

Обеспечение пожарной безопасности жидкого аммиака при хранении и транспортировке в промышленных масштабах

Леонид Петрович Вогман ✉, Иван Ардашевич Болодьян, Евгений Николаевич Простов

Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В связи с решением задач в области водородной безопасности в качестве приоритетных способов крупнотоннажной транспортировки водорода рассматривается транспортировка трубопроводным транспортом, различными видами транспорта в сжиженном или компримированном состоянии носителей водорода в виде аммиака или жидких органических носителей. Носителями могут служить также гидриды металлов, наноструктуры и другие богатые водородом соединения. В качестве наиболее эффективных и водородоемких носителей водорода рассматривается аммиак.

Цель. Обеспечение пожарной безопасности при хранении и транспортировке жидкого аммиака.

Задачи. Анализ промышленных средств и способов хранения и транспортировки жидкого аммиака, разработка мероприятий по локализации крупных аварий, тушению пожаров, вызванных выбросами паров аммиака и его проливов в виде криогенной жидкости.

Аналитическая часть. При выбросе аммиака из оборудования под давлением образующаяся смесь продукта с воздухом может изменяться по плотности от образования газозвушных облаков ниже плотности воздуха до плавучести и превышения плотности воздуха в зависимости от условий выброса: давление и температура в оборудовании; размеры отверстия, через которое поступает аммиак в окружающее пространство; расположение отверстия в оборудовании. При утечке жидкого аммиака образуются проливы, с поверхности которых продукт испаряется благодаря градиенту температур, когда он высок, особенно бурно в первые моменты после пролива. Расчетные и опытные данные свидетельствуют, что при проливах жидкого аммиака наиболее опасной является зона радиусом вокруг источника до нескольких сотен метров. На испарение расходуется тепло верхнего слоя почвы (подстилающей поверхности) и окружающего воздуха, причем в большей степени в начальный период это зависит от природы подстилающей поверхности.

Заключение. Локализация и ликвидация выбросов под давлением и проливов аммиака могут быть достигнуты благодаря применению следующих способов: ускорения испарения воздушными струями; уменьшения поверхности испарения аммиака с использованием прямиков, поддонов, сливов в аварийные емкости; растворения в воде и применения водяных завес; нанесения водно-пенных составов для полярных жидкостей, устойчивых к разрушению.

Ключевые слова: аммиак; хранение; транспортирование; предотвращение проливов; тушение

Для цитирования: Вогман Л.П., Болодьян И.А., Простов Е.Н. Обеспечение пожарной безопасности жидкого аммиака при хранении и транспортировке в промышленных масштабах // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 2. С. 32–41. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.02.32-41

✉ Вогман Леонид Петрович, e-mail: vogmanleo@ya.ru

Ensuring fire safety of liquid ammonia during storage and transportation on an industrial scale

Leonid P. Vogman ✉, Ivan A. Bolodian, Evgeny N. Prostov

All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow region, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In connection with the solution of problems in the field of hydrogen safety as priority methods of large-tonnage hydrogen transportation is considered the transportation of hydrogen carriers in the form of ammonia or liquid organic carriers by pipelines, various types of transport in liquefied or compressed state.

Metal hydrides, nanostructures and other hydrogen-rich compounds can also serve as carriers. Ammonia is considered as the most efficient and hydrogen-intensive hydrogen carriers.

Aim. To ensure fire safety during storage and transport of liquid ammonia.

Objectives. Analysis of industrial means and methods of storage and transportation of liquid ammonia, development of measures for localization of large accidents, extinguishing of fires caused by ammonia vapour emissions and its spills in the form of cryogenic liquid.

Analytical part. When ammonia is released from pressurized equipment, the resulting mixture of product with air may vary in density from the formation of gas-air clouds below air density to buoyancy and exceeding air density depending on the conditions of release: pressure and temperature in the equipment; size of the hole through which ammonia enters the surrounding space; location of the hole in the equipment. Liquid ammonia leaks produce spills from the surface of which the product evaporates due to the temperature gradient when it is high, especially violently in the first moments after the spill. Calculations and experience show that the most dangerous area for liquid ammonia spills is a radius around the source of up to several hundred metres. Heat from the upper layer of soil (underlying surface) and the surrounding air is used for evaporation, and to a greater extent in the initial period this depends on the nature of the underlying surface.

Conclusions. Localization and elimination of pressure emissions and ammonia spills can be achieved through application of the following methods: acceleration of evaporation by air jets; reduction of ammonia evaporation surface using pits, pallets, drains into emergency tanks; dissolution in water and application of water curtains; application of water-foam compositions for polar liquids resistant to destruction.

Keywords: ammonia; storage; transportation; spill prevention; extinguishing

For citation: Vogman L.P., Bolodian I.A., Prostov E.N. Ensuring fire safety of liquid ammonia during storage and transportation on an industrial scale. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(2): 32-41. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.02.32-41 (rus).

