пот}(x, y), \quad (4)$$

где q_{ki} – вероятность присутствия i -го индивида в k -ой области территории с учетом продолжительности действия поражающего фактора;

G – число областей, на которые условно можно разбить территорию при условии, что величину потенциального риска на всей площади каждой из таких областей можно принять одинаковой.

Для производственного персонала долю времени, при которой человек подвергается опасности, можно оценить величиной 0,22 – для производственных объектов с постоянным пребыванием персонала (41 час в неделю) и 0,08 – для производственных объектов без постоянного пребывания персонала (менее 2 часов в смену).

В целях сравнения оценок риска с критериями допустимого индивидуального риска рекомендуется рассчитывать максимальное значение индивидуального риска для определенной группы лиц (рискующих).

Величину коллективного риска рекомендуется определять по формуле:

$$R_{\text{колл}} = \sum_{j=1}^J N_r^j \cdot Q_j, \quad (5)$$

где Q_j – частота j -го сценария, при котором ожидаемое количество погибших лиц равно N_r^j .

Социальный риск рекомендуется представлять в виде графика ступенчатой функции $F(x)$, задаваемой уравнением:

$$F(x) = \sum_{i=1}^{I(x)} Q_i^x, \quad (6)$$

где Q_i^x – ожидаемые частоты реализаций аварийных ситуаций C_i , при которых гибнет не менее x человек;

$I(x)$ – число сценариев C_i , при которых гибнет не менее (x) человек.

При анализе опасностей, связанных с отказами технических устройств, систем обнаружения утечек, автоматизированных систем управления технологическим процессом, систем противоаварийной защиты, рекомендуется анализировать технический риск, показатели которого определяются соответствующими методами теории надежности. Методы расчета надежности технических систем рекомендуется сочетать с методами моделирования аварий и количественной оценки риска аварий.

5. КРИТЕРИИ ПОРАЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ И РАЗРУШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПРИ АВАРИЯХ НА ОПО

При оценке последствий воздействия опасных факторов аварий на ОПО и степени возможного поражения людей и разрушения зданий, сооружений по вычисленным параметрам поражающих факторов могут использоваться как детерминированные (учитывающие только величину поражающих факторов), так и вероятностные критерии (по пробит-функции, характеризующей вероятность возникновения последствий определенного масштаба в зависимости от уровня воздействия).

Детерминированные критерии устанавливают значения поражающего фактора, при которых наблюдается тот или иной уровень поражения (разрушения).

Детерминированные критерии присваивают определенной величине негативного воздействия поражающего фактора конкретную степень поражения людей, разрушения зданий, инженерно-технических сооружений.

В случае использования детерминированных критериев условная вероятность поражения принимается равной 1, если значение поражающего фактора превышает предельно допустимый уровень, и равной 0, если значение предельно допустимого уровня поражения не достигается.

Вероятностные критерии показывают, какова условная вероятность того или иного уровня поражения (разрушения) при заданном значении поражающего фактора. Поскольку одна и та же мера воздействия может вызвать последствия различной степени тяжести, величина вероятности поражения выражается функцией Гаусса (функцией ошибок) через пробит-функцию:

$$P_{\text{пор}} = f[\text{Pr}], \quad (7)$$

Каждому значению пробит-функции соответствует определенная величина вероятности поражения выраженная в % (табл. 1) [3].

В общем случае пробит-функция имеет вид:

$$\text{Pr} = a + b \cdot \ln D, \quad (8)$$

где a и b – константы, зависящие от вида и параметров негативного воздействия;

D – доза негативного воздействия (для оценки воздействия теплового излучения – функция плотности, интенсивности теплового излучения и времени воздействия; для барического воздействия – избыточное давление на фронте ударной волны и импульс фазы сжатия; для токсического воздействия – концентрация токсического вещества и время воздействия).

Таблица 1

Связь вероятности поражения с пробит-функцией

$p, \%$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		2,67	2,95	3,12	3,25	3,38	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,86	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

5.1. Критерии поражения тепловым излучением

При оценке воздействия теплового излучения основным критерием поражения является интенсивность теплового излучения. Детерминированные критерии поражения людей приведены в табл. 2 [3]. Для определения числа пострадавших рекомендуется принимать значение интенсивности теплового излучения, превышающее $7,0 \text{ кВт/м}^2$.

Воздействие открытого пламени и тепловой радиации от пожара на технологическое оборудование, наружные установки оценивается по значению поглощенной дозы тепловой радиации, вычисляемой по формуле:

$$D_{\text{обор}} = q \cdot t, \quad (9)$$

где q – величина теплового потока на единицу площади поверхности оборудования, кВт/м²;

t – длительность теплового воздействия, с.

Таблица 2

Предельно допустимая интенсивность теплового излучения

Степень поражения	Интенсивность теплового излучения, 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 Ожог первой степени через 15–20 с Ожог второй степени через 30–40 с Воспламенение хлопка–волокна через 15 мин	7,0
Непереносимая боль через 3–5 с Ожог первой степени через 6–8 с Ожог второй степени через 12–16 с	10,5
Воспламенение древесины с шероховатой поверхностью (влажность 12 %) при длительности облучения 15 мин	12,9
Воспламенение древесины, окрашенной масляной краской по строганной поверхности; воспламенение фанеры	17,0

Зависимость степени повреждения оборудования $k_{\text{повр}}$ от дозы поглощенной тепловой радиации $D_{\text{обор}}$ имеет вид:

$$k_{\text{повр}} = \begin{cases} 0 & \text{при } q_{\text{об}} < 12 \text{ кВт/м}^2 \\ 0,1 & \text{при } D_{\text{обор}} \leq D_{\text{пор}} \\ 0,1 + 0,9 \frac{D_{\text{обор}} - D_{\text{пор}}}{D_{\text{гиб}} - D_{\text{пор}}} & \text{при } D_{\text{обор}} < D_{\text{пор}} \\ 1 & \text{при } D_{\text{обор}} \geq D_{\text{гиб}} \end{cases} \quad (10)$$

где $D_{\text{пор}}$ – пороговое значение дозы поглощенной тепловой радиации, $\text{кВт}\cdot\text{с}/\text{м}^2$, ниже которого оборудование получает только слабые повреждения ($k_{\text{повр}} = 0,1$);

$D_{\text{гиб}}$ – значение дозы поглощенной тепловой радиации, $\text{кВт}\cdot\text{с}/\text{м}^2$, выше которого оборудование считается полностью разрушенным. Значения $D_{\text{пор}}$ и $D_{\text{гиб}}$ для различных типов оборудования приведены в табл. 3 [3].

Таблица 3

Значения $D_{\text{пор}}$ и $D_{\text{гиб}}$ для оборудования разных классов чувствительности к воздействию тепловой радиации

Класс чувствительности оборудования	Тип оборудования	$D_{\text{пор}}$, $\text{кВт}\cdot\text{с}/\text{м}^2$	$D_{\text{гиб}}$, $\text{кВт}\cdot\text{с}/\text{м}^2$
I (высоко-чувствительное)	Расположенное вне укрытий сложное технологическое оборудование	3300	10 000
II (средне-чувствительное)	Оборудование в блок-контейнерах или индивидуальных укрытиях. Незащищенные крановые узлы, средства электрохимической защиты, контрольные пункты телемеханики, опоры ЛЭП и другое незащищенное технологическое оборудование с фланцевыми соединениями с чувствительными к нагреву материалами-уплотнителями	8300	25 000
III (слабо-чувствительное)	Наземные трубопроводы, крановые узлы в защитном укрытии	3500	4500

Подземное технологическое оборудование принимается нечувствительным к термическому воздействию и при любой аварии считается неповрежденным ($k_{\text{повр}} = 0$).

Для поражения человека тепловым излучением величина пробит-функции описывается следующими выражениями:

$$Pr = -12,8 + 2,56\ln(D), \quad (11)$$

$$D = t \cdot q^{4/3}. \quad (12)$$

Величина эффективного времени экспозиции t вычисляется по формулам:

а) для огненного шара:

$$t = 0,92 \cdot m^{0,303}; \quad (13)$$

б) для пожара, пролива или факела:

$$t = t_0 + \frac{x_6}{u_{\text{ср}}}, \quad (14)$$

где m – масса горючего вещества, участвующего в образовании огненного шара, кг;

t_0 – характерное время, за которое человек обнаруживает пожар и принимает решение о своих дальнейших действиях, с (принимается равным 5 с);

x_6 – расстояние от места расположения человека до безопасной зоны (зона, где интенсивность теплового излучения меньше 4 кВт/м²), м;

$u_{\text{ср}}$ – средняя скорость движения человека к безопасной зоне, м/с (принимается 5 м/с).

При использовании пробит-функции в качестве зон стопроцентного поражения принимаются зоны поражения, где значение пробит-функции достигает величины, соответствующей вероятности в 90 %. В качестве зон, безопасных с точки зрения воздействия поражающих факторов, принимаются зоны поражения, где значения пробит-функции достигают величины, соответствующей вероятности в 1 %.

Условная вероятность поражения человека, попавшего в зону непосредственного воздействия пламени пожара, пролива или факела, принимается равной 1.

Для пожара-вспышки следует принимать, что условная вероятность поражения человека, попавшего в зону воздействия высокотемпературными продуктами сгорания газопаровоздушного облака, равна 1. За пределами этой зоны условная вероятность поражения человека принимается равной 0.

При расчете вероятности поражения человека тепловым излучением рекомендуется учитывать возможность укрытия (например, в здании или за ним).

Критерии повреждения тепловым излучением технологического оборудования представлены в табл. 4 [3].

Таблица 4

Критерии повреждения тепловым излучением различных категорий оборудования

Критерии оборудования	Пороговое воздействие	Пробит-функции
Резервуар	15 кВт/м ² T ≥ 10 мин	$V = 12,54 - 1,847 \cdot \ln(\tau)$ $\ln(\tau) = -1,128 \cdot \ln(I) - 2,667 \cdot 10^{-5} \cdot V + 9,887$
Сосуды под давлением	50 кВт/м ² T ≥ 10 мин	$V = 12,54 - 1,847 \cdot \ln(\tau)$ $\ln(\tau) = -0,947 \cdot \ln(I) + 8,835 \cdot I^{0,032}$

Примечание: τ – время до разрушения, с; V – объем сосуда, м³; I – полученное количество теплового излучения, кВт/м².

5.2. Критерии поражения ударной волной

Величина избыточного давления на фронте падающей ударной волны принимается безопасной для человека при $\Delta P_{\phi} = 5$ кПа. Воздействие на человека ударной волны с избыточным давлением на фронте $\Delta P_{\phi} > 120$ кПа принимается в качестве смертельного поражения. Для определения числа пострадавших рекомендуется принимать значение избыточного давления, превышающее 70 кПа.

Критерии повреждения зданий приведены в табл. 5 [3].

Таблица 5

Критерии разрушения типовых промышленных зданий от избыточного давления

Степень поражения	Избыточное давление, кПа
Полное разрушение зданий	Более 100
Тяжелые повреждения, здание подлежит сносу	70

Степень поражения	Избыточное давление, кПа
Средние повреждения зданий, возможно восстановления здания	28
Разрушение оконных проемов, легкообрабатываемых конструкций	14
Частичное разрушение остекления	Менее 2

Степени разрушения различных административных, производственных зданий и сооружений от воздействия избыточного давления ударной волны приведены в табл. 6 [3].

Таблица 6

Данные о степени разрушения производственных, административных зданий и сооружений, имеющих разную устойчивость

Тип зданий, сооружений	Разрушение при избыточном давлении на фронте ударной волны, кПа			
	Слабое	Среднее	Сильное	Полное
Промышленные здания с тяжелым метал. или железобетонным каркасом	20–30	30–40	40–50	>50
Промышленные здания с легким каркасом и бескаркасной конструкции	10–20	25–35	35–45	>45
Складские кирпичные здания	10–20	20–30	30–40	>40
Одноэтажные складские пом. с метал. каркасом и стеновым заполнением из листового металла	5–7	7–10	10–15	>15
Бетонные и железобетонные здания и антисейсмические конструкции	25–35	80–120	150–200	>200
Здания железобетонные монолитные повышенной этажности	25–45	45–105	105–170	170–215

Тип зданий, сооружений	Разрушение при избыточном давлении на фронте ударной волны, кПа			
	Слабое	Среднее	Сильное	Полное
Котельные, регуляторные станции в кирпичных зданиях	10–15	15–25	25–35	35–45
Деревянные дома	6–8	8–12	12–20	>20
Подземные сети, трубопроводы	400–600	600–1000	1000–1500	1500
Трубопроводы наземные	20	50	130	–
Кабельные подземные линии	до 800	–	–	1500
Цистерны для перевозки нефтепродуктов	30	50	70	80
Резервуары и емкости стальные наземные	35	55	80	90
Подземные резервуары	40	75	150	200

Условная вероятность травмирования и гибели людей, находящихся в зданиях, в зависимости от степени разрушения зданий от воздействия ударной волны определяется по табл. 7 [3].

Таблица 7

Зависимость условной вероятности поражения человека с разной степенью тяжести от степени разрушения здания

Тяжесть поражения	Степень разрушения			
	Полная	Сильная	Средняя	Слабая
Смертельная	0,6	0,49	0,09	0
Тяжелая травма	0,37	0,34	0,1	0
Легкая травма	0,03	0,17	0,2	0,05

Для расчета условной вероятности разрушения объектов и поражения людей ударными волнами используются следующие пробит-функции:

а) вероятность повреждений стен промышленных зданий, при которых возможно восстановление зданий без их сноса, может оцениваться по соотношению:

$$Pr_1 = 5 - 0,26 \cdot \ln V_1, \quad (15)$$

$$V_1 = \left(\frac{17500}{\Delta P} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{I} \right)^{9,3}, \quad (16)$$

где ΔP – избыточное давление, Па;

I – импульс, кг·м/с;

б) вероятность разрушений промышленных зданий, при которых здания подлежат сносу, оценивается по соотношению:

$$\text{Pr}_2 = 5 - 0,22 \cdot \ln V_2, \quad (17)$$

$$V_2 = \left(\frac{40\,000}{\Delta P} \right)^{7,4} + \left(\frac{460}{I} \right)^{11,3}; \quad (18)$$

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

$$\text{Pr}_3 = 5 - 5,74 \cdot \ln V_3, \quad (19)$$

$$V_3 = \frac{4,2}{p} + \frac{1,3}{i}, \quad (20)$$

$$\bar{p} = 1 + \frac{\Delta P}{P_0}, \quad (21)$$

$$\bar{i} = \frac{I}{P_0^{1/2} \cdot m^{1/3}}, \quad (22)$$

где m – масса тела живого организма, кг;

P_0 – атмосферное давление, Па;

г) вероятность разрыва барабанных перепонок у людей от уровня перепада давления в воздушной волне определяется по формуле:

$$\text{Pr}_4 = -12,6 + 1,524 \cdot \ln \Delta P; \quad (23)$$

д) вероятность отброса человека волной давления оценивается по величине пробит-функции:

$$\text{Pr}_5 = 5 - 2,44 \cdot \ln V_5, \quad (24)$$

$$V_5 = \frac{7,38 \cdot 10^{-3}}{\Delta P} + \frac{1,3 \cdot 10^9}{\Delta P \cdot I}. \quad (25)$$

При использовании пробит-функций в качестве зон стопроцентного поражения принимаются зоны поражения, где значение пробит-функции достигает величины, соответствующей вероятности в 90 %. В качестве зон, безопасных с точки зрения воздействия поражающих факторов, принимаются зоны поражения, где значения пробит-функции достигают величин, соответствующих вероятности в 1 %.

Критерии повреждения ударной волной технологического оборудования представлены в табл. 8 [3].

Таблица 8

Критерии повреждения ударной волной различных категорий оборудования

Категория оборудования	Пороговое воздействие, кПа	Коэффициент пробит-функции	
		a	b
Резервуары	22	-18,96	+2,44
Сосуды под давлением	16	-42,44	+4,33
Протяженное оборудование	31	-28,07	+3,16
Малогобаритное оборудование	37	-17,79	+2,18

5.3. Критерии токсического поражения

Границы зон токсического поражения опасным веществом рассчитываются по смертельной и пороговой токсодозам при ингаляционном воздействии на организм человека либо по пробит-функциям.

Сравнением с пороговыми и смертельными токсодозами (таблица 8) определяются расстояния, соответствующие смертельному поражению и пороговому воздействию.

Для оценки вероятности смертельного поражения человека используется пробит-функция, по которой, с использованием табл. 9 [3], определяется вероятность смертельного поражения человека на открытом пространстве:

Свойства опасных токсических веществ

Вещество	Пороговая токсодоза PC _{t50} , мг·мин/л	Смертельная токсодоза LC _{t50} , мг·мин/л	Коэффициенты при расчете пробит-функции		
			a	b	n
Аммиак	15,00	150,0	-35,90	1,850	2,00
Фтористый водород	4,00	40,00	-35,87	3,354	1,00
Хлористый водород	2,00	20,0	-16,85	2,000	1,00
Бромистый водород	2,40	24,0	-18,32	2,000	1,00
Цианистый водород	0,20	6,0	-9,56	1,000	2,40
Сероводород	1,00	15,0	-31,42	3,008	1,43
Сероуглерод	30,00	500,0	-46,62	4,200	1,00
Формальдегид	0,60	6,0	-12,24	1,300	2,00
Фосген	0,55	3,2	-19,27	3,686	1,00
Фтор	0,20	3,0	-10,34	1,000	2,00
Хлор	0,60	6,0	-8,29	0,920	2,00
Хлорциан	0,75	11,0	-	-	-
Оксид углерода	10,00	37,5	-37,98	3,700	1,00
Оксид этилена	2,20	25,0	-6,21	1,000	1,00
Бензол	60,00	250,0	-109,80	5,300	2,00
Диметиламин	1,00	-	-7,34	2,000	1,00
Акрилонитрил	-	-	14,97	1,900	1,00
Акролеин	0,20	-	-9,93	2,049	1,00

$$Pr = a + b \cdot \ln(C^n \cdot T), \quad (26)$$

где C – концентрация токсичного вещества n , ppm;

T – время воздействия, мин.

При расчете воздействия токсических веществ на человека рекомендуется учитывать возможность укрытия, например в здании, а также применения средств индивидуальной защиты (противогазов).

6. МЕТОДЫ АНАЛИЗА РИСКА АВАРИЙ

При выборе методов анализа риска аварий необходимо учитывать этапы функционирования объекта (проектирование, эксплуатация, реконструкция, модернизация), цели анализа, критерии приемлемого риска, размещение и технологические характеристики анализируемого объекта, основные опасности (взрыв, пожар, токсичность, радиационная опасность), наличие ресурсов для проведения анализов, опыт и квалификацию исполнителей, наличие необходимой информации и другие факторы.

При любом методическом подходе в результате анализа риска должны быть даны ответы на три основных вопроса:

- что плохого может произойти? (Идентификация опасности);
- как часто это может случиться? (Анализ частоты);
- какие могут быть последствия? (Анализ последствий).

Так, на стадии идентификации опасностей и предварительных оценок риска рекомендуется применять методы качественного анализа опасностей и оценки риска, опирающиеся на продуманную процедуру, специальные вспомогательные средства (анкеты, бланки, опросные листы, инструкции) и практический опыт исполнителей при проектировании и эксплуатации анализируемого объекта.

Практика показывает, что использование сложных количественных методов анализа риска зачастую дает значение показателей риска, точность которых для сложных технических систем невелика. В связи с этим проведение полной количественной оценки риска более эффективно для сравнения источников опасностей или различных вариантов мер безопасности (например, на стадии проектирования или при размещении объекта), чем для составления заключения о степени безопасности действующего объекта.

Наиболее эффективным является применение комбинированных методов, например – использование качественных методов анализа риска и количественной оценки вероятности событий, ранжирования опасности и т. п.

Применение количественных методов необходимо для сравнения опасностей различной природы, оценки последствий крупных аварий, обоснования безопасных расстояний или для представления результатов.

В случае недостатка статистических данных на практике рекомендуется использовать экспертные оценки и методы ранжирования риска, основанные на упрощенных методах количественного анализа риска. В этих подходах рассматриваемые события или элементы обычно разбиваются по величине вероятности, тяжести последствий и риска на несколько групп (или категорий, рангов), например, с высоким, промежуточным, низким или незначительным уровнем риска. При таком подходе высокий уровень риска может считаться (в зависимости от специфики объекта) неприемлемым (или требующим особого рассмотрения), промежуточный уровень риска требует выполнения программы работ по уменьшению уровня риска, низкий уровень считается приемлемым, а незначительный вообще может не рассматриваться.

Метод анализа риска должен:

- быть научно обоснован и соответствовать рассматриваемым опасностям;
- давать результаты в виде, позволяющем лучше понять формы реализации опасностей и наметить пути снижения риска аварий;
- быть повторяемым и проверяемым.

В табл. 10 приведены рекомендации [3] по использованию различных методов анализа риска аварий на ОПО в зависимости от этапов функционирования объектов, достоверности и целей анализа.

Таблица 10

Методы анализа риска аварий

Метод	Вид деятельности				
	Размещение ОПО (предпроектные работы)	Проектирование	Ввод/вывод из эксплуатации	Эксплуатация	Реконструкция
1	2	3	4	5	6
Проверочный лист (Check-List)	+	+	+	+	+
Структурный анализ «Что будет, если?..» (SWIFT – Structure: What – if)	0	+	++	++	+

1	2	3	4	5	6
Предварительный анализ опасностей или Метод идентификации опасностей (HAZID – HAZard Identification или PHA – Preliminary Hazard Analysis)	++	+	0	0	+
Анализ опасности и работоспособности (HAZOP – HAZard and OPerability Study)	+	++	+	+	++
Анализ видов и последствий отказов (FMEA и FMECA – Failure Mode, Effects and Critical Analysis)	+	++	+	+	++
Анализ деревьев отказов и событий (FTA – Fault Tree Analysis, ETA – Event Tree Analysis)	0	++	+	+	++
Количественный анализ риска (QRA – Quantitative Risk Assessment)	++	++	+	+	+

Примечание: «0» наименее подходящий метод анализа; «+» – рекомендуемый метод; «++» – наиболее подходящий метод.

Методы «Проверочного листа» (*Check-List*) и «Что будет, если..?» (*SWIFT*) относятся к группе методов качественных оценок опасности, основанных на изучении соответствия условий эксплуатации ОПО требованиям промышленной безопасности.

Результатом применения этих методов является составление перечня вопросов и ответов о соответствии анализируемого объекта требованиям промышленной безопасности с указанием мер по их обеспечению. Метод «*Check-List*» отличается от метода «*SWIFT*» более обширным представлением исходной информации и дополнением результатами анализа последствий нарушения требований безопасности.

Эти методы наиболее просты, сопровождаются вспомогательными формами и унифицированными бланками, облегчающими на практике проведение анализа и представление результатов, не очень трудоемки и наиболее эффективны при исследовании ОПО с типовой технологией. В связи с этим указанные методы являются наиболее часто и широко используемыми при проведении анализа риска аварий на действующих предприятиях.

Метод «Идентификация опасностей» (*HAZID*) является качественным методом анализа опасностей технологических процессов,

цель которого состоит в идентификации основных опасностей, опасных факторов и событий, способных нарушить эксплуатацию или нанести вред данному виду деятельности или всей технологической системе ОПО в целом.

Метод «Идентификация опасностей» рекомендуется использовать на ранних стадиях разработки проектной документации в условиях недостатка или неполноты информации. Основными задачами метода являются:

- выявление источников опасностей и определение последствий их реализации посредством анализа ОПО и его составных частей с учетом особенностей технологии ОПО, инфраструктуры, площадки размещения ОПО, окружающей местности и расположения иных объектов;

- выдача рекомендаций в целях дальнейшего их использования при выполнении проектных работ на последующих стадиях, позволяющих устранить или смягчить воздействие опасных факторов на персонал, население, окружающую среду и технологическое оборудование.

При использовании метода «Идентификация опасностей» рекомендуется рассматривать следующие опасности (опасные факторы):

- внешние воздействия на объект (стихийные бедствия и другие факторы окружающей среды, антропогенные риски, инфраструктурные риски, опасности соседних объектов);

- внутренние опасности – технологические риски (пожаро- и взрывоопасность, опасные технологические факторы, методы (принципы) контроля, вспомогательные инженерные системы, факторы технического обслуживания и ремонта);

- опасности, связанные с персоналом (подбор, обучение и тренинг персонала, риск заболеваний, факторы опасности социального характера).

Соответственно для каждого фактора оцениваются возможные последствия: гибель или ущерб здоровью персонала и населения, авария, инцидент, материальный ущерб, экономические потери, ущерб окружающей среде и т. д.

Перечень опасностей уточняется с учетом специфики ОПО. Результаты анализа, выполненного по методу «Идентификация опасностей» оформляются в виде таблицы, в которой указывают опасные факторы, возможные опасности, объект воздействия, меры защиты и экспертную оценку риска каждой опасности по трехбалльной системе: 1 – высокий (выше допустимого) риск; 2 – средний риск; 3 – низкий риск.

Метод «Анализ вида и последствий отказов» (далее – метод АВПО) применяется для качественного анализа опасностей отказов технических устройств в рассматриваемой технологической системе. Методом АВПО рассматриваются вид и причины отказа технических устройств, последствия воздействия отказа на технологическую систему ОПО и (или) составную часть ОПО.

Метод АВПО может быть расширен до полуколичественного метода «Анализ вида, последствий и критичности отказа» (далее – метод АВПКО). В этом случае рекомендуется каждый вид отказа (события) ранжировать с учетом двух аспектов критичности: вероятности (или частоты) события и тяжести его последствий, уровни которых определяют приоритетность мер безопасности (табл. 11).

Таблица 11

Матрица риска «частота – тяжесть последствий»
в соответствии с ГОСТ Р 51901

Частота возникновения события, год ⁻¹		Тяжесть последствий событий			
		Катастрофическое событие	Критическое событие	Некритическое событие	Событие с незначительными последствиями
Частое	>1	В	В	В	С
Вероятное	1–10 ⁻¹	В	В	С	М
Случайное	10 ⁻¹ –10 ⁻²	В	В	М	М
Маловероятное	10 ⁻² –10 ⁻⁴	В	В	М	Н
Чрезвычайно редкое	10 ⁻⁴ –10 ⁻⁶	В	С	Н	Н
Практически невероятное	<10 ⁻⁶	С	М	Н	Н

Примечание: выделена область рисков, требующих принятия неотложных мер к снижению их вероятности (частоты) и (или) тяжести последствий.

В зависимости от этих аспектов выделяют следующие категории риска.

«В» – высокая величина риска, риск выше допустимого уровня, требуется разработка дополнительных мер безопасности;

«С» – средняя величина риска, допустимый риск, требующий снижения путем принятия определенных мер безопасности;

«М» – малая величина риска, риск ниже допустимого при осуществлении контроля принятых мер безопасности;

«Н» – незначительная величина риска, риск пренебрежимо мал, анализ и принятие дополнительных мер безопасности не требуется.

По тяжести последствий рекомендуется следующая градация событий:

1) *катастрофическое событие* – приводит к множеству или нескольким смертельным исходам для персонала и (или) населения, полной потере объекта, невосполнимому ущербу окружающей среде;

2) *критическое событие* – угрожает жизни людей вплоть до гибели человека, приводит к существенному ущербу имуществу и окружающей среде;

3) *некритическое событие* – не угрожает жизни людей, но возможны ранения, отдельные случаи травмирования людей, серьезные профзаболевания, не приводит к существенному ущербу имуществу или окружающей среды;

4) *событие с незначительными последствиями* – событие, не относящееся по своим последствиям ни к одной из первых трех категорий, возможны лишь легкие ранения, неопасные травмы, профзаболевания легкой формы, незначительное повреждение системы.

Оценка частоты возникновения событий с определенными негативными последствиями проводится экспертно на основе данных по эксплуатации или с применением метода «Анализ дерева событий».

Результаты применения метода АВПО и АВПКО оформляют в виде таблиц, содержащих перечень оборудования, вид и причины возможных отказов, частоту, последствия, критичность, средства обнаружения неисправности (например, сигнализаторы, приборы контроля) и рекомендации по уменьшению опасности.

Методы АВПО и АВПКО рекомендуется использовать при проектировании или реконструкции ОПО.

Метод «Анализа опасностей и работоспособности» (далее – метод АОР) является качественным методом и предназначен для исследования опасностей отклонений технологических параметров (например, температуры, давления) и технического обслуживания от регламентных режимов.

Этот метод рекомендуется применять:

- для ОПО или его составных частей с высоким уровнем капитальных затрат и сложности, с применением новых технологий;
- при разработке проектной документации на строительство, реконструкцию, техническое перевооружение ОПО I и II типов опасности;
- после аварий (инцидентов) на ОПО в целях проведения детального исследования используемой технологии, оборудования и систем автоматизации технологического процесса, выявления нарушений требований безопасности и достаточности предусмотренных мер защиты.

При этом для каждого узла определяется критичность отклонений, в случае недостаточности или отсутствия мер защиты вырабатываются рекомендации, устанавливаются сроки их выполнения и приоритет.

Рекомендуется применять следующие категории критичности отклонений:

- высокая – запрещается переходить на следующую стадию проекта, не выполнив рекомендации высокой категории критичности;
- средняя – рекомендация среднего уровня должна быть выполнена до начала пусконаладочных работ;
- низкая – рекомендация должна быть выполнена до начала эксплуатации.

Для количественного определения степени опасности может использоваться оценка вероятности и тяжести последствий отклонений по критериям критичности аналогично методам АВПО и АВПКО (табл. 11).

При выработке рекомендаций учитывают влияние отклонений на:

- безопасность (то есть отклонение может реально привести к аварии, поражению людей или инциденту);
- окружающую среду (утечка, выброс опасных веществ, загрязнение);
- эксплуатацию (нарушение технологического режима, остановка производства, убытки предприятия).

Метод АОР рекомендуется использовать при разработке систем противоаварийной защиты (далее – ПАЗ) и выборе ее элементов.

Для каждого опасного события, выявленного методом АОР (выход параметра техпроцесса за установленные пределы), для которого

целесообразно его предотвращение с помощью системы ПАЗ (функция безопасности), определяется требуемый уровень надежности соответствующего контура ПАЗ – цепи от инициирующих устройств (датчик, параметрическое реле, кнопка аварийного останова) до исполнительных механизмов (привод запорного клапана, сбросное устройство, автомат отключения напряжения).

При определении уровня надежности ПАЗ рекомендуется учитывать результаты оценки риска, в том числе тяжесть последствий, вероятность предупреждения опасного события, частоту и длительность пребывания людей в опасной зоне, вероятность опасного события (частоты запросов, срабатывания).

При необходимости уменьшения требований к системам ПАЗ рекомендуется рассматривать использование дополнительных мер безопасности (сигнализация, предохранительные клапаны, мембраны, легкобрасываемые панели, обвалование, огнезащитные покрытия, взрывоустойчивое исполнение здания).

Метод «Анализа дерева отказов» (далее – АДО) предназначен для качественного и количественного анализа комбинации отказов технических устройств, инцидентов, ошибок персонала и нерасчетных внешних (техногенных, природных) воздействий, приводящих к авариям на ОПО. Метод АДО используется для анализа возможных причин возникновения аварии и расчета ее частоты (на основе знания частот исходных событий).

Структура дерева отказов включает одно головное событие (как правило, это авария и (или) инцидент), которое соединяется с набором соответствующих нижестоящих событий (ошибки, отказы, неблагоприятные внешние воздействия), образующих причинные цепи (сценарии аварий). Для связи между событиями в «узлах» деревьев используются знаки «И» и «ИЛИ». Логический знак «И» означает, что вышестоящее событие возникает при одновременном наступлении нижестоящих событий (соответствует перемножению их вероятностей для оценки вероятности вышестоящего события). Знак «ИЛИ» означает, что вышестоящее событие может произойти вследствие возникновения одного из нижестоящих событий.

При анализе дерева отказа рекомендуется определять минимальные сочетания событий, определяющие возникновение или невозможность возникновения аварии (минимальные пропускное и отсечное сочетания соответственно).

Минимальные пропускные сочетания – это набор исходных событий, предпосылок, одновременное возникновение которых достаточно для появления головного события (аварии).

Минимальные отсечные сочетания – набор исходных событий, который гарантирует отсутствие головного события при условии невозникновения хотя бы одного из составляющих этот набор событий.

Метод «Анализ дерева событий» (далее – АДС) – количественный или полуколичественный метод, включающий построение последовательности событий, исходящих из основного события, как правило, аварии на ОПО. Метод АДС используется для анализа развития аварийной ситуации. Частота каждого сценария развития аварийной ситуации рассчитывается путем умножения частоты основного события на условную вероятность конечного события (например, аварии с разгерметизацией оборудования с горючим веществом в зависимости от условий могут развиваться как с воспламенением, так и без воспламенения вещества).

Зачастую методы АДО и АДС используют совместно: дерево отказов – для анализа вероятности отказов (событий), АДС – для анализа вариантов развития событий (рис. 2). Такой совмещенный метод носит название «Галстук-бабочка».



Рис. 2. Схематическое представление опасного события (аварийной ситуации) и связанных с ним событий с помощью дерева отказов и дерева событий

Метод «Анализ барьеров безопасности» (далее – АББ) применяется в целях качественного или количественного обоснования и оценки эффективности мер безопасности – барьеров. Барьеры могут быть техническими (клапаны, запорная арматура, перегородки) и организационными (диагностирование, экспертиза, подготовка персонала, производственный контроль), превентивными (предупреждающими возникновение аварии) и смягчающими (снижающими последствия аварий наносимый ущерб). Принципиальная схема представлена на рис. 3.

Основное достоинство метода АББ заключается в системности и наглядности анализируемых мер безопасности, непосредственно связанных со стадиями возникновения и развития аварийного процесса. Для количественной оценки эффективности барьеров безопасности рекомендуется использовать метод АДО и метод АДС.

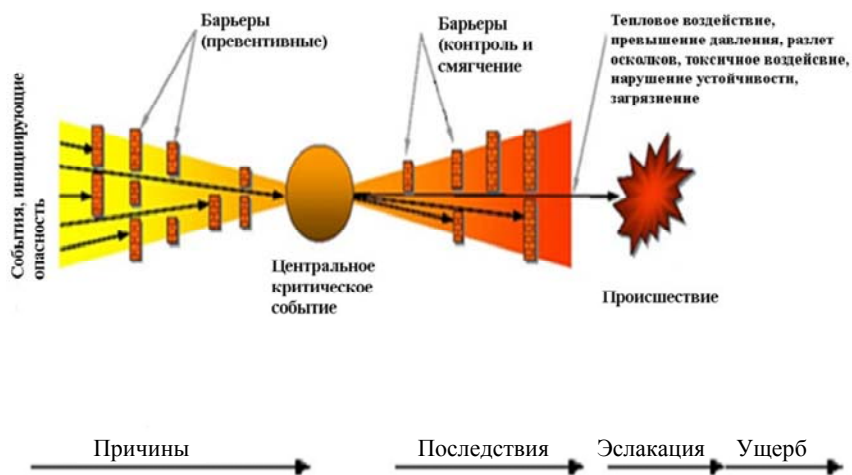


Рис. 3. Метод «Анализ барьеров безопасности»

Количественная оценка риска аварий характеризуется расчетом нескольких показателей риска и может также включать один или несколько вышеупомянутых методов (или использовать их результаты). Результаты количественной оценки риска аварий могут существенно зависеть от допущений, используемых моделей аварийного процесса, выбора сценариев аварии и исходной информации,

в том числе достоверности данных по частотам отказов и аварий, данных по надежности оборудования.

При оценке риска аварий с выбросами опасных веществ рекомендуется проанализировать последствия аварий для различных сценариев, в том числе:

- аварий с наиболее тяжелыми последствиями – как правило наиболее неблагоприятного варианта развития аварии и наименее вероятного. Такие сценарии характеризуются частичным или полным разрушением единичного оборудования с максимальным ущербом (например, выбросом опасного вещества), а также с возможностью эскалации аварии на соседние установки объекта и достижения максимального ущерба (разрушения) и максимального количества пораженных;

- наиболее вероятных аварий – вариантов развития аварии с менее тяжелыми последствиями, но более вероятными условиями развития, а также тех сценариев аварий, которые наиболее полно характеризуют имеющиеся опасности и специфику объекта.

Количественная оценка риска аварий позволяет оценивать и сравнивать различные опасности и ОПО по единым показателям и наиболее эффективна:

- на стадии проектирования и размещения ОПО;
- при обосновании и оптимизации мер безопасности;
- при оценке опасности крупных аварий на ОПО, имеющих однотипные технические устройства (например, магистральные трубопроводы, плавильные агрегаты, реакторы с опасными веществами и т. д.);
- при комплексной оценке опасностей аварий для людей, имущества и окружающей среды.

7. НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

При оценке риска аварии на опасном производственном объекте важнейшее значение имеет определение надежности применяемых на объекте технических устройств, тем более на таких энергонасыщенных с большим количеством технологического и вспомогательного оборудования производствах, как литейное и металлургическое.

В первую очередь это относится к потенциально опасному оборудованию, системам, обеспечивающим контроль и управление за технологическими процессами, в которых используются потенциально опасное оборудование или опасные вещества, а также системам автоматики безопасности.

Надежность представляет собой комплексное свойство, сочетающее в себе понятия работоспособности, безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохранности.

Работоспособность представляет собой состояние объекта, при котором он способен выполнять свои функции.

Безотказность – свойство объекта сохранять свою работоспособность в течение определенного времени. Событие, нарушающее работоспособность объекта, называется отказом. Самоустраняющийся отказ называется сбоем.

Долговечность – свойство объекта сохранять свою работоспособность до предельного состояния, когда его эксплуатация становится невозможной по техническим, экономическим причинам, условиям техники безопасности или необходимости капитального ремонта.

Ремонтпригодность – определяет приспособляемость объекта к предупреждению и обнаружению неисправностей и отказов и устранению их путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

Сохраняемость – свойство объекта непрерывно (стабильно) поддерживать свою работоспособность в течение и после хранения и технического обслуживания.

Основными показателями надежности является вероятность безотказной работы, интенсивность отказов и средняя наработка до отказа.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ представляет собой вероятность того, что в пределах указанного периода времени отказ объекта не возникнет. Этот показатель определяется отношением

числа элементов объекта, безотказно проработавших до момента времени t , к общему числу элементов объекта, работоспособных в начальный момент.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ – это число отказов $n(t)$ элементов объекта в единицу времени, отнесенное к среднему числу элементов Nt объекта, работоспособных к моменту времени Δt :

$$\lambda(t) = n(t) / (Nt \cdot \Delta t),$$

где Δt – заданный отрезок времени.

Показатели интенсивности отказов элементов, составляющих объект (отдельных единиц оборудования, входящих в состав системы, комплектующих, входящих в состав технического устройства и т. д.), берутся на основании справочных данных. Так, например, для электродвигателей: $\lambda(t) = (100 \dots 600) \cdot 10^{-5}$, 1/ч.

Надежность объекта, как системы, характеризуется потоком отказов Λ , численно равным сумме интенсивности отказов отдельных устройств:

$$\Lambda = \sum \lambda_i.$$

Связь вероятности безотказной работы $P(t)$ и потока отказов Λ определяется выражением: $P(t) = \exp(-\Lambda t)$, очевидно, что $0 < P(t) < 1$ и $P(0) = 1$, а $P(\infty) = 0$.

Средняя наработка до отказа T_0 – это математическое ожидание наработки объектом первого отказа: $T_0 = 1/\Lambda = 1/(\sum \lambda_i)$, или отсюда: $\Lambda = 1/T_0$.

Время безотказной работы равно обратной величине интенсивности отказов.

Расчет надежности – процедура определения значений показателей надежности объекта с использованием методов, основанных на их вычислении по справочным данным о надежности элементов объекта, по данным о надежности объектов-аналогов, данным о свойствах материалов и другой информации, имеющейся к моменту расчета.

Решение вопросов надежности и безопасности современных структурно-сложных технических систем и объектов осуществляется на всех стадиях жизненного цикла, от проектирования и создания, производства, до эксплуатации, использования и утилизации.

Расчет надежности входит в состав обязательных работ по обеспечению работы любого технического устройства, автоматизированной технологической системы, систем управления и безопасности и выполняется на основе требований нормативно-технической документации (в том числе ГОСТ 27.002-89, ГОСТ 27.301-95, ГОСТ 24.701-86, ГОСТ 27.003-90, ГОСТ 27.004-85) с использованием справочной и методической литературы [4–7].

Выбор метода расчета надежности зависит от ряда факторов:

- этапа разработки системы;
- характера отказов технических устройств и их элементов;
- способа соединения элементов в системе;
- вида закона распределения времени безотказной работы;
- режима работы оборудования;
- восстанавливаемости объекта.

По характеру отказов – различают методы расчета при внезапных, постепенных и чередующихся отказах.

Расчет также зависит от способа соединения элементов – основное соединение элементов или резервное.

От вида закона распределения времени безотказной работы:

- экспоненциальный;
- нормальный;
- Вейбула и др.

По признаку восстанавливаемости:

- методы расчета восстанавливаемых объектов;
- методы расчета невосстанавливаемых объектов.

По способу анализа:

- расчет структурной надежности (элементный расчет);
- расчет функциональной надежности (функциональный расчет).

Наиболее часто при расчете надежности применяются:

- структурные методы расчета;
- логико-вероятностный метод;
- общий логико-вероятностный метод;
- метод деревьев отказов;
- метод Марковского и др.

Структурные методы являются основными методами расчета показателей надежности в процессе проектирования систем и технических устройств, поддающихся разделению на элементы, характеристики надежности которых в момент проведения расчетов известны

или могут быть определены другими методами. Расчет показателей надежности структурными методами в общем случае включает:

- представление объекта в виде структурной схемы, описывающей логические соотношения между состояниями элементов и объекта в целом с учетом структурно-функциональных связей и взаимодействия элементов, принятой стратегии обслуживания, видов и способов резервирования и других факторов;

- описание построенной структурной схемы надежности объекта адекватной математической моделью, позволяющей в рамках введенных предположений и допущений вычислить показатели надежности объекта по данным о надежности его элементов в рассматриваемых условиях применения.

В качестве структурных схем надежности применяются:

- схемы функциональной целостности;
- структурные блок-схемы надежности;
- схемы деревьев отказов;
- графы состояний и переходов.

В логико-вероятностных методах (ЛВМ) исходная постановка задачи и построение модели функционирования исследуемого системного объекта или процесса осуществляется средствами математической логики, а расчет показателей свойств надежности, живучести и безопасности выполняется средствами теории вероятностей.

ЛВМ являются методологией анализа и оценки надежности, безопасности и риска аварии структурно-сложных систем. В ЛВМ используются преобразования исходных структурных моделей в искомые расчетные математические модели, что позволяет выполнить их алгоритмизацию и реализацию на ЭВМ.

При расчете надежности немонотонных процессов, систем переменных во времени часто пользуются общим логико-вероятностным методом (ОЛВМ).

В основе постановки и решения всех задач расчета надежности систем с помощью ОЛВМ лежит событийно-логический подход. Этот подход предусматривает последовательное выполнение следующих четырех основных этапов ОЛВМ:

- этап структурно-логической постановки задачи;
- этап логического моделирования;
- этап вероятностного моделирования;
- этап выполнения расчетов показателей надежности.

8. АНАЛИЗ ПРИЧИН И УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ, ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ И ОПИСАНИЕ ВОЗМОЖНЫХ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ АВАРИЙ НА ОПО

К наиболее часто используемым методам анализа причин аварий и вариантов их развития как для проектируемых, так и для уже действующих опасных производственных объектов относятся «Анализ дерева отказов» (АДО) и «Анализ дерева событий» (АДС), которые рекомендуются для количественной и качественной оценки риска техногенных аварий [3].

На первом этапе составляется перечень основных аварийно опасных событий, которые могут привести к возникновению аварийных ситуаций на ОПО. Например:

- прогар футеровки и корпуса (ствола) или днища вагранки, переходной летки или копильника и контакт расплава металла или шлака с влагой в зоне выбивки («провала») вагранки или на площадке обслуживания вагранки и копильника;

- скопление угарного газа в дутьевом коллекторе и системе подачи дутья;

- попадание влаги и закрытых емкостей вместе с шихтой в ванну жидкого металла, находящегося в плавильных индукционных печах;

- попадание расплава во влажный, непросушенный, непрогретый разливочный ковш, в аварийный приямок или на пол, где оказалась вода и т. п., скачивание шлака во влажный короб (шлаковницу);

- разрушение (разгерметизация) внутреннего газопровода, подводящего природный газ к газопотребляющему оборудованию, и т. п.

Далее проводится анализ, в следствии чего данные ситуации могут возникнуть. Например:

- нарушения обслуживающим персоналом требований промышленной безопасности, технологических инструкций и инструкций по охране труда при выполнении технологических операций, эксплуатации, обслуживании и ремонте оборудования;

- отказы и неполадки в работе оборудования и автоматики безопасности;

- износ и несвоевременный ремонт, и замена технологического оборудования, автоматики безопасности и КИП;

– недостаточный контроль со стороны руководства за соблюдением требований безопасности и технологических инструкций, и прочее.

Для оценки вероятности ошибки исполнителя (оператора, плавильщика, шихтовщика и т. д.) при выполнении тех или иных действий на рабочем месте в зависимости от сложности операций, напряженности работы, квалификации самого исполнителя, наличия инструкций, новизны ситуации и т. д. может быть использован классификатор ориентировочных значений вероятности ошибки оператора (обслуживающего персонала) на опасных производственных объектах, представленный в табл. 12 [8].

Таблица 12

Классификатор ориентировочных значений вероятности ошибки оператора

Номер по классификатору	Рутинная работа	Наличие инструкций	Наличие стресса	Новая ситуация	Ориентировочное значение вероятности ошибки оператора $P_{оп}$
V1	Да	Да	Нет	Нет	0,0001–0,001
V2	Да	В неполном объеме	Небольшой	Нет	0,001–0,005
V3	Да	В неполном объеме	Некоторый	Нет	0,005–0,0
V4	Нет	Нет	Некоторый	Нет	0,01–0,05
V5	Нет	Нет	Да	Нет	0,05–0,5
V6	Нет	Нет	Да	Да	0,5–1,0

Оценка вероятности отказа в работе технологического оборудования, разгерметизации технологических трубопроводов, частоты возникновения пожара на объектах различного назначения и т. д. может быть выполнена на основании накопленной на предприятии статистики по отказам аналогичного оборудования, либо на основании рекомендаций соответствующей справочной литературы [9; 10].

В частности, частота отказов машинного оборудования (в том числе плавильных и нагревательных печей) принимается равной $5 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$, систем автоматического контроля технологического

оборудования – $1 \cdot 10^{-2} \text{ год}^{-1}$, разгерметизация теплообменников, в том числе в системах охлаждения плавильных печей – $4,3 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ [10].

Вероятность пожара ($P_{п}$), связанного с разгерметизацией (разрывом, течью) внутрицевого газопровода, рассчитывается исходя из его общей длины (L) и относительной частоты (P_o , $\text{м}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) возникновения пожара в промышленных зданиях и сооружениях в зависимости от вида размещенного там производства (табл. 13) [10].

Таблица 13

Частота возникновения пожара для некоторых производственных зданий и сооружений

Наименование объекта	Частота возникновения пожара ($P_{п}$), ($\text{м}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$)
Электростанции	$2,2 \cdot 10^{-5}$
Склады химической продукции	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Склады многономенклатурной продукции	$9,0 \cdot 10^{-5}$
Инструментально-механические цеха	$0,6 \cdot 10^{-5}$
Литейные и плавильные цеха	$1,89 \cdot 10^{-5}$
Цеха горячей прокатки металлов	$1,89 \cdot 10^{-5}$
Текстильные производства	$1,53 \cdot 10^{-5}$

При расчете вероятности ($P_i \text{ год}^{-1}$) аварийно опасных событий, связанных с нарушением ТИ при выполнении тех или иных технологических операций, должно учитываться их среднегодовое количество, которое принимается, исходя из объемов производства и сложившейся технологической практики (количество плавок, количество металлозавалок в одну плавильную компанию, количество футеровок печи, количество сливов металла из печи и т. д.).

Далее, для каждого возможного аварийно-опасного события составляется блок-схема, где анализируются возможные варианты развития и последствия аварии. Для наиболее тяжелого варианта развития событий рассматриваются 3 сценария последствий – C_1 – наиболее вероятное развитие событий, C_2 – наиболее тяжелые последствия и C_3 – без тяжелых последствий. Пример блок-схемы анализа риска аварии приведен на рис. 4.

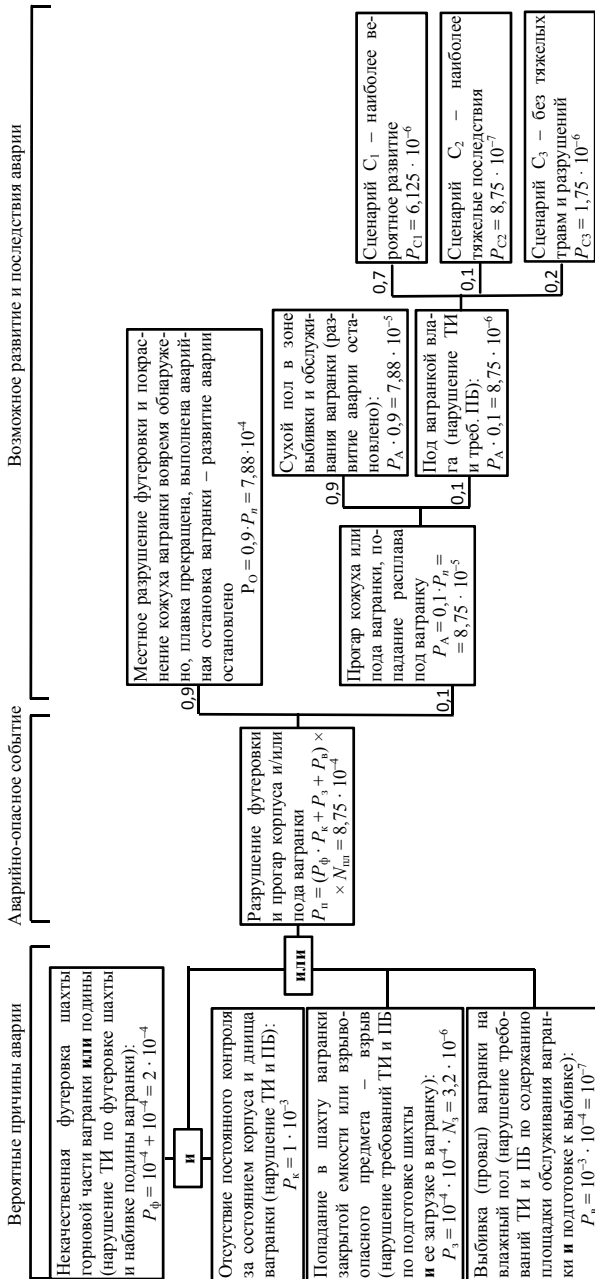


Рис. 4. Пример составления блок-схемы для проведения анализа риска аварии на ОПО:

$N_{\text{шт}}$ – количество плавильных кампаний в вагранке = 250 шт/год; N_3 – количество загрузок шахты за одну плавильную кампанию = 320 загрузок; C_1 – вероятны травмы, в том числе тяжелые, ожоги, контузии, разрушение футеровки и повреждение шахты вагранки, площадки обслуживания, трубопроводов, остекления участка; C_2 – возможны тяжелые травмы, вплоть до гибели человека, значительные повреждения шахты, ближайших конструкций и оборудования, разрушение остекления участка, возникновение пожара; C_3 – легкие травмы, ушибы, временная потеря слуха, возможно разрушение или опрокидывание легких конструкций

9. РАСЧЕТ ФИЗИЧЕСКОГО ВЗРЫВА В РЕЗУЛЬТАТЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДЫ С РАСПЛАВОМ МЕТАЛЛА

При контакте воды с расплавленным металлом (при попадании расплавленного металла на влажный пол, например, при проливе расплава из ковша или приемок аварийного слива расплава или прогаре футеровки печи; загрузке влажной шихты в плавильные печи; заливке расплава в непросушенные ковши или скачивании шлака во влажные изложницы) возникает вероятность возникновения физического взрыва, связанного с мгновенным закипанием (испарением) воды в объеме, ограниченном окружающим расплавом, который можно описать в соответствии с моделью взрыва резервуара с перегретой водой (BLEVE от английского Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion – взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости).

При разрыве оболочки резервуара давление в нем резко падает до внешнего давления среды, окружающей резервуар. Перегретая вода, имеющая большой запас энергии, мгновенно вскипает. Происходит адиабатное (изоэнтропическое) расширение воды, мгновенно образуется большое количество пара – происходит физический взрыв.

Последствия таких взрывов очень тяжелые, т. к. кроме воздействия ударной волны персонал подвергается опасности термического ожога от разлетающихся брызг расплавленного металла и пара, а также физического поражения от разлетающихся кусков шихты и обрушающихся конструкций. Все вышеперечисленные факторы могут привести к тяжелым травмам вплоть до смертельных исходов.

Расчет поражающих факторов и зон их действия может быть выполнен в соответствии с методикой, изложенной в РБ Г-05-039-96 [11] и ГОСТ Р12.3.047-2012 [9]. На первом этапе расчета определяется возможность возникновения взрыва BLEVE через безразмерный параметр δ , характеризующий внутреннюю энергию перегретой воды в соответствии с формулой [9]:

$$\delta = \frac{C_p \cdot (T - T_{\text{кип}})}{r_{\text{исп}}} = \frac{h_B - h_{\text{ВН}}}{r_{\text{исп}}}, \quad (27)$$

где C_p – удельная теплоемкость жидкой фазы, Дж/кг·К (допускается принимать равной 2000 Дж/кг·К);

T – температура жидкой фазы, соответствующая температуре насыщенного пара при давлении срабатывания предохранительного клапана, К;

$T_{\text{кип}}$ – нормальная температура кипения вещества, К;

$h_{\text{В}}$ – удельная энтальпия воды в резервуаре при заданном давлении P , кДж/кг ($h_{\text{В}} = C_p \cdot T$);

$h_{\text{ВН}}$ – удельная энтальпия кипящей воды при атмосферном давлении, кДж/кг, по таблице 2 [12] при температуре 1000 °С и рассчитанном давлении P , $h_{\text{ВН}} = C_p \cdot T_{\text{кип}}$ кДж/кг;

$r_{\text{исп}}$ – удельная теплота испарения воды при атмосферном давлении, (при расчетах ее можно принимать равной $r_{\text{исп}} = 2257$ кДж/кг).

Если $\delta < 0,35$, взрыв BLEVE не происходит. В противном случае, при $\delta \geq 0,35$, вероятность взрыва велика.

Для расчета ударной волны, образующейся в результате физического взрыва, необходимо определить избыточное давление (ΔP) и импульс давления (i_+). Расчет избыточного давления ΔP в положительной фазе ударной волны выполняется по формуле [9]:

$$\Delta P = P_0 \left(0,8 \frac{M_{\text{ПР}}^{0,33}}{r} + 3 \frac{M_{\text{ПР}}^{0,66}}{r^2} + 5 \frac{M_{\text{ПР}}}{r^3} \right), \quad (28)$$

где $M_{\text{ПР}}$ – приведенная масса кипящей воды, кг;

r – расстояние до разрушающихся конструкций, оборудования или человека, м.

Приведенную массу кипящей воды, кг, можно определить из выражения [9]:

$$M_{\text{ПР}} = \frac{m \cdot k \cdot C_p \cdot (T - T_{\text{кип}})}{Q_0} = m \frac{h_{\text{В}} - h_{\text{ВН}}}{Q_0}, \quad (29)$$

где Q_0 – константа, равная 4520 Дж/кг;

m – масса воды, попавшей в расплав, кг.

При расчете свойства воды и пара принимаются в соответствии с ГССД 187-99 [12].

Для того, чтобы определить толщину стенки резервуара, образовавшегося вокруг воды, попавшей в расплав (толщину корки

закристаллизовавшегося металла), нужно определить время, необходимое для нагрева заданного объема воды до температуры кипения с учетом избыточного давления в слое расплава.

Преобразовывая уравнения Клапейрона – Клаузиуса [13], определяем температуру кипения воды при заданном давлении по формуле [14]:

$$T_{\text{кип}} = \left(\frac{1}{T_{\text{кип. атм}}} - \frac{R \cdot \ln(P_{\text{Ме}} / P_0)}{L \cdot M} \right)^{-1}, \quad (30)$$

где $T_{\text{кип. атм}}$ – температура кипения при атмосферном давлении, К;

L – удельная теплота испарения воды, ($L = 2,3$ МДж/кг);

M – молярная масса воды ($M = 0,018$ кг/моль);

R – универсальная газовая постоянная ($R = 8,31$ Дж/моль·К);

$P_{\text{Ме}}$ – гидростатическое давление расплава, действующее на резервуар, кПа;

P_0 – атмосферное давление ($P_0 = 101,3$ кПа).

Гидростатическое давление жидкого металла, действующее на резервуар, определяется по формуле [14]:

$$P_{\text{Ме}} = P_0 + \rho \cdot g \cdot h, \quad (31)$$

где ρ – плотность расплава, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

h – высота слоя металла над резервуаром, м, (принимается из конкретных производственных условий, например, глубины ванны расплава при довалке шихты в плавильную печь, высоты слоя расплава в ковше или изложнице и т. д.).

Количество теплоты, требуемое для нагрева воды до температуры кипения, определяется по формуле [15]:

$$Q = c \cdot m \cdot (T_{\text{кип}} - T_0), \quad (32)$$

где c – удельная теплоемкость воды, равная 4200 Дж/(кг·°С);

m – масса воды, кг;

T_0 – начальная температура воды, К.

Время (τ , с), необходимое для нагрева заданного объема воды зависит от площади и температуры нагревающей поверхности и коэффициента теплопередачи и определяется по формуле [15]:

$$\tau = \frac{Q}{\alpha \cdot F \cdot (T_1 - T_0)}, \quad (33)$$

где α – коэффициент теплопередачи (для «спокойной» воды $\alpha = 450 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$);

F – площадь поверхности теплообмена, м^2 (условно принимаем, что вода в расплаве принимает форму шара);

T_1 – температура нагревающей поверхности, К (принимается равной температуре расплава $T_{\text{Ме}}$);

T_0 – начальная температура воды, К.

Толщина образующейся стенки резервуара с водой – корки кристаллизации при интенсивном теплоотводе ($Bi > 1$) – определяется по закону квадратного корня для затвердевания отливок [14]:

$$x = k \cdot \sqrt{\tau}, \quad (34)$$

где x – толщина корки затвердевшего металла, см;

k – эмпирический коэффициент пропорциональности, зависящий от типа сплава и условий кристаллизации.

Оценка максимального внутреннего давления для цилиндрического или сферического сосуда определяется по формуле Барлоу и зависит от его размеров и прочности [15]:

$$P = \frac{2 \cdot x \cdot \sigma}{D}, \quad (35)$$

где P – максимальное внутреннее давление, которое способен выдержать сосуд;

σ – допускаемое напряжение при расчетной температуре, МПа (для стали $\sigma = 7,85 \cdot 10^4$ МПа, для чугуна СЧ20 $\sigma = 7,85 \cdot 10^4$ МПа);

x – толщина стенки сосуда, м;

D – внешний диаметр сосуда, м.

Порядок выполнения расчета.

Исходные данные для расчета физического взрыва в ковшах при сливе металла или при попадании влаги в печь:

– количество воды – принимается в соответствии с заданием к курсовому проекту;

– высота слоя расплава – принимается в соответствии с заданием к курсовому проекту;

– начальная температура воды условно принимается $T_0 = 293$ К;

– температура металла, К (при плавке и транспортировке чугуна $T_{Me} = 1673$ К, при плавке и транспортировке стали $T_{Me} = 1853$ К).

Металлостатическое давление, действующее на днище печи или ковша, может быть определено по формуле (31):

$$P_{Me} = P_0 + \rho \cdot g \cdot h, \text{ кПа.}$$

Температура кипения воды при давлении P_{Me} (кПа) вычисляется по формуле (30):

$$T_{кип} = \left(\frac{1}{T_{кип. атм}} - \frac{R \cdot \ln(P_{Me} / P_0)}{L \cdot M} \right)^{-1}, \text{ К.}$$

Количество теплоты, требуемое для нагрева воды до температуры кипения (32):

$$Q = c \cdot m \cdot (T_{кип} - T_0), \text{ кДж.}$$

Площадь поверхности нагрева рассчитываем для диаметра $D = n/10$ м, где n – последняя цифра варианта задания.

$$F = \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \text{ м}^2.$$

Время, необходимое для нагрева заданного объема воды, по формуле (33):

$$\tau = \frac{Q}{\alpha \cdot F \cdot (T_1 - T_0)}, \text{ с.}$$

Толщину стенки образовавшегося резервуара – затвердевшей корки металла – определим по формуле (34), приняв коэффициент

пропорциональности $k = 0,051 \frac{\text{см}}{\text{с}^{1/2}}$, в соответствии с условиями за-
твердевания расплава при высокой скорости теплоотвода:

$$x = k \cdot \sqrt{\tau}, \text{ см.}$$

Максимальное избыточное внутреннее давление, которое выдержит образовавшийся резервуар с водой, определим по формуле [15]:

$$P_{\text{изб}} = \left(\frac{s_1 - c}{K \cdot K_0 \cdot D} \right)^2 \cdot \sigma \cdot \varphi, \text{ МПа,}$$

где $K_0 = 1$ [17, п. 7.25];

$K = 0,5$ [17, табл. 4];

$s_1 - c$ – толщина стенки сосуда, мм, для данного случая равна $-x$;

σ – допускаемое напряжение при расчетной температуре, равное $7,85 \cdot 10^4$ МПа;

$\varphi = 1$.

Определяем удельную энтальпию $h_{\text{в}}$ насыщенного водяного пара по [12] при температуре 1000 °С и давлении $P_{\text{изб}}$.

Определим вероятность возникновения взрыва BLEVE по формуле (27):

$$\delta = \frac{h_{\text{в}} - h_{\text{вн}}}{r_{\text{ИСП}}}.$$

Приведенная масса перегретой воды в тротиловом эквиваленте по формуле (29):

$$M_{\text{ПР}} = m \frac{h_{\text{в}} - h_{\text{вн}}}{Q_0}, \text{ кг.}$$

Избыточное давление ударной волны (ΔP) на стенки ковша или тигля печи, внутренний диаметр которого равен $(n + 20)/100$, м, где n – номер варианта исходных данных, найдем из выражения (28):

$$\Delta P = P_0 \left(0,8 \frac{M_{\text{ПР}}^{0,33}}{r} + 3 \frac{M_{\text{ПР}}^{0,66}}{r^2} + 5 \frac{M_{\text{ПР}}}{r^3} \right), \text{ кПа.}$$

Далее, используя формулу 28, с помощью программного продукта Microsoft Excel необходимо произвести расчеты давлений во фронте УВ с шагом удаления 50–100 мм от эпицентра взрыва для определения расстояний пороговых давлений и, соответственно, радиусов зон поражения персонала, повреждения оборудования, внутрицеховых конструкций и остекления свободно распространяющейся ударной волной. Результаты предельных значений УВ сводят в таблицу, а графическое изображение зон поражения персонала и зон повреждения строительных конструкций цеха наносится на планировку ОПО.

Пример графического изображения расчетных зон действия ударной волны при взрыве в индукционных печах представлен на рис. 5 и 6.

При физическом взрыве помимо ударной волны существует опасность поражения персонала разлетающимися продуктами плавки.

Расчет кинематических параметров летящих предметов при взрывах может быть выполнен в соответствии с приложением 7 РБ Г-05-039-96 [11].

Для ударных волн (УВ) промежуточной интенсивности ($\Delta P/P_0 < 3,5$) значение скорости, которую может приобрести осколок (частица расплава, кусок шихты) в результате воздействия УВ, оценивается с помощью графиков на рис. 7 [11].

Приведенный импульс рассчитывается по формуле:

$$\bar{i} = \frac{C_D \cdot i_t \cdot a_0}{\Delta P \cdot (KH + X)}. \quad (36)$$

Формулы для расчета приведенного давления и скорости имеют вид:

$$\bar{P} = \Delta P / P_0, \quad (37)$$

$$\bar{U} = \frac{M \cdot v_0 \cdot a_0}{P_0 \cdot A(KH + X)}. \quad (38)$$

Обозначения в выражениях (36)–(38):

M – масса осколка;

v_0 – скорость осколка;

a_0 – скорость звука в воздухе;

A – площадь поперечного сечения тела;

$K = 4$ – постоянная;

H – минимальный поперечный размер тела в среднем сечении;

X – расстояние от фронтальной точки на поверхности тела до наибольшего по площади его поперечного сечения [11];

C_D – коэффициент лобового сопротивления тела [11].

Определив по графику значение приведенной скорости, из выражения (38) находим начальную скорость осколка:

$$v_0 = \frac{\bar{U} \cdot P_0 \cdot A \cdot (KH + X)}{M \cdot a_0}. \quad (39)$$

Если $\Delta P/P_0 > 3,5$, приведенное давление рассчитывается по формуле:

$$\bar{P} = \frac{(\Delta P - P_0) \cdot V_0}{M \cdot a_1} \cdot K_{\text{сниж.}}, \quad (40)$$

где ΔP – избыточное давление в положительной фазе волны, принимаем из расчета физического взрыва на расстоянии $r = 0,01$ м;

P_0 – атмосферное давление, равное 101,3 кПа;

V_0 – объем сосуда, задан заданием;

M – масса осколка, задана заданием;

$K_{\text{сниж}}$ – коэффициент снижения давления, связанный с разрушением оболочки сосуда, равный $1 \cdot 10^{-6}$;

a_1 – скорость звука в газе.

$$a_1 = 91,18 \sqrt{\gamma_1 T_1 / m}, \quad (41)$$

где γ_1 – показатель адиабаты газа, равный 1,28;

T_1 – температура газа в момент разрушения резервуара, принимаем равной 1000 °С;

m – молекулярный вес смеси газа в резервуаре, равный 18,015 г/моль.

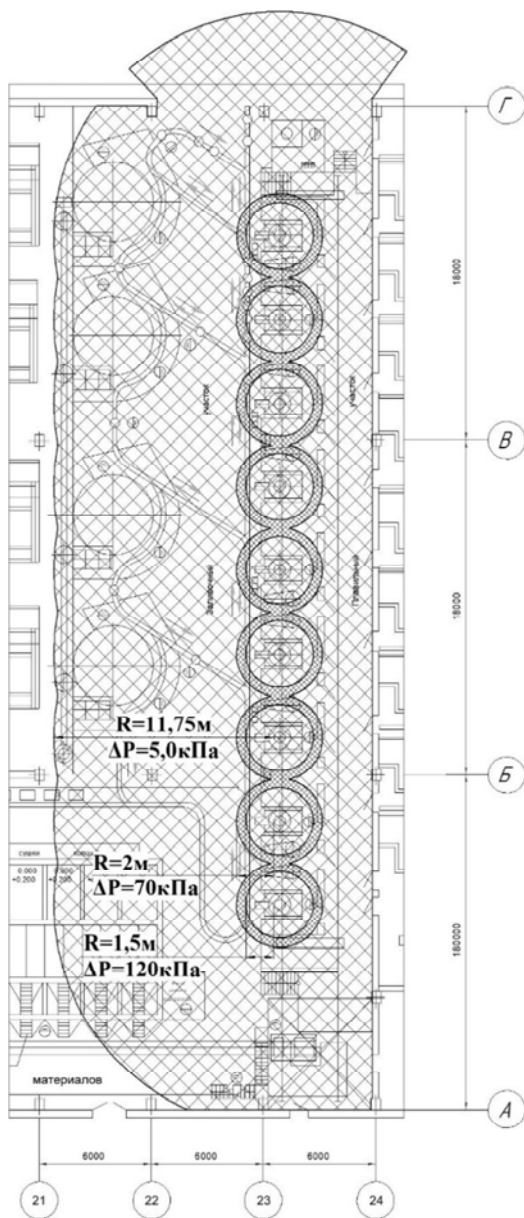


Рис. 5. Пример нанесения зоны возможного поражения персонала ударной волной на планировку ОПО

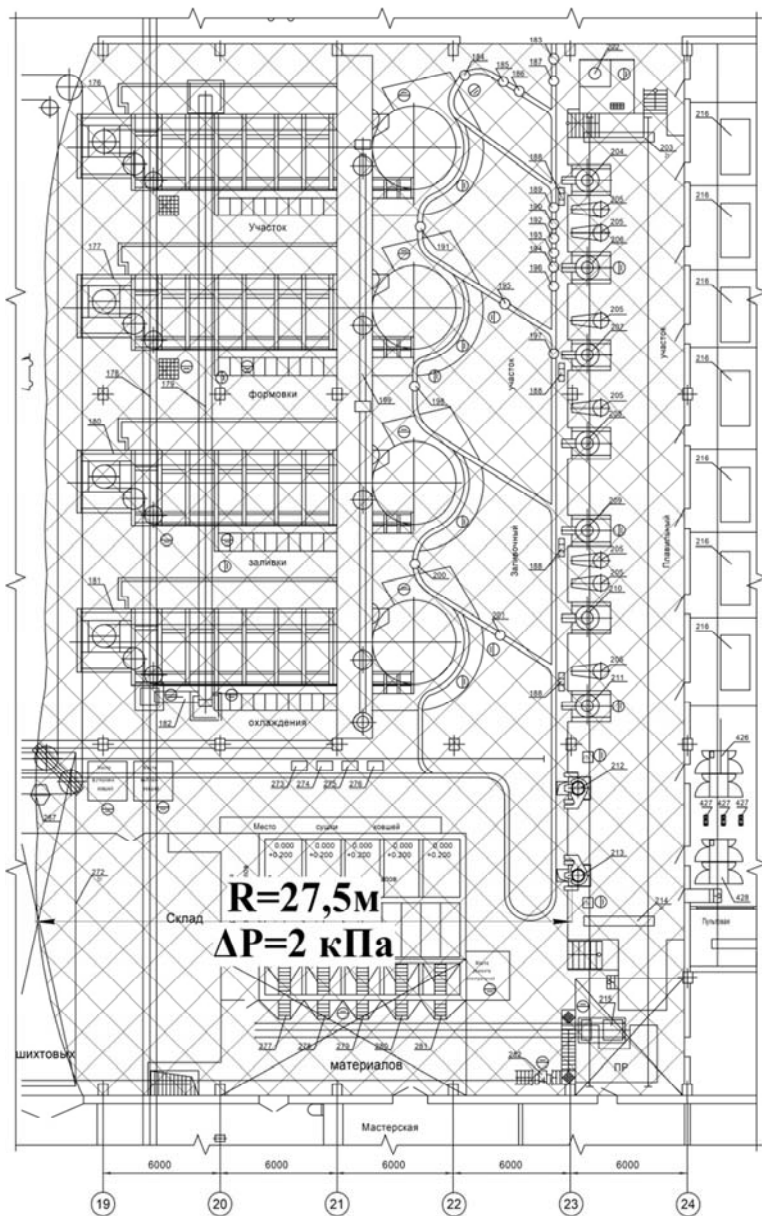


Рис. 6. Пример нанесения зоны возможного повреждения конструкций и оборудования ударной волной на планировку ОПО

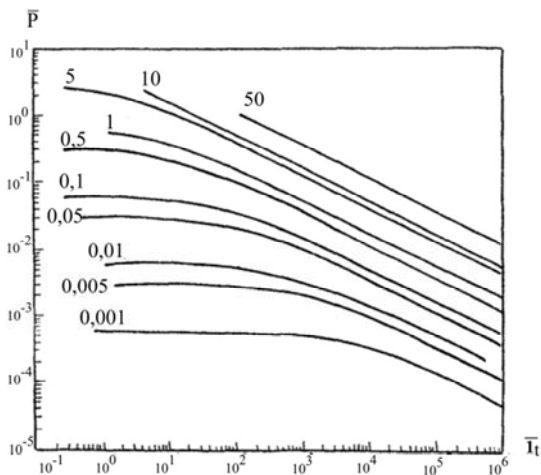


Рис. 7. Зависимость безразмерного давления P^- от проведенного импульса i_t при различных значениях приведенной скорости вторичного осколка \bar{U}

Определив по графику (рис. 8) [11] значение приведенной скорости, можно найти начальную скорость осколка для сосуда типа «сфера»:

$$v_0 = \bar{U} \cdot a_1. \quad (42)$$

Расчетная траектория полета осколка представлена на рис. 9, где \bar{v}_0 – начальная скорость осколка, α – угол вылета, H_0 – начальная высота, H – максимальная высота подъема, S – горизонтальное перемещение.

Движение тела, брошенного под углом к горизонту (без учета сопротивления воздуха), можно представить как результат сложения двух прямолинейных движений: одного – вдоль поверхности Земли и второго – перпендикулярно поверхности Земли. Максимальная дальность полета осколка соответствует углу вылета, равному 45° . Время подъема осколка с начальной высоты H_0 до максимальной H :

$$\tau_{\text{подъема}} = \frac{v_0 \cdot \sin \alpha}{g}. \quad (43)$$

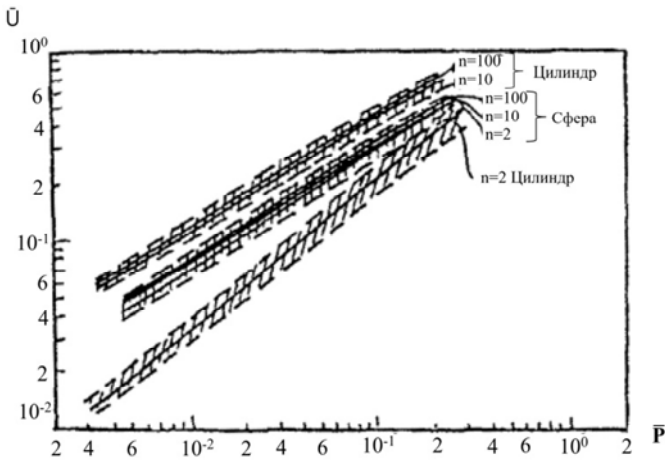


Рис. 8. Зависимость приведенной скорости осколков \bar{U} от приведенного давления \bar{P}

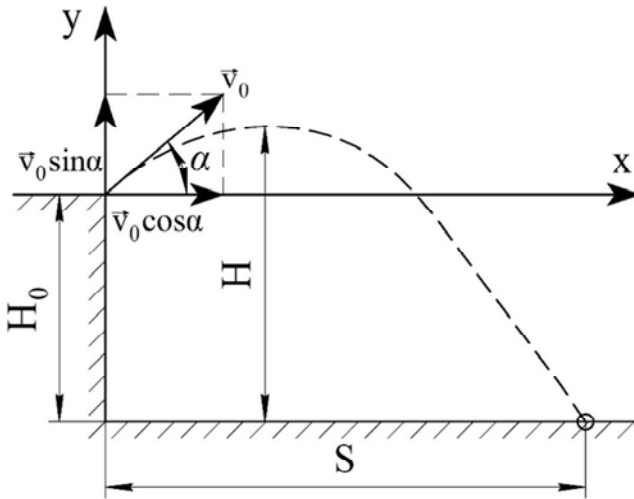


Рис. 9. Расчетная схема полета осколка.

Максимальная высота подъема осколка:

$$H = H_0 + \frac{v_0 \cdot \sin \alpha \cdot \tau_{\text{подъема}}}{2}. \quad (44)$$

Зная максимальную высоту подъема, можно определить время падения осколка:

$$\tau_{\text{падения}} = \sqrt{\frac{2H}{g}}. \quad (45)$$

Суммарное время полета включает время подъема и время падения:

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{\text{подъема}} + \tau_{\text{падения}}. \quad (46)$$

Если пренебречь сопротивлением воздуха, то горизонтальное перемещение осколка, соответствующее максимальному радиусу разлета осколков, может быть определено из выражения:

$$S = v_0 \cdot \cos \alpha \cdot \tau_{\Sigma}. \quad (47)$$

В расчете необходимо учитывать, что все литейные цеха имеют ограниченную высоту. В связи с этим кроме максимального расстояния разлета осколков необходимо определить расстояние, на котором частица ударится о потолок цеха и упадет вертикально в низ. Для этого по формулам (43) и (47) необходимо найти время подъема частицы на высоту до потолка цеха и расстояние, на котором произойдет столкновение.

$$\tau_{\text{подъема}} = \frac{2(H - H_0)}{v_0 \cdot \sin \alpha}, \text{ с,}$$

$$S = v_0 \cdot \cos \alpha \cdot \tau_{\text{подъема}}, \text{ м.}$$

Графическое изображение зон разлета осколков с учетом строительных конструкций наносим на планировку ОПО (рис. 10).

Значения H_0 для случая взрыва в печи принимаем – 2,0 м, для случая взрыва в ковше $H_0 = 0,5$ м.

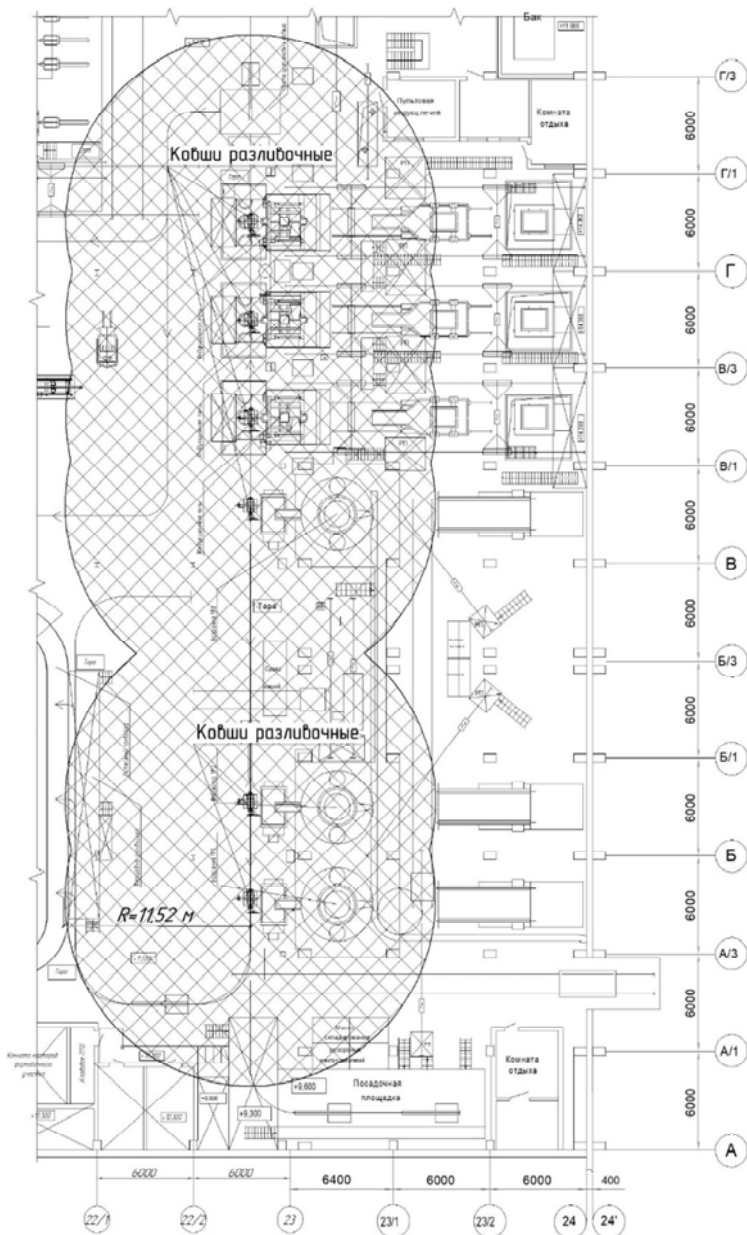


Рис. 10. Пример нанесения зоны разлета осколков на планировку ОПО

10. РАСЧЕТ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ПОЖАРА В РЕЗУЛЬТАТЕ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ВНУТРИЦЕХОВОЙ СИСТЕМЫ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ

В случае разгерметизации внутрицеховой системы газоснабжения (механического повреждения, коррозии газопроводов, разгерметизации газозапорной арматуры, нарушения газоплотности соединений и т. д.) возможна утечка природного газа в цеховое пространство, что, в свою очередь, при контакте с источником зажигания может привести к воспламенению газозоудушной смеси и пожару.

Массовая скорость истечения сжатого газа из трубопровода или резервуара определяется по формулам [17]:

– докритическое истечение:

$$\text{при } \frac{P_a}{P_V} \geq \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma(\gamma-1)} ; \quad (48)$$

$$G = A_{hol} \cdot \mu \left[P_V \cdot \rho_V \cdot \left(\frac{2 \cdot \gamma}{\gamma - 1} \right) \cdot \left(\frac{P_a}{P_V} \right)^{2/\gamma} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{P_a}{P_V} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right\}^{1/2} \right] ; \quad (49)$$

– сверхкритическое истечение:

$$\text{при } \frac{P_a}{P_V} < \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma(\gamma-1)} ; \quad (50)$$

$$G = A_{hol} \cdot \mu \left[P_V \cdot \rho_V \cdot \gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \right]^{1/2} , \quad (51)$$

где G – массовый расход, кг/с;

P_a – атмосферное давление, Па;

P_V – давление газа в трубопроводе, Па;

γ – показатель адиабаты газа;

A_{hol} – площадь отверстия, м²;

μ – коэффициент истечения, принимаем равным 0,8.

При струйном истечении сжатых горючих газов в результате разрушения газопровода под давлением возникает опасность образования диффузионных факелов.

Длина факела L_F при струйном горении определяется по формуле:

$$L_F = K \cdot G^{0,4}, \quad (52)$$

где G – расход продукта, кг/с;

K – эмпирический коэффициент, который при истечении сжатых газов принимается равным 12,5.

Ширина факела D_F при струйном горении определяется по формуле:

$$D_F = 0,15 \cdot L_F. \quad (53)$$

При проведении оценки пожарной опасности горящего факела при струйном истечении сжатых горючих газов допускается утверждать следующее [10; 17]:

– зона непосредственного контакта пламени с окружающими объектами определяется размерами факела;

– длина факела L_F не зависит от направления истечения продукта и скорости ветра;

– наибольшую опасность представляют горизонтальные факелы, условную вероятность реализации которых следует принимать равной 0,67;

– поражение человека в горизонтальном факеле происходит в 30° секторе с радиусом, равным длине факела;

– воздействие горизонтального факела на соседнее оборудование, приводящее к его разрушению (каскадному развитию аварии), происходит в 30° секторе, ограниченном радиусом, равным L_F ;

– за пределами указанного сектора на расстояниях от L_F до $1,5 L_F$ тепловое излучение от горизонтального факела составляет 10 кВт/м^2 ;

– при мгновенном воспламенении струи газа возможность формирования волн давления допускается не учитывать.

Величина эффективного времени экспозиции t для факельного горения может быть определена по формуле [17]:

$$t = t_0 + \frac{x}{u}, \quad (54)$$

где t_0 – характерное время, за которое человек обнаруживает пожар и принимает решение о своих дальнейших действиях, с (может быть принято равным 5 с);

x – расстояние от места расположения человека до безопасной зоны, м (зона, где интенсивность теплового излучения меньше 4 кВт/м^2);

u – средняя скорость движения человека к безопасной зоне, м/с (принимается равной 5 м/с).

Условная вероятность поражения человека (от ожогов различной степени до летального исхода, в зависимости от интенсивности излучения и времени экспозиции), попавшего в зону непосредственного воздействия пламени пожара, принимается равной 1.

Интенсивность теплового излучения может быть определена по формуле [18]:

$$q = 0,78F \cdot \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - 110 \right] / x^2, \quad (55)$$

где q – интенсивность теплового излучения, Вт/м²;

F – площадь излучающей поверхности (факела), м²;

T – температура излучающей поверхности, К, принимаем равной 1673 К;

x – расстояние от излучающей поверхности, м.

Степень поражения персонала в зависимости от интенсивности теплового излучения и времени экспозиции представлена в табл. 14.

Таблица 14

Степень поражения персонала в зависимости от интенсивности теплового излучения и времени экспозиции

Степень поражения	Интенсивность излучения, Вт/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 Ожог 1 степени через 15–20 с Ожог 2 степени через 30–40 с	7,0

Степень поражения	Интенсивность излучения, Вт/м ²
Непереносимая боль через 3–5 с Ожог 1 степени через 6–8 с Ожог 2 степени через 12–16 с	10,5

Порядок выполнения расчета.

Исходные данные для расчета:

- избыточное давление газа в трубопроводе $P_{изб}$, кПа (см. исходные данные);
 - внутренний диаметр трубопровода: d , мм (см. исходные данные к заданию);
 - атмосферное давление $P_a = 101,3$ кПа;
 - показатель адиабаты природного газа: $\gamma = 1,256$.
- Определяем режим истечения газа.

$$\frac{P_a}{P_V} \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)}$$

Сравниваем полученные значения давления с критическим.

Для сверхкритического истечения массовый расход должен определяться по формуле (50).

Рассчитаем площадь отверстия истечения газа:

$$A_{hol} = \frac{3,14 \cdot d^2}{4}, \text{ м}^2.$$

Плотность газа ρ_V при давлении $P_{изб} + P_a$, кПа определяется по формуле:

$$\rho_V = \frac{P_V \cdot M}{R \cdot T}, \text{ кг/м}^3,$$

где $P_V = P_{изб} + P_a$;

M – средняя молярная масса природного газа, $M = 17,478$ г/моль;

R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,31$;
 T – температура газа, К.
 Определяем массовый расход по выражению (51):

$$G = A_{hol} \cdot \mu \left[P_V \cdot \rho_V \cdot \gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \right]^{1/2}, \text{ кг/с.}$$

Длину факела определим по формуле (52)

$$L_F = K \cdot G^{0,4}, \text{ м.}$$

Ширина факела (53):

$$D_F = 0,15 \cdot L_F, \text{ м;}$$

$$R_F = D_F / 2, \text{ м.}$$

Площадь излучающей поверхности факела (площадь конуса):

$$F = \pi \cdot R_F^2 + \pi \cdot R_F \cdot L_F, \text{ м}^2.$$

Находим безопасное расстояние от факела ($q < 4 \text{ кВт/м}^2$) из выражения (55):

$$x_{(4)} = \sqrt{\frac{0,78 \cdot F \cdot \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - 110 \right]}{q}}, \text{ м.}$$

Величина эффективного времени экспозиции (54):

$$t = t_0 + \frac{x_{(4)}}{u}, \text{ с.}$$

Поражение персонала – непереносимая боль от теплового воздействия возникает при интенсивности $q = 10,5 \text{ кВт/м}^2$ [17, табл. П4.4]. Опасное расстояние определим из выражения (55):

$$x_{(10,5)} = \sqrt{\frac{0,78 \cdot F \cdot \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - 110 \right]}{q}}, \text{ м.}$$

Величина эффективного времени экспозиции определяется по формуле (54):

$$t = t_0 + \frac{x_{(10,5)}}{u}, \text{ с.}$$

Степень поражения персонала в зависимости от интенсивности теплового излучения и времени экспозиции представлена в табл. 15 [17].

Сопоставляя полученные значения времени экспозиции с данными табл. 14 для различной степени поражения, определяем, на каком расстоянии от факела персонал может испытать непереносимые болевые ощущения и получить ожоги 1 и 2 степени.

Результаты расчетов сводятся в таблицу (пример табл. 15).

Таблица 15

Зоны поражения персонала тепловым излучением при пожаре в случае разгерметизации внутрицеховых газопроводов

Избыточное давление газа, кПа	Диаметр газопровода (Ду), мм	Длина факела, м	Диаметр факела, м	Опасное расстояние от факела ($q = 10,5 \text{ кВт/м}^2$)	Время экспозиции	Безопасное расстояние от факела ($q = 4,0 \text{ кВт/м}^2$)
100	100	4,33	0,65	5,25	6,05	8,51
	80	3,62	0,54	4,39	5,88	7,12
	50	2,49	0,37	3,02	5,60	4,89
50	32	1,55	0,23	1,88	5,38	3,05
	30	1,47	0,22	1,79	5,36	2,90

11. РАСЧЕТ ВЗРЫВА УГАРНОГО ГАЗА (СО) В ДУТЬЕВОМ КОЛЛЕКТОРЕ ВАГРАНКИ

Одной из типичных аварийных ситуаций в чугуно-литейных цехах является ситуация с нарушением требований безопасности и технологических инструкций при работе на вагранках. Из-за неправильных действий персонала в период пуска вагранки или при остановке (выключении дутья) плавки в вагранке возможно попадание оксида углерода (СО) в дутьевой коллектор и подводящие к нему воздуховоды. Это явление может произойти, если дутье (подача воздуха) выключено, крышки фурменных коробок закрыты. При неполном сгорании кокса образуется горючий газ (СО), который при смешивании с воздухом образует взрывоопасную смесь, способную воспламениться от искры или высокотемпературных газов. При наихудшем варианте развития аварии может произойти следующее:

- весь объем коллектора заполняется горючей газозвушной смесью;
- объемная концентрация СО достигает 20 %;
- в фурменную коробку попадает искра, приводящая к мгновенному воспламенению – взрыву в объеме коллектора и воздуховодов;
- взрыв вызывает разрушение воздушного коллектора и распространение ударной волны в окружающем пространстве.

Расчет избыточного давления, возникающего при сгорании газозвушных смесей в замкнутом пространстве, выполняется по формуле:

$$\Delta P = (P_{\max} - P_0) \frac{M_{\Gamma} \cdot Z}{V_{\text{СВ}} \cdot \rho_{\text{ГП}}} \cdot \frac{100}{K_{\text{Н}} \cdot C_{\text{СТ}}}, \quad (56)$$

где P_{\max} – максимальное давление в месте взрыва стехиометрической газозвушной смеси в замкнутом объеме, определяемое экспериментально или по справочным данным, принимаем $P_{\max} = 900$ кПа;

P_0 – начальное давление, кПа, в первом приближении может быть принято равным атмосферному: $P_0 = 101,3$ кПа;

M_{Γ} – масса горючего газа, находящегося в рассматриваемом объеме, кг;

Z – коэффициент участия паров во взрыве, $Z = 0,5$ [8, табл. А.1];

$V_{\text{СВ}}$ – объем рассматриваемого замкнутого пространства (в нашем случае – дутьевого коллектора вагранки), м³;

K_H – коэффициент, учитывающий негерметичность пространства и неадиабатичность процесса горения газовой смеси, принимаем $K_H = 3$;

$\rho_{ГП}$ – плотность газа при расчетной температуре t_p , кг/м³, вычисляемая по формуле:

$$\rho_{ГП} = \frac{\mu}{V_0 \cdot (1 + t_p) / 273}, \quad (57)$$

где μ – молярная масса горючего газа, 28,01 кг/кмоль;

V_0 – молярный объем газовой смеси, равный 22,413 м³/кмоль;

t_p – расчетная температура, °С, за расчетную температуру следует принимать температуру воздуха в данном замкнутом пространстве, условно может быть принято $t_p = 20$ °С;

$C_{СТ}$ – стехиометрическая концентрация горючих газов, %, в рассматриваемом объеме, вычисляемая по формуле:

$$C_{СТ} = \frac{100}{1 + 4,84\beta}, \quad (58)$$

где β – стехиометрический коэффициент кислорода в реакции сгорания газовой смеси:

$$\beta = n_C + \frac{n_H + n_X}{4} - \frac{n_O}{2}, \quad (59)$$

где n_C , n_H , n_X , n_O – число атомов углерода, водорода, галоидов и кислорода в молекуле горючего вещества.

Для расчета избыточного давления во фронте ударной волны за пределами дутьевого коллектора необходимо найти приведенную массу горючих газов, кг, которая в данном случае рассчитывается по формуле:

$$M_{ГП} = M_G \cdot Z \cdot \frac{Q_H}{Q_0}, \quad (60)$$

где M_G – масса горючих газов, поступивших в замкнутый объем, кг;

Z – коэффициент участия горючих газов во взрыве, который принимаем равным 0,1;

Q_H – удельная теплота сгорания горючего газа (СО), 12630 кДж/кг;

Q_0 – константа, равная 4520 кДж/кг (удельная энергия взрыва тринитротолуола).

Порядок выполнения расчета.

Дутьевой коллектор вагранки имеет форму кольца с внутренним диаметром $d_{\text{внутр}}$ м, внешним диаметром $d_{\text{внеш}}$ м и высотой h м (см. исходные данные).

Внутренний объем дутьевого коллектора будет равен:

$$V_{\text{колл.}} = \pi(r_{\text{внеш.}} - r_{\text{внутр.}})^2 \cdot h, \text{ м}^3.$$

Масса угарного газа (СО), кг, заполнившего объем коллектора при концентрации газа 20 % и плотности $\rho_{\Gamma} = 1,25 \text{ кг/м}^3$:

$$M_{\Gamma} = V_{\text{СВ}} \cdot 0,2 \cdot \rho_{\Gamma}, \text{ кг};$$

Находим плотность газа $\rho_{\text{ГП}}$, кг/м³ при расчетной температуре $t_p = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ (293 К) по формуле (57):

$$\rho_{\text{ГП}} = \frac{\mu}{V_0 \cdot (1 + t_p) / 273}, \text{ кг/м}^3.$$

Стехиометрический коэффициент кислорода в реакции сгорания рассчитаем по формуле (59), при этом для газа СО $n_C = 1$, $n_H = 0$, $n_X = 0$, $n_0 = 1$:

$$\beta = n_C + \frac{n_H + n_X}{4} - \frac{n_0}{2}.$$

Стехиометрическая концентрация газа, %, в объеме коллектора по формуле (58):

$$C_{\text{СТ}} = \frac{100}{1 + 4,84\beta}.$$

Избыточное давление ΔP , кПа, развиваемое при сгорании угарного газа в замкнутом объеме по формуле (56):

$$\Delta P = (P_{\max} - P_0) \frac{M_{\Gamma} \cdot Z}{V_{\text{СВ}} \cdot \rho_{\Gamma\Pi}} \cdot \frac{100}{K_{\text{Н}} \cdot C_{\text{СТ}}}, \text{ кПа.}$$

Приведенную массу угарного газа определим по формуле (60):

$$M_{\text{ПР}} = M_{\Gamma} \cdot Z \cdot \frac{Q_{\text{Н}}}{Q_0}, \text{ кг.}$$

По данным табл. 16, определяем последствия, вызванные взрывом угарного газа.

Таблица 16

Типичные предельно допустимые значения избыточного давления с точки зрения повреждения зданий и конструкций

Степень поражения	Типичные предельно допустимые значения избыточного давления, 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

Если ΔP не превышает 53 кПа – взрыв произойдет внутри коллектора без его разрушения и, соответственно, без последствий для окружающих. В противном случае – ударная волна распространится за пределы коллектора и вероятны повреждения конструкций и поражение персонала.

Далее, используя формулу (28), с помощью программного продукта Microsoft Excel необходимо произвести расчеты давлений во фронте

УВ с шагом удаления 50–100 мм от эпицентра взрыва для определения расстояний пороговых давлений и, соответственно, радиусов зон поражения персонала, повреждения оборудования, внутрицеховых конструкций и остекления свободно распространяющейся ударной волной. Результаты предельных значений УВ сводят в таблицу, а графическое изображение зон поражения персонала и зон повреждения строительных конструкций цеха наносится на планировку ОПО.

Пример графического изображения расчетных зон действия ударной волны при взрыве в индукционных печах представлен на рис. 11.

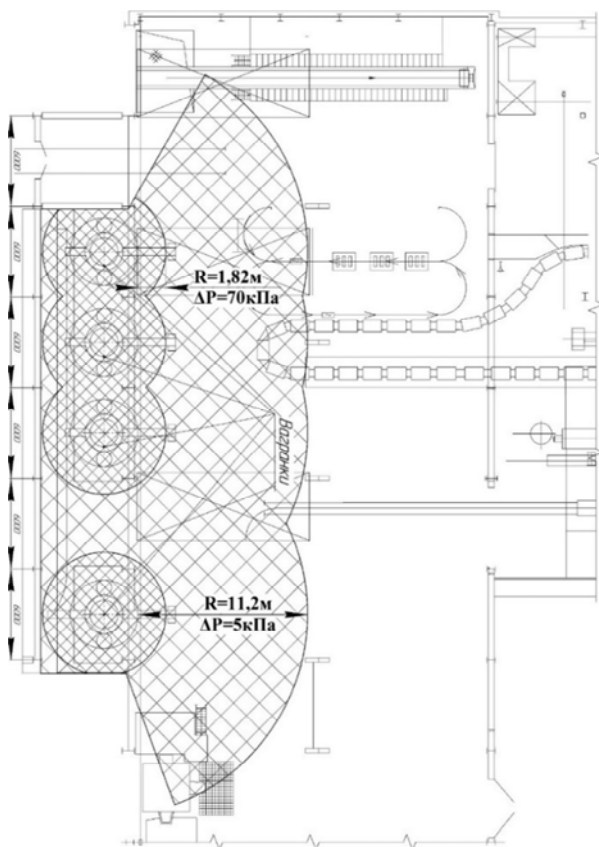


Рис. 11. Пример нанесения зоны возможного поражения персонала ударной волной при взрыве угарного газа в дутьевом коллекторе вагранки на планировку ОПО

12. РАСЧЕТ ФИЗИЧЕСКОГО ВЗРЫВА В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРОЛИВА РАСПЛАВА НА ВЛАЖНЫЙ, ГРЯЗНЫЙ ПОЛ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ

При транспортировке разливочного ковша существует вероятность пролива расплава на влажный пол в результате повреждения футеровки или опрокидывания ковша с последующим физическим взрывом в соответствии с моделью взрыва резервуара с перегретой водой (BLEVE, см. п. 9). Следствием взрыва, его основными поражающими факторами являются ударная волна и разлетающиеся частицы металла и шлака массой от 1–2 до нескольких десятков грамм.

Расчет аналогичен с расчетом физического взрыва в результате попадания воды в плавильную печь с жидким металлом.

По формуле (32) определяем количество теплоты, требуемое для нагрева воды до температуры кипения:

$$Q = c \cdot m \cdot (T_{\text{кип}} - T_0), \text{ кДж.}$$

Площадь поверхности нагрева принимаем равной площади лужи на полу:

$$F = \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \text{ м}^2,$$

где D – диаметр лужи на полу, $D = n/10$ (n – последняя цифра варианта задания).

Время, необходимое для нагрева заданного объема воды по формуле (33):

$$\tau = \frac{Q}{\alpha \cdot F \cdot (T_1 - T_0)}, \text{ с.}$$

Толщину стенки образовавшегося резервуара – затвердевшей корки металла определим по формуле (34), приняв коэффициент пропорциональности $k = 0,051 \frac{\text{см}}{\text{с}^{1/2}}$, в соответствии с условиями затвердевания расплава при высокой скорости теплоотвода:

$$x = k \cdot \sqrt{\tau}, \text{ см.}$$

Максимальное избыточное внутреннее давление, которое выдержит образовавшийся резервуар с водой, определим по формуле [16]:

$$P_{\text{изб}} = \left(\frac{s_1 - c}{K \cdot K_0 \cdot D_p} \right)^2 \cdot \sigma \cdot \varphi = \left(\frac{x}{K \cdot D} \right)^2 \cdot \sigma, \text{ МПа},$$

где $K_0 = 1$ [17, п. 7.25];

$K = 0,5$ [17, табл. 4];

$s_1 - c$ – толщина стенки резервуара, мм;

$\varphi = 1$;

σ – допускаемое напряжение, равное $7,85 \cdot 10^4$ МПа.

По справочнику определяем удельную энтальпию насыщенного водяного пара $h_{\text{в}}$ при температуре 1000 °С и давлении $P_{\text{изб}}$ [16].

Определим вероятность возникновения взрыва BLEVE по формуле (27):

$$\delta = \frac{h_{\text{в}} - h_{\text{вН}}}{r_{\text{ИСП}}}.$$

Приведенная масса перегретой воды в тротиловом эквиваленте по формуле (29):

$$M_{\text{ПР}} = m \frac{h_{\text{в}} - h_{\text{вН}}}{Q_0}, \text{ кг}.$$

Избыточное давление ударной волны (ΔP) на стенки сосуда, внутренний диаметр которого равен диаметру лужи D , найдем из выражения (28):

$$\Delta P = P_0 \left(0,8 \frac{M_{\text{ПР}}^{0,33}}{r} + 3 \frac{M_{\text{ПР}}^{0,66}}{r^2} + 5 \frac{M_{\text{ПР}}}{r^3} \right), \text{ кПа}.$$

Используя формулу (28), с помощью программного продукта Microsoft Excel производится расчет давлений во фронте УВ с шагом удаления 50–100 мм от эпицентра взрыва для определения расстояний пороговых давлений и, соответственно, радиусов зон поражения персонала, повреждения оборудования, внутрицеховых конструкций и остекления свободно распространяющейся ударной

волной. Результаты предельных значений УВ сведите в таблицу, графические изображение зон поражения персонала и зон повреждения строительных конструкций наносится на планировку ОПО (см. пример на рис. 12).

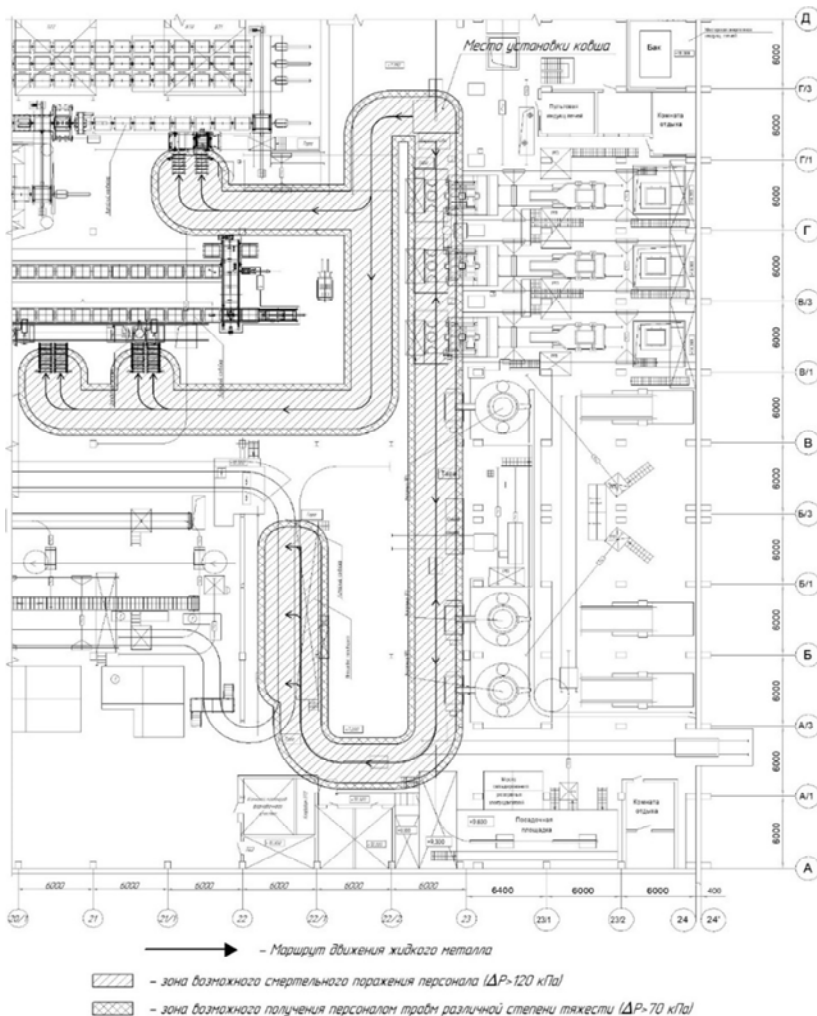


Рис. 12. Пример нанесения на планировку ОПО зоны возможного поражения персонала ударной волной при проливе металла на влажный грязный пол при транспортировании

13. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Пояснительная записка курсового проекта должна включать следующие разделы:

1. Титульный лист.
2. Задание к курсовому проекту.
3. Содержание.
4. Введение.

5. Описание принятого к расчету, в соответствии с заданием на курсовой проект, опасного производственного объекта (ОПО).

6. Анализ риска возникновения аварийных ситуаций на заданном ОПО.

7. Расчет параметров и вероятных зон действия поражающих факторов аварий.

8. Оценка риска аварий, возможного числа пострадавших и материального ущерба.

9. Заключение.

10. Список использованных источников.

Графическая часть курсового проекта должна включать следующие документы:

1. Графическое изображение возможных вариантов развития аварии.

2. Графическое изображение зон поражения персонала, повреждения конструкций и разлета осколков в результате возникновения аварийной ситуации (для каждой аварийной ситуации).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закон Республики Беларусь «О промышленной безопасности» от 05.01.2016 г. № 354-З.
2. Порядок разработки декларации безопасности производственных объектов Республики Беларусь (Приказ комитета по надзору за безопасным ведением работ в промышленности и атомной энергетике при министерстве по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 11.05.1998 г. № 44).
3. Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах» (Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ от 11.04.2016 г. № 144).
4. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 335 с.
5. Акимов, В. А. Надежность технических систем и техногенный риск / В. А. Акимов [и др.]. – М. : Деловой экспресс, 2002. – 367 с.
6. Рябинин, И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И. А. Рябинин. – СПб. : Политехника, 2000. – 248 с.
7. Надежность технических систем : справочник / под ред. И. А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – 608 с.
8. Белов, С. В. Безопасность жизнедеятельности / С. В. Белов [и др.]. – 7 изд. – М. : Высшая школа, 2007. – 616 с.
9. ГОСТ Р 12.3.047-2012 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.
10. Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий (утв. ФГУ ВНИИПО МЧС России 17.03.2006 г).
11. РБ Г-05-039-96 Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия. Утв. Пост. Госатомнадзора РФ 31.12.1996, № 100.
12. ГССД 187-99 – Государственная система стандартных справочных данных. Госстандарт РФ, 1999 г.
13. Сивухин, Д. В. Общий курс физики : учебное пособие : в 5 т. Т 2. Термодинамика и молекулярная физика. – 5-е изд., испр. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 544 с.

14. Яворский, Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, А. К. Лебедев. – Изд. 4-е. – М. : Оникс, 2006. – 1056 с.

15. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – Изд. 2-е. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.

16. ГОСТ Р 52857.2-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек.

17. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (утв. Приказом МЧС РФ от 10.07.2009 № 404).

Учебное издание

КОРЕНЮГИН Сергей Владимирович
РОВИН Сергей Леонидович

ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ КОНТРОЛЬ

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности
1-36 02 01 «Машины и технология литейного производства»

Редактор *А. В. Кочемарова*
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 13.03.2023. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 4,67. Уч.-изд. л. 4,22. Тираж 100. Заказ 689.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.