

Анализ опасностей при разработке декларации безопасности

А.А. АГАПОВ, М.В. ЛИСАНОВ, С.М. ЛЫКОВ, А.С. ПЕЧЕРКИН (НТЦ "Промышленная безопасность"), В.И. ФУРСЕНКО (АО ММК "МИКОМС")

Идентификация опасностей

Цель идентификации опасностей — выявление ситуаций и событий, способных быть источниками и причинами возникновения крупных аварий. Она включает следующие этапы:

- анализ аварий с участием аммиака;
- предварительный анализ опасностей;

изучение опасности и работоспособности (hazard and operability study — HAZOP) технологической системы цеха холодильно-компрессорных машин и установок (ЦКУ).

Анализ аварий с участием аммиака. Зарубежные литературные данные и сведения Госгортехнадзора России показывают, что аварии на объектах, содержащих большие количества аммиака, связаны в основном с его выбросом и проливом, разгерметизацией технологического оборудования, загазованностью помещений и территории объекта, последующим токсическим поражением людей парами аммиака. На практике не за-

фиксировано взрывов при выбросах аммиака, даже в случаях присутствия источников воспламенения (открытого огня).

При разливах больших количеств сжиженного аммиака жидкость испаряется и образуются облака. Однако вследствие того, что процессы теплообмена жидкого аммиака с окружающей средой, формирования приземного облака и его рассеяния в атмосфере протекают сравнительно медленно, времени для применения средств индивидуальной защиты и самостоятельного выхода и эвакуации людей из загазованной зоны оказывается достаточно. Как показывают практические данные, облака аммиака с поражающей концентрацией не распространяются на расстояние более нескольких сот метров. Максимальное расстояние, на котором зафиксировано смертельное воздействие на людей при авариях с выбросом аммиака, составляет 200 м.

Таблица 1

Индекс Т	Характеристика возможных последствий
4	Отклонение может привести к выбросу более 10 т аммиака. Среди персонала, населения могут быть жертвы; есть необходимость эвакуации населения; окружающая среда получит значительный ущерб; объект — полное разрушение, остановка производства может быть более 3 мес
3	Отклонение может привести к выбросу более 5 т аммиака. Персонал — травмы; население — возможность эвакуации; окружающая среда — восполнимый ущерб; материальные объекты — разрушения, остановка производства более 10 сут
2	Отклонение может привести к выбросу более 100 кг аммиака. Персонал может получить незначительные травмы; население — опасности нет; окружающая среда — ущерба нет; остановка производства более суток
1	Отклонение может привести к выбросу менее 100 кг аммиака, персоналу, населению, окружающей среде — опасность не угрожает; остановка производства менее суток

Предварительный анализ опасностей. Предварительный анализ опасностей включал выявление элементов, установок, технологических блоков промышленного объекта, в которых используются опасные вещества. Основные критерии опасности на данном этапе — наличие и характер распределения в установках опасного вещества — аммиака.

Наибольшее количество аммиака содержится в трех линейных ресиверах (каждый в рабочем режиме содержит по 2,6 т аммиака) конденсаторного узла, восьми циркуляционных ресиверах (от 2 до 3,3 т) аппаратного отделения испарительной системы и шести ресиверах (от 1 до 3,3 т) аммиакохранилища — общее количество аммиака во всех ресиверах системы около 50 т. В трубопроводах и остальных аппаратах ЦКУ содержится около 15 т аммиака. Объем аммиака в надземных трубопроводах, соединяющих ЦКУ с потребителями холода, составляет 13 м³, а общая масса — около 9 т, всего в холодильной системе АО «МИКОМС» — около 130 т аммиака.

В результате предварительного анализа определены технологические блоки, представляющие

Таблица 2

Индекс В	Категория вероятности	Уровень частоты, 1/год
4	Высокая	>1
3	Средняя	10 ⁻³ — 1
2	Низкая	10 ⁻⁵ — 10 ⁻³
1	Маловероятная	<10 ⁻⁵

наибольшую опасность в случае аварии, — ресиверы и соединяющие трубопроводы.

Изучение опасности и работоспособности.

Методом изучения опасности и работоспособности исследовалось влияние отклонений технологических параметров (температуры, давления и др.) от регламентных режимов с точки зрения возникновения опасности.

При характеристике отклонения параметров для формализации отчета и полноты исследования использовались следующие ключевые слова:

НЕТ — отсутствие прямой подачи вещества, когда она должна быть;

БОЛЬШЕ (МЕНЬШЕ) — увеличение (уменьшение) значений режимных переменных (температуры, давления, потока) по сравнению с заданными;

ТАК ЖЕ, КАК — появление дополнительных компонентов (воздух, вода, примеси);

ДРУГОЙ — состояние, отличающееся от обычной работы установки (пуск, остановка, повышение производительности и т.д.);

ИНАЧЕ ЧЕМ — полное замещение процесса, непредвиденное событие;

ОБРАТНЫЙ — логическая противоположность замыслу, появление обратного потока вещества.

Для ранжирования опасностей отклонений технологического параметра от регламентного режима использовалось понятие критичности. Опасность характеризовалась индексом критичности отклонения K , равным сумме двух составляющих — вероятности (частоты) B и тяжести T последствий каждого отклонения.

Критерии оценки B и T представлены в таблицах 1 и 2. Вероятность возникновения каждого отклонения оценивалась на основании учета мнения специалистов ЦКУ и данных о надежности оборудования. Тяжесть последствий — по оценке величины максимально возможных выбросов аммиака при разгерметизации рассматриваемого элемента оборудования. Как видно из таблиц, показатель критичности K варьируется от двух (наиболее безопасные) до восьми (наиболее опасные условия эксплуатации).

Ключевое слово	Отклонение	Причины	Последствия	В	Т	К	Средства контроля
Нет	Нет потока вещества	Разрыв трубопровода	Выброс аммиака	2	4	6	Манометры, система аварийной сигнализации
		Отказ в системе з/питания	Опасности нет	1	1	2	Система резервирования
Больше	Повышение давления нагнетания компрессора	Закрит нагнетательный вентиль	Разрушение компрессора и выброс аммиака	1	2	3	Реле давления и блокировки, перепускной, предохранительный и обратные клапаны
		Отсутствует или недостаточная подача воды на конденсатор	То же	1	2	3	То же
		Наличие большого количества воздуха в конденсаторе	Образование взрывоопасной смеси	1	3	4	— " —
		Повышение температуры нагнетательного компрессора	Нет протока воды через охлаждаемую рубашку компрессора	Разрушение компрессора с выбросом аммиака	1	2	3
		Чрезмерный перегрев паров аммиака на всасывании	То же	1	2	3	То же
Меньше	Понижение давления всасывания	Повышенная подача компрессора	Опасности нет	1	1	2	Реле давления

В табл. 3 приведены результаты исследования компрессорного узла методом изучения опасности и работоспособности (полный объем представления результатов в декларации примерно в 5 раз больше). Анализ полученных результатов показал, что наиболее опасны по сумме показателей критичности следующие ситуации:

разрушение (разгерметизация) ресиверов объемом от 3,5 до 12,5 м³, $K = 6$;

разрушение трубопроводов с жидким и двухфазным потоком аммиака (диаметр 200-300 мм, протяженность до 80 м), $K = 6$;

неполадки в процессе заправки (слива) холодильной системы, $K = 5$;

повышение температуры нагнетания (выше 150 °С), что может привести к увеличению давления и разрушению компрессора, $K = 5$;

снижение температуры нагнетания (ниже 40 °С), что может привести к гидравлическому удару и разрушению компрессора, $K = 5$.

Изучение опасности и работоспособности позволило проранжировать опасные ситуации и

наметить сценарии развития наиболее крупных аварий.

Сценарии развития наиболее крупных промышленных аварий

Исходные предположения. При определении сценариев крупной аварии рассматривались ситуации и причины утечек значительных количеств аммиака (более 500 кг), рассчитывалось количество выброса аммиака, исследовался характер его распространения и токсического поражения людей. Риск взрыва и пожара при авариях с аммиаком не рассматривался в связи с отсутствием таких случаев на практике и малой вероятностью образования взрывоопасной смеси паров аммиака с воздухом при одновременном возникновении высокотемпературного источника воспламенения.

При количественной оценке массы выброса аммиака предполагали полное разрушение каждого ресивера или трубопровода, при этом учитывалась масса жидкого аммиака, поступающего в аварийный блок от смежных аппаратов за время перекрытия запорной арматуры (300 с со-

гласно Общим правилам взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств). Учитывая низкую плотность паров аммиака, прецедентами вкладом газовой фазы смежных блоков.

Основные аварийные ситуации, приводящие к выбросу аммиака, следующие: разгерметизация линейных и циркуляционных ресиверов, аммиачных трубопроводов; неполадки при заправке (сливе) аммиака в систему. Причинами возникновения этих ситуаций могут быть износ оборудования, неправильные действия персонала и внешние воздействия (включая диверсии).

Оценка вероятности аварийных ситуаций. При оценке вероятностей возможных аварийных ситуаций использованы основные результаты и рекомендации специальной работы по анализу риска АОЗТ "Москворецкое". Представленные величины следует воспринимать как консервативные (максимально возможные) оценки, соответствующие полной разгерметизации и разрушению технологического оборудования.

Оценка частоты аварии с разгерметизацией ресивера. Разгерметизация ресивера происходит при разгерметизации его фланцевых соединений или разрушении корпуса сосуда вследствие коррозии. Согласно паспортным данным по надежности сосудов под давлением вероятность разгерметизации корпуса ресивера не более 10^{-5} в год. Частота разгерметизации одного фланцевого соединения — около $4 \cdot 10^{-5}$ в год. Учитывая число ресиверов (20) и фланцевых соединений (60), вероятность аварийной разгерметизации хотя бы одного ресивера системы составляет $2,6 \cdot 10^{-3}$ в год.

Оценка частоты разгерметизации трубопроводов. Наибольшую опасность представляют участки шести надземных трубопроводов (от ЦКУ до холодильника) диаметром 100—300 мм и общей длиной 120 м, а также участок трубопровода (до колбасного завода) диаметром 250 мм и длиной 40 м. Масса циркулирующего в них аммиака около 1 т на каждом участке. К основным типам разгерметизации (катастрофическим отказам) технологических трубопроводов следует отнести образование протяженных трещин и разрывов с эквивалентным диаметром более 10 мм. Вероятность такой разгерметизации трубопровода составляет в среднем $2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. Частота аварии трубопроводной системы с учетом этого составит $(120+40)2 \cdot 10^{-6} = 3,2 \cdot 10^{-4}$ в год.

Оценка частоты неполадок системы заправки холодильной системы. В АО "МИКОМС" аммиак

сливают из железнодорожной цистерны вместимостью 30 т не чаще 2 раз в год. Наиболее характерные аварии при таких операциях — разгерметизация, отрыв соединительных рукавов и шлангов. Вероятность такого события составляет менее 10^{-5} на одну заправку, поэтому частоту разгерметизации цистерны при сливе можно оценить величиной не более $2 \cdot 10^{-5}$ в год.

Суммарная оценка вероятности аварии. Вероятность аварии оценивалась при условии независимости источников опасности. С учетом выполненных выше вероятностных оценок разрушения ресивера ($2,6 \cdot 10^{-3}$), трубопроводов с аммиаком ($3,2 \cdot 10^{-4}$) и риска заправки системы аммиаком ($2,0 \cdot 10^{-5}$), вероятность крупной аварии и уровень индивидуального риска персонала составляют не более $2,9 \cdot 10^{-3}$ в год. Эта величина соответствует среднему периоду безаварийной эксплуатации объекта (350 лет) и близка к существующему уровню риска аварий на химически опасных предприятиях.

Для более точных оценок риска необходима более обширная информация по отечественной статистике разгерметизации трубопроводов и аппаратов в условиях эксплуатации аммиачных холодильных систем.

Оценка тяжести последствий возможных аварий

Сценарии развития аварийных ситуаций. На основании результатов описанных выше исследований предложено шесть сценариев аварий, для которых определены количества высвободившегося из технологических систем аммиака.

Сценарий 1. Разрушение ресиверов аппаратного отделения испарительной системы ЦКУ. Наиболее крупные резервуары в аппаратном отделении — четыре циркуляционных ресивера 12,5РЦЗ, предназначенные для работы при температурах -15 и -30°C . При разрушении одного из ресиверов выделяется аммиак, содержащийся в разрушенном ресивере (3 т); поступающий из соседнего ресивера 12,5РВЦ через два трубопровода $D_y=100$ мм, через трубопровод $D_y=25$ мм и системы распределения. Расчеты показали, что количество аммиака, выделившегося из одного ресивера за время перекрытия арматуры (300 с), составляет 6,5 т. Аналогичные расчеты для случаев разгерметизации трубопроводов и других ресиверов аппаратного отделения дают меньшие значения выделившейся массы аммиака.

Сценарий 2. Разрушение ресиверов конденсаторного узла. При разрушении одного из трех линейных ресиверов (вместимость 8 м^3) конденсаторного узла количество выделившегося аммиака

Параметр	Номер сценария				
	1	2	3	4	5
Объект	Циркуляционный ресивер	Линейный ресивер	Хранилище	Слив ж.-д. цистерны	Трубопровод
Количество аммиака, т	6,5	8,8	11,0	30,0	7,0
Глубина зоны заражения, км (по методике ГО)	1,9	2,6	2,9	5,2	2,2
Площадь зоны фактического заражения, км ² (по методике ГО)	0,40	0,68	0,84	2,61	0,42
Длина зоны пороговых поражений, км (по программе ТОКСИ)	0,44	0,52	0,59	1,20	0,40
Ширина зоны пороговых поражений, м (по программе ТОКСИ)	21,0	28,0	30,0	56,0	26,0
Длина зоны смертельных поражений, км (по программе ТОКСИ)	0,06	0,09	0,11	0,26	0,09
Ширина зоны смертельных поражений, м (по программе ТОКСИ)	8,0	10,0	12,0	16,0	12,0

ка определяется его массой в самом ресивере (2,6 т), потоками жидкой фазы из конденсатора через два трубопровода $D_y = 125$ мм и из двух смежных ресиверов через трубопровод $D_y = 100$ мм. Общая масса жидкого аммиака, выделившегося при разгерметизации ресивера, составляет 8,8 т.

Сценарий 3. Разрушение ресивера аммиакохранилища. При разрушении одного из шести линейных ресиверов количество выделившегося аммиака определяется массой его в ресивере, потоками жидкой фазы через трубопровод $D_y = 50$ мм и паров через трубопроводы $D_y = 30$ мм из смежных ресиверов с общей массой аммиака. За время перекрытия арматуры, равное 300 с, при скорости потока 10 м/с общая масса аммиака, выделившегося через трубопровод, составит величину, сравнимую с общим количеством аммиака в хранилище (11 т).

Сценарий 4. Выброс аммиака при заправке (сливе) его из технологической системы. Аварийные ситуации при сливе аммиака из цистерны связаны с отсоединением (отрывом) гибкого рукава от цистерны или трубопровода. Учитывая массу аммиака в цистерне (не менее 30 т), диаметр сливного отверстия ($D_y = 50$ мм) и время перекрытия сливного трубопровода, получим расчетную массу разлитого аммиака не более 6 т. Нельзя также исключить вариант полного разлития 30 т аммиака, которое может произойти в результате разрушения цистерны, например в случае диверсии.

Сценарий 5. Разрушение трубопроводов. Наибольшая масса аммиака находится в парожидкостных трубопроводах, соединяющих ЦКУ с холодильником. Максимальная масса жидкого аммиака на участке трубопровода длиной 20 м, диаметром $D_y = 300$ мм составляет около 1 т. Вследствие работы циркуляционных насосов дополнительно выльется содержимое двух циркуляционных ресиверов — около 6 т. Общая масса выделившегося жидкого аммиака составит около 7 т.

Сценарий 6. Выброс аммиака при авариях в помещении аппаратной. В оборудовании аппаратного отделения ЦКУ находится 23,5 т аммиака. Как показано выше, разгерметизация ресиверов, компрессоров и трубопроводов в аппаратном отделении компрессорного цеха может привести к выбросу 6,5 т жидкого аммиака. В первый момент (в течение 2—5 с) в виде пара может выделиться около 10 % всей массы — 650 кг. Остальное количество разлитого аммиака испаряется в течение 10–30 мин. Максимальная объемная доля аммиака в цехе (с учетом объема помещения аппаратной — 3360 м³) составит $650/0,77 \times 3360 = 25$ %. При этом (как показывают расчеты) произойдет полное поражение людей, находящихся в помещении более 10 с и сделавших несколько вдохов. Во многом токсический эффект поражения при разлитии аммиака определяется правильностью действий персонала, временем включения аварийной вентиляции и кратнос-

тью воздухообмена. После включения аварийной вентиляции концентрация аммиака в помещении начнет уменьшаться и при кратности воздухообмена, равной 10, через 50 мин концентрация аммиака в помещении не будет представлять угрозы смертельного токсического поражения. Авария в помещении ЦКУ опасна только для персонала цеха. Риск поражения людей во многом зависит от степени их подготовки к действиям в аварийных ситуациях и наличия средств индивидуальной защиты.

Определение зон поражения. Так как методика ГО не позволяет проанализировать зону возможных смертельных поражений, то для таких оценок дополнительно использовалась программа ТОКСИ. Результаты расчета зон заражения по методике ГО и зон поражения по программе ТОКСИ приведены в табл. 4. Различия в представленных результатах расчетов объясняются разной точностью использованных методик и более эмпирическим характером методики ГО, дающей завышенные оценки. В расчетах использовались наиболее консервативные исходные данные: температура окружающей среды 20 °С, скорость ветра 1 м/с, толщина слоя разлитого аммиака 0,05 м, состояние атмосферы — инверсия, топоусловия — городская застройка, время токсического воздействия — 30 мин. Форма зоны поражения для методики ГО — полуокружность, для ТОКСИ — неправильный эллипс.

Глубина зоны заражения по методике ГО при авариях с выбросом 6,5—30 т составляет 2,1—5,2 км. Размеры зон заражения превышают границы территории АО «МИКОМС». При наиболее крупной аварии с разрушением цистерны в зоне фактического заражения (т.е. в зоне, где человек может почувствовать запах аммиака) площадью 2,61 км² окажется территория региона, на которой проживает около 25—35 тыс. чел. (плотность населения 10—12 тыс. чел/м²).

Согласно результатам расчета по программе ТОКСИ длина зон пороговых и смертельных поражений составляет 0,44—1,2 и 0,06—0,26 км соответственно. В случае аварии при разрушении аммиакохранилища (сценарий 3) или крупной утечке жидкого аммиака при сливе из железнодорожной цистерны (сценарий 4) в зоне смертельного поражения находятся следующие объекты: ЦКУ (полностью), частично — холодильник, колбасный завод, дефростер. Общее число персонала на этих объектах в одну смену — 1700 чел. Наиболее неблагоприятное направление ветра в случае такой аварии — восточное (преобладающее направление ветра в Москве — западное). В

этом случае в зоне смертельного поражения площадью 0,08 га могут оказаться от 20 до 500 чел.

Полученные оценки зон поражения и числа пострадавших следует рассматривать как завышенные вследствие выбора наиболее неблагоприятных условий развития аварии. Так, предполагалось полное разрушение оборудования, время токсического воздействия принималось равным 30 мин (для аммиака, имеющего резкий запах, эта величина, вероятно, завышена в несколько раз), не учитывался защитный эффект зданий для персонала, а также меньшее число его в ночной смене (при аварии в дневное время размеры зоны поражения уменьшаются в 2—4 раза). Однако даже в этом случае размеры зоны смертельных поражений не превышают границ санитарно-защитной зоны АО «МИКОМС». Отсюда можно сделать вывод, что риск массовых смертельных поражений населения региона при аварийных выбросах аммиака невелик.

Основной экономический ущерб от аварии будет связан с гибелью персонала, выплатой компенсаций пострадавшим, разрушением оборудования, потерей продукции и остановкой производства с соответствующими упущенными экономическими выгодами.

В качестве мер по уменьшению риска рекомендуется рассмотреть вопрос о применении быстродействующей запорной арматуры на участках аммиачных трубопроводов.

При анализе опасностей холодильной системы АО «МИКОМС», выполненном в рамках декларирования безопасности:

представлены результаты анализа крупных аварий на объекте, сопровождающихся выбросом аммиака;

проведен анализ критичности отклонений технологических параметров эксплуатации холодильных установок с помощью метода изучения опасностей и работоспособности (HAZOP). Основные сценарии развития аварии на объекте АО «МИКОМС» связаны с утечкой аммиака и токсическим поражением людей при разгерметизации ресиверов и трубопроводов холодильной системы;

выполнен количественный анализ последствий аварии, включающий определение зон поражения и числа пострадавших при различных сценариях аварии. Показано, что риск поражения населения при аварийном выбросе аммиака на АО «МИКОМС» незначителен;

оценена вероятность аварийной разгерметизации оборудования. Суммарное значение риска крупных выбросов аммиака соответствует одной аварии за 350 лет.