✉ Leonid Petrovich Vogman, e-mail: vogmanleo@ya.ru

Введение

Аммиак используется как химическое вещество с высокой реакционной способностью во многих отраслях народного хозяйства. В настоящее время во многих странах мира активно ведутся работы по развитию безуглеродной энергетики по замене углеводородных топлив на водород, что связано с необходимостью снижения антропогенного воздействия на климат [1–3]. В связи с решением задач в области водородной безопасности в качестве приоритетных способов крупнотоннажной транспортировки водорода рассматривается транспортировка трубопроводным транспортом, различными видами транспорта в сжиженном или компримированном состоянии носителей водорода в виде аммиака или жидких органических носителей [4–6]. Носителями могут служить также гидриды металлов, наноструктуры и другие богатые водородом соединения.

В качестве наиболее эффективных и водородо-емких носителей водорода рассматривается аммиак. Из него водород получают посредством химических реакций. Так, при нормальной температуре аммиак сжижается при давлении 1,0 МПа. Его можно транспортировать по трубам, железнодорожным, автомобильным, водным транспортом и хранить в жидком виде [7–9]. Водород из аммиака получают посредством его каталитического разложения при температуре 526–627 К и атмосферном давлении [10].

В работах [11–14] были изложены сведения об особенностях физико-химических и пожаровзрывоопасных свойств аммиака, статистические дан-

ные о пожарах и взрывах на объектах защиты, в которых используется аммиак. Опасность применения аммиака в промышленности обусловлена не только его токсическими свойствами, но и высокой пожаровзрывоопасностью вещества. Анализ приведенных в [11] сведений о физико-химических и пожаровзрывоопасных свойствах аммиака свидетельствует, что к особенностям его можно отнести весьма высокие значения минимальной энергии зажигания (МЭЗ), равной 680 МДж (для сравнения: МЭЗ водорода в воздухе составляет 0,02 МДж, метана в воздухе 0,3 МДж), и нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР), равного 15,7 % (об.) [15]. Высокое значение НКПР объясняется, в частности, низкой величиной теплоты сгорания. Такое значение НКПР существенно выше предельно допустимой концентрации (ПДК), равной 20 мг/м³. Минимальное взрывоопасное содержание кислорода (МВСК) равно 16,2 % (об.). К особенностям аммиака следует также отнести сравнительно низкие значения нормальной скорости распространения пламени (0,23 м·с⁻¹ при температуре 150 °С [11], а по данным из источника [7] — 0,07 м·с⁻¹), а теплота сгорания в несколько раз ниже, чем при сгорании природного газа, тротильный эквивалент составляет 4,1 [12]. Можно отметить, что он намного ниже, чем для водорода или углеводородов. Благодаря этим обстоятельствам при сгорании аммиачно-воздушного облака в открытом пространстве ударные волны не образуются. Это позволяет наружные установки, в которых обращается аммиак, не относить к взрывоопасным, и, следовательно, категория

по взрывопожарной и пожарной опасности таких наружных установок ниже «АН» в соответствии с СП¹. Вместе с тем в замкнутом пространстве горение аммиака в диапазоне от 15,7 до 29,8 % (об.) [15] протекает интенсивнее, происходит быстрое, но плавное нарастание давления продуктов горения [12]. Скорость нарастания давления при стационарном горении стехиометрической смеси аммиак – воздух в замкнутом объеме также мала: $6 \cdot 10^3$ кПа с⁻¹ при нормальных условиях. Однако при этом давление взрыва равно 588 кПа. Поэтому последствия взрыва в помещении представляют опасность для людей, оборудования и строительных конструкций. Об этом свидетельствует и значение удельного тротилового эквивалента. В работе [12] выполнены расчеты и показано, что по эмпирической формуле при оценке расстояний от эпицентра взрыва аммиака до заданного места могут быть установлены уровни последствий разрушений зданий (полное, среднее, малое, умеренное повреждение).

Большой интерес с учетом цели настоящих исследований вызывает работа². В ней представлены методика и алгоритм расчета концентраций аммиака в воздухе и распространения газового облака при авариях на складах жидкого аммиака. Рассмотрен пример аварии емкости (30 т) со сжиженным аммиаком, расположенной в местности с ровным ландшафтом. Выполнены расчеты по определению концентрации аммиака в шлейфе облака, а также длины зоны химического заражения, где возможно смертельное поражение людей на открытой местности. На основании расчета определены поле концентрации и токсидоза на этапе аварии, связанной с испарением пролитого аммиака. По значению смертельной токсидозы для аммиака, равной 150 мг мин/л, получена величина протяженности зоны смертельного поражения, равная 180 м, а по значению пороговой токсидозы 15 мг мин/л — величина протяженности зоны порогового поражения, которая составила 740 м.

С целью обеспечения пожарной безопасности при хранении и транспортировке жидкого аммиака были поставлены следующие **задачи исследования**: провести анализ условий и способов хранения, транспортировки жидкого аммиака, разработать мероприятия по локализации крупных аварий, тушению пожаров, вызванных выбросами паров аммиака и его проливов в виде криогенной жидкости.

¹ СП 12.13130.2009. Определение помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.

² Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах. Гостехнадзор России. ГУП «НТЦ по безопасности в промышленности». Сборник документов. Серия 27. Декларирование промышленной безопасности и оценка риска. Выпуск 2. 2001. 219 с.

1. Аналитическая часть

Особенности хранения и транспортировки аммиака в промышленных масштабах

1.1. Хранение аммиака

Жидкий аммиак хранят в резервуарах (хранилищах) под избыточным давлением, близким к атмосферному (0,01 МПа), под давлением 1,0 и 2,0 МПа. Для хранения жидкого аммиака под давлением при температуре окружающей среды применяют резервуары с двойными равнопрочными стенками, преимуществами которых являются защита от внешних воздействий, благоприятные возможности проведения ремонтных и регламентных работ, предотвращение проливов жидкого аммиака [16, 17].

Чаще всего жидкий аммиак хранят под избыточным давлением 0,002–0,008 МПа в вертикальных резервуарах с теплоизоляцией при температуре около минус 33 °С. Для поддержания заданного рабочего давления аммиак, испарившийся под действием притока тепла, отводят потребителям или конденсируют и возвращают в резервуар. Такой способ хранения аммиака называют изотермическим.

Изотермическое хранение жидкого аммиака характеризуется узким интервалом давлений, для поддержания которого отводят тепло, поступающее в резервуар от окружающего воздуха и с жидким аммиаком. При этом используют вертикальные цилиндрические резервуары вместимостью от 10 (одностенные и двустенные) до 30 (одностенные) тысяч тонн с коэффициентом заполнения не более 0,93. Наибольшее распространение получили цельнометаллические двустенные изотермические резервуары с теплоизоляцией в пространстве между стенками из матов стекловолокна в обкладке из стеклоткани и капроновой сетки. Между днищами внутреннего и наружного резервуара теплоизоляцию изготавливают из материалов высокой механической прочности: блоки из перлитобетона или пеностекла. Преимуществами таких резервуаров являются защита от внешних воздействий, благоприятные возможности проведения ремонтных и регламентных работ, исключение проливов жидкого аммиака. Резервуары оборудованы системами сигнализации и блокировки по давлению, температуре и уровню жидкого аммиака, предохранительными и дыхательными клапанами, люками, штуцерами и наружной лестницей. Жидкий аммиак из предохранительных клапанов оборудования и трубопроводов сбрасывают в резервуар, а газообразный сжигают на факельной установке.

Факельная установка обеспечивает стабильное сжигание сбросов газообразного аммиака, а также безопасную плотность теплового потока и предотвращение попадания воздуха внутрь факела через верхний срез факельного ствола. Для более полного

сгорания аммиака в факел подают пропан-бутановую смесь или природный газ, а для предотвращения подсоса воздуха — инертный газ. Горючая смесь воспламеняется запальным устройством, а также дежурными горелками с запальниками, которые располагают на факельном оголовке.

При хранении аммиака особое внимание следует уделить ситуациям, которые могут привести к авариям резервуаров с этим продуктом.

Изменение температуры воздуха и атмосферного давления влияет на интенсивность испарения жидкого аммиака.

При температуре воздуха ниже минус 34 °С для поддержания избыточного давления в изотермическом резервуаре 0,0015–0,002 МПа (150–200 мм вод. ст.) могут потребоваться дополнительные затраты тепла. При падении температуры воздуха ниже равновесного значения в резервуаре может образоваться вакуум. Для его предотвращения в изотермических резервуарах в этих условиях должно быть повышено давление за счет подогрева продукта с последующей рециркуляцией теплой жидкости в объеме хранилища или благодаря подогреву его оснований.

При откачке жидкого аммиака давление газообразного продукта не должно быть ниже предельного давления, установленного технологическим регламентом. Продукт из опорожняемого резервуара с температурой минус 33 °С перекачивают в рабочий резервуар. При этом его можно подогревать в подогревателе до 10 °С и подавать для раздачи в другие емкости.

После опорожнения резервуара закрывают вентили на трубопроводах всех источников поступления жидкого аммиака и задвижки на трубопроводе выдачи газообразного аммиака, принимают меры к удалению аммиака, скопившегося в неровностях днища хранилища.

1.2. Транспортирование аммиака

Магистральные аммиакопроводы до 355 мм диаметром прокладывают под землей на глубине 1,4 м до верха трубы и 0,5–1,4 м на переходах через водные препятствия. Для подводных и мостовых переходов используют конструкцию «труба в трубе», в которой наружный трубопровод (кожух) выполняет функции резервной оболочки, препятствующей утечке аммиака в окружающую среду при ее повреждении. В межтрубных участках установлены газоанализаторы для определения содержания аммиака. При его обнаружении сигнал подается на пульт управления. Наружные поверхности рабочего трубопровода и кожуха покрывают изоляционным материалом. Для предотвращения коррозии внутренней поверхности кожуха межтрубное пространство заполняют инертным газом (азотом).

Основные опасности при эксплуатации магистральных аммиакопроводов сопряжены с возможными утечками продукта через сальниковые компенсаторы (кольцевая щель, заполненная синтетическим солидолом — запирающей жидкостью), которые препятствуют проникновению газа в атмосферу. Натурные экспериментальные испытания на жидком азоте показали, что при постоянных положительных температурах утечка азота не происходит. Она становится заметной при резких перепадах отрицательных температур. Объясняется это реологическими свойствами жидкости вследствие различной скорости температурной деформации элементов уплотнительных узлов, которые проявляются при отрицательных температурах. Для повышения надежности сальникового компенсатора используется конструкция с автоматическим заполнением запаса запирающей жидкости.

В процессе эксплуатации аммиакопровода могут происходить небольшие утечки продукта вследствие нарушения целостности труб (повреждения снаружи механическим оборудованием, перемещения почвы и другое). Для устранения утечки на образовавшееся отверстие в трубопроводе устанавливают манжету без отключения газопровода.

При больших утечках аммиака место утечки изолируют закрытием клапанов секционирования и отключают насосные станции, расположенные выше аварийного участка. Одновременно осуществляются меры по локализации проливов водно-пенными составами, а газовоздушных облаков — струями распыленной воды.

При транспортировке жидкого аммиака железнодорожным транспортом используют горизонтально расположенные цилиндрические цистерны с эллиптическими днищами вместимостью до ~ 40 т, наружная поверхность которых окрашена в светло-серый цвет, а днища — в зеленый цвет с окаймляющей полосой по кругу белого цвета [18].

При заполнении цистерны предварительно ее промывают водой и подвергают дегазации (например, азотом). Продувочный газ направляют в сторону наветренной стороны, а при возможности — в факельную систему. Новые и бывшие в употреблении цистерны проверяют на герметичность газообразным азотом или аммиаком под давлением 2 МПа. При этом остаточное содержание кислорода в цистерне должно быть не более 3 % (об.).

Цистерны заполняют жидким аммиаком из резервуаров перекачиванием за счет разности давлений между ними, а также перекачиванием насосами. Вытесняемый из цистерны образующийся за счет частичного вскипания газообразный аммиак постоянно отводят, например, конденсацией паров и возвратом в жидкую фазу, или на факельное сжигание.

При применении изотермических хранилищ, работающих под давлением, близким к атмосферному, жидкий аммиак может поступать в цистерну только с помощью насосов. При этом температура жидкого аммиака равна минус 33,4 °С или может быть выше. Заполнение цистерны должно быть прекращено, если масса налитого в цистерну продукта равна ее грузоподъемности, или уровень налива достигнет 83–85 % объема цистерны.

Слив жидкого аммиака из цистерны осуществляется вытеснением его газообразным (при этом остаточное давление газообразного аммиака в цистерне должно быть не менее 0,05 МПа) или перекачиванием насосами.

Если во время заполнения или опорожнения цистерны обнаружена утечка аммиака или возникла аварийная ситуация, налив (слив) прекращают, ликвидируют утечки, принимают меры по предотвращению аварии и ее последствий [19–21].

В случае разгерметизации цистерны при механическом повреждении или при пожаре происходит быстрое испарение жидкого аммиака и снижение давления в ней. Аммиак вскипает, что может сопровождаться резким повышением давления, особенно при плюсовой температуре окружающего воздуха, и взрывом. При обнаружении любых видов повреждения цистерны (трещины в сварных швах, сквозные повреждения обечайки, днищ, других элементов, работающих под давлением) принимаются меры по ограничению проливов и испарению жидкого аммиака, в частности, с помощью водно-пенных составов, по растворению его в воде и орошению распыленной водой парогазовых облаков газообразного продукта. По мере выделения паров воды из цистерны происходит медленное ее охлаждение и снижение давления. Поэтому распылять воду следует вдали от цистерны и места аварии, чтобы не допустить контакта воды с охлаждающейся цистерной во избежание бурного испарения аммиака.

Автомобильный транспорт применяется, как правило, для перевозки и доставки аммиака от прирельсовых и речных (морских) причальных складов непосредственно потребителям. Автомобильные средства оборудуют углекислотным или водно-пенным огнетушителем, заземляющим устройством, бачком с водой емкостью не менее 10 л.

Слив жидкого аммиака из железнодорожной цистерны (или из танкера) в автотранспортную емкость производят за счет разности давлений газовой фазы в емкостях, создаваемой с помощью компрессора.

После окончания слива аммиака из железнодорожной цистерны останавливают компрессор и сбрасывают давление газообразного аммиака (из цистерны до 0,05 МПа, из коммуникаций пол-

ностью) в цистерну (емкость) с водой и закрывают запорную арматуру.

В случае разгерметизации оборудования в пути следования транспортное средство должно быть выведено в сторону от дороги по направлению ветра и приняты меры по устранению утечки газа. Пролиты аммиака разбавляют водой.

Для транспортировки аммиака морским или речным транспортом используют танкеры со сферическими, цилиндрическими и призматическими емкостями, покрытые теплоизоляционным слоем толщиной ~ 100 мм для снижения теплопритока грузоподъемностью от 1000 до 100 000 м³. Перевозка жидкого аммиака может осуществляться под высоким или повышенным давлением, а также в рефрижераторах. Емкости под аммиак должны быть рассчитаны на низкие температуры или высокое давление. В танкере-рефрижераторе температура должна быть не выше минус 43 °С. На практике используют суда полурефрижераторные с размещением на них для поддержания пониженной температуры абсорбционно-холодильных установок при несколько повышенном давлении до 0,9 МПа, а также рефрижераторные.

Для поддержания температуры аммиака на одном уровне отводят пары и подают на установку повторного сжижения, после чего конденсат возвращают в емкость.

Отличительной особенностью транспортных судов, предназначенных для перевозки криогенных жидкостей, является то, что эти жидкости хранятся в емкостях (первичная оболочка), которые вмонтированы в корпус судна (вторичная оболочка). Для заполнения пустот и для продувки емкостей на грузовом судне имеется инертный газ. Он предотвращает образование коррозионных смесей. Основным требованием к инертному газу является низкое содержание кислорода (0,2–0,3 % масс.) и минимальное (не более 200 ч/млн) содержание оксида углерода.

Перед заполнением аммиаком емкости продувают азотом. В первоначальный период погрузки происходит сильное выделение паров по мере охлаждения емкости. Давление в емкостях поддерживают ниже установочного максимального давления предохранительных систем (0,025–0,035 МПа). Емкости загружают продуктом не более 98 % их объема.

Разгрузка аммиака осуществляется с помощью центробежных насосов турбинного или погружного типа. Для предотвращения возникновения разрежения в емкостях, при необходимости, в них вводят пары аммиака.

На борту судов установлена контрольно-измерительная аппаратура (КИПиА) во взрывобезопасном исполнении, которая обеспечивает надлежащий уровень продукта в емкости, надлежащие температуру

и давление. При появлении дыма, при пожаре обеспечивается перекрытие трубопроводов подачи паров и жидкости, осуществляется непрерывный контроль за появлением аммиака в атмосфере корабля и в береговой зоне. Система КИПиА работает в дистанционном режиме управления и позволяет полностью блокировать оборудование в случае аварии или пожара.

2. Локализация выбросов под давлением и проливов из оборудования аммиака, ликвидация аварийных ситуаций и пожаров

При выбросе аммиака из оборудования под давлением образующаяся смесь продукта с воздухом может изменяться по плотности от образования газоздушных облаков ниже плотности воздуха до плавуности и превышения плотности воздуха в зависимости от условий выброса: давление и температура в оборудовании; размеры отверстия, через которое поступает аммиак в окружающее пространство; расположение отверстия в оборудовании (газовая или жидкая фаза). При этом часть аммиака γ в зависимости от начальной температуры испаряется (рис. 1). Остальное количество аммиака охлаждается до температуры кипения при атмосферном давлении и ниже. Доля первоначально испарившегося при проливе жидкого аммиака примерно в 100 раз меньше, чем в случае его выброса под давлением, и обычно составляет 0,2–0,3 % общего пролива.

При утечке жидкого аммиака образуются проливы, с поверхности которых продукт испаряется благодаря градиенту температур, когда он высок, особенно бурно в первые моменты после пролива. Расчетные и опытные данные свидетельствуют, что при проливах жидкого аммиака наиболее опасной является зона радиусом вокруг источника до нескольких сотен метров. На испарение расходуется тепло верхнего слоя почвы (подстилающей поверхности) и окружающего воздуха, причем в большей степени в начальный период это зависит от природы подстилающей поверхности. Например, по расчетам [22] удельная скорость первоначального режима испарения ($\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$) при разливе в бассейне размерами $91,5 \times 91,5$ м 15 000 тонн аммиака (ско-

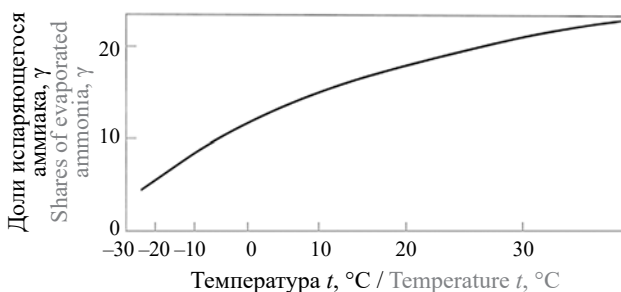


Рис. 1. Зависимость доли первоначально испаряющегося аммиака γ от начальной температуры
Fig. 1. Dependence of the fraction of initially evaporating ammonia γ on the initial temperature

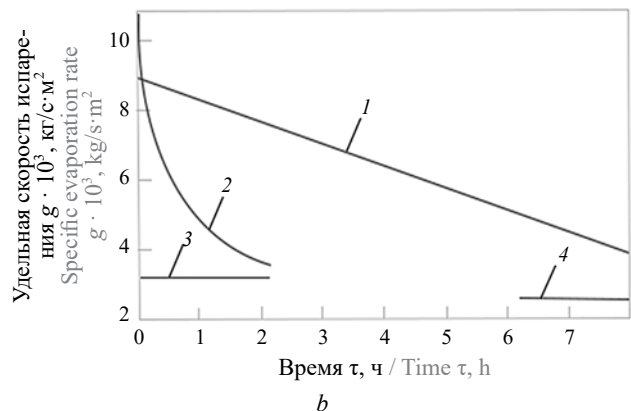
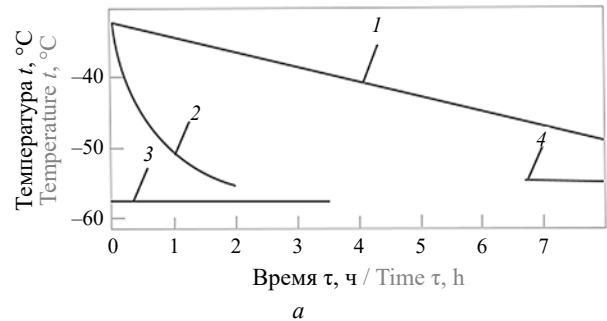


Рис. 2. Зависимость температуры (а) и удельной скорости испарения (б) жидкого аммиака от времени после пролива при температуре окружающего воздуха 27 °С и скорости ветра 6,7 м/с для бассейнов различных размеров: 1 — 61×61 м (10 тыс. т); 2 — $6,1 \times 6,1$ м (10 т); 3 — стационарное состояние испарения $0,1 \times 0,1$ м; 4 — стационарное состояние испарения $6,1 \times 6,1$ м

Fig. 2. Dependence of the temperature (a) and specific evaporation rate (b) of liquid ammonia on the time after the spill at an ambient temperature of 27 °C and a wind speed of 6.7 m/s for pools of various sizes: 1 — 61×61 m (10 thousand tons); 2 — 6.1×6.1 m (10 tons); 3 — stationary evaporation state 0.1×0.1 m; 4 — stationary evaporation state 6.1×6.1 m

рость ветра 1,8 м/с, температура поверхности почвы 21 °С) для материала бута в 25 раз больше, чем для песка, и в 11 раз больше, чем для средней почвы.

В результате охлаждения подстилающей поверхности ее теплопроводность снижается, и верхний слой выполняет роль теплоизолирующей прослойки, препятствующей подводу тепла от глубинных слоев грунта. Определяющим фактором становится тепло атмосферного воздуха. Температура жидкого аммиака в результате замедляется, и постепенно наступает режим стационарного испарения (рис. 2). При этом подводимое извне количество тепла равно количеству тепла, поглощаемому при испарении пролива аммиака [21, 22]. Образующееся облако может приобретать различные формы: от летучести смесей продукта с воздухом (при атмосферном давлении и температуре кипения плотность паров аммиака $0,9 \text{ кг/м}^3$, а воздуха $1,2 \text{ кг/м}^3$) до смесей, которые плотнее воздуха. Это обусловлено содержанием капель NH_3 в смеси с влажным или сухим воздухом. При содержании капель в смеси с сухим воздухом ~ 4–8 % (масс.) смесь будет

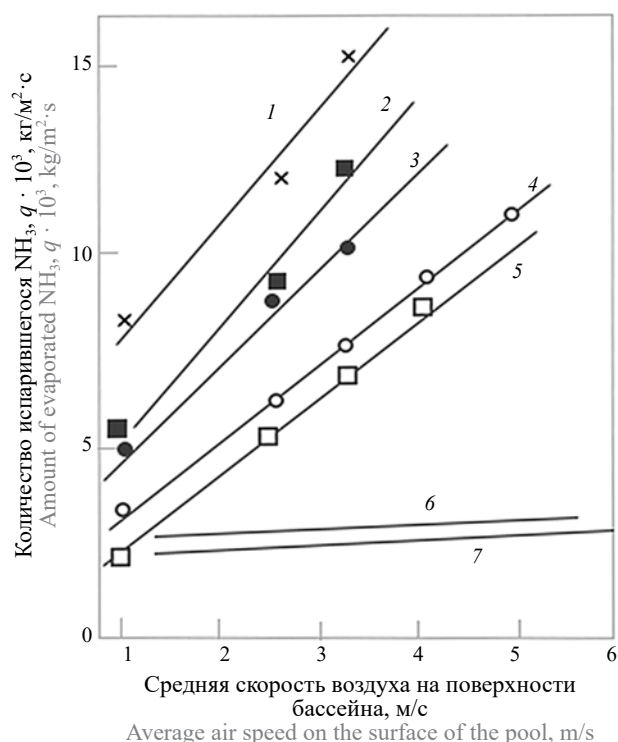


Рис. 3. Зависимость количества испарившегося аммиака от средней скорости воздуха при различной температуре и размерах пролива жидкого аммиака: 1 — $0,1 \times 0,1$, 36 °C; 2 — $0,25 \times 0,25$ м, 38 °C; 3 — $0,25 \times 0,25$ м, 36 °C; 4 — $0,25 \times 0,25$ м, 22 °C; 5 — $0,5 \times 0,5$ м, 36 °C; 6 — 3×3 м, 26 °C; 7 — 3×3 м, 4,4 °C

Fig. 3. Dependence of the amount of evaporated ammonia on the average air velocity at different temperatures and sizes of the liquid ammonia spill: 1 — 0.1×0.1 , 36 °C; 2 — 0.25×0.25 m, 38 °C; 3 — 0.25×0.25 m, 36 °C; 4 — 0.25×0.25 m, 22 °C; 5 — 0.5×0.5 m, 36 °C; 6 — 3×3 m, 26 °C; 7 — 3×3 m, 4.4 °C

плавающей. Выше этой массы смесь становится плотнее воздуха, теряет плавучесть и начинает стелиться над подстилающей поверхностью. Для влажного воздуха предельное значение капель аммиака при переходе от плавучести облака к его резкому снижению равно ~ 16–20 % (масс.) [22].

Скорость испарения аммиака зависит от размеров пролива. Как следует из данных рис. 3, с уменьшением размера пролива скорость испарения увеличивается, что связано с увеличением удельной поверхности ограждений и повышением подводимого тепла.

Локализация и ликвидация проливов аммиака может быть достигнута благодаря применению следующих способов: ускорению испарения воздушными струями; уменьшению поверхности испарения аммиака с использованием приямков, поддонов, сливов в аварийные емкости; растворению в воде, применением водяных завес; нанесением водно-пенных составов для полярных жидкостей, устойчивых к разрушению.

При небольших (до 1000 кг) проливах жидкого аммиака его растворяют в воде в 20–100 раз (в зави-

симости от размеров и количества пролива), например, распыленной водой, орошая всю поверхность пролива.

При выбросах газовых облаков или испарении больших проливов главным способом предотвращения пожаров и достижения больших концентраций аммиака в воздухе также является применение водяных завес, создаваемых стационарными и передвижными установками. Весьма эффективным способом предотвращения и тушения пожаров при больших проливах аммиака является также применение устойчивых к разрушению водно-пенных составов, предназначенных для тушения полярных жидкостей со свойствами электролита высокой концентрации. Водно-пенные составы, поданные на зеркало пролива аммиака, изолируют его от кислорода воздуха и к тому же существенно снижают выделение паров аммиака в окружающую среду. Для предотвращения горения и пожара аммиака на открытой поверхности применяются пены низкой и средней кратности, так как пены высокой кратности легко сносятся ветром.

Заключение

При выбросе аммиака из оборудования под давлением образующаяся смесь продукта с воздухом может изменяться по плотности от образования газозвудушных облаков ниже плотности воздуха до плавучести и превышения плотности воздуха в зависимости от условий выброса: давление и температура в оборудовании; размеры отверстия, через которое поступает аммиак в окружающее пространство; расположение отверстия в оборудовании (газовая или жидкая фаза).

При утечке жидкого аммиака образуются проливы, с поверхности которых продукт испаряется благодаря градиенту температур, когда он высок, особенно бурно в первые моменты после пролива. Расчетные и опытные данные свидетельствуют, что при проливах жидкого аммиака наиболее опасной является зона радиусом вокруг источника до нескольких сотен метров. На испарение расходуется тепло верхнего слоя почвы (подстилающей поверхности) и окружающего воздуха, причем в большей степени в начальный период, это зависит от природы подстилающей поверхности. В дальнейшем определяющим фактором становится тепло атмосферного воздуха.

Локализация и ликвидация проливов аммиака может быть достигнута благодаря применению следующих способов: ускорения испарения воздушными струями; уменьшения поверхности испарения аммиака с использованием приямков, поддонов, сливов в аварийные емкости; растворения в воде и применения водяных завес; нанесения водно-пенных составов для полярных жидкостей, устойчивых к разрушению.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мустафин Т.Н., Сайфетдинов А.Г., Шарапов И.И., Визгалов С.В. Система подавления испарений и нейтрализации проливов жидкого аммиака на холодильной установке // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 17. С. 237–240.
2. Савчук О.Н. Совершенствование способов ликвидации последствий аварий с разгерметизацией резервуаров с аммиаком при транспортировке их автомобильным транспортом // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. Т. 2024. № 2 (70). С. 34–44.
3. Suardin J.A., Yanjun Wang, Willson M., Mannan M.S. Field experiments on high expansion (HEX) foam application for controlling LNG pool fire // Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 165. Pp. 612–622. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.10.040
4. Гавкалюк Б.В., Шаталова Н.В. Проблемы безопасной транспортировки аммиака автомобильным транспортом // Проблемы управления рисками в техносфере. 2019. № 4 (52). С. 117–123. EDN CHYRXL.
5. Синицын В.В., Татаринов В.В., Прус Ю.В., Кирсанов А.А. Статистика автомобильных перевозок опасных грузов и происшествий // Технологии техносферной безопасности. 2018. № 4 (80). С. 24–35. DOI: 10.25257/TTS.2018.4.80.24-35. EDN VNBHZZ.
6. Zhu Z., Li S. Analysis of the operation status of atmospheric pressure tank trucks for road transportation of liquid dangerous goods // Chemical Engineering Communications. 2020. No. 46. Pp. 201–217.
7. Иванов Ю.А., Стрижевский И.И. Хранение и транспортировка жидкого аммиака. М. : Химия, 1991. 75 с.
8. Алексеева О.К., Козлов С.И., Фатеев В.Н. Транспортировка водорода // Транспорт на альтернативном топливе. 2011. № 3 (21). С. 18–24. EDN NXVCQJ.
9. Bagheri M., Verma M., Verter V. Transport mode selection for toxic gases: rail or road? // Risk Analysis. 2013. Vol. 34. Issue 1. Pp. 168–186. DOI: 10.1111/risa.12063
10. Картунов Р.И. Организация системы управления пожарной безопасностью цеха по производству аммиака // Символ науки. 2020. № 3. С. 28–30.
11. Вогман Л.П. Особенности физико-химических и пожаровзрывоопасных свойств аммиака и пожарная опасность объектов защиты, в которых он используется // Холодильная техника. 2020. № 3. С. 48–54. DOI: 10.17816/rf104062. EDN WLGFOZ.
12. Вогман Л.П. Пожаровзрывоопасность при разгерметизации оборудования с аммиаком // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 10. С. 27–33. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-10-27-30. EDN BSROKL.
13. Савчук О.Н. Уточнение геометрических параметров площади пролива аварийно химически опасных веществ, перевозимых автомобильным транспортом // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 3 (71). С. 63–73.
14. Liu X., Saat M.R., Barkan C.P.L. Probability analysis of multiple-tank-car release incidents in railway hazardous materials transportation // Journal of Hazardous Materials. 2014. Vol. 276. Pp. 442–451. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.05.029
15. Баратов А.Н. Горение – пожар – взрыв – безопасность. М. : ВНИИПО МЧС России, 2003. 363 с.
16. Huang W., Zhang Y., Zuo B., Yua Y., De Dieu G.J., Xu Y. Using an expanded Safety Failure Event Network to analyze railway dangerous goods transportation system risk-accident // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2020. Vol. 65. P. 104122. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104122
17. Ford P. Enhancing Fire Safety in Commercial Vehicles: Assessing the Efficacy and Advantages of Exploding Fire Extinguishing Balls // Journal of Transportation Technologies. 2024. No. 14. Pp. 521–548. DOI: 10.4236/jtts.2024.144029
18. Nedorchuk B.L., Filippow V.N., Shebeko Yu.N. General technical requirements for safety of railway tanks for transportation of hazardous materials // Pojazdy szynowe na przełomie wieków. Krakow : Arlamow, 2000. Vol. 1. Pp. 197–203.
19. Котов Г.В., Еремин А.П., Тищенко В.Г. Расчет количества рукавных распылителей для постановки водяных завес при ликвидации чрезвычайных ситуаций, связанных с проливом аммиака // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. 2007. № 2 (6). С. 40–45.
20. Inanloo B., Tansel B. Explosion impacts during transport of hazardous cargo: GIS-based characterization of overpressure impacts and delineation of flammable zones for ammonia // Journal of Environmental Management. 2015. Vol. 156. Pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.02.044
21. Resplandy A. Chimie Industrie – Genie Chimique. 1969. Vol. 102. No. 6. Pp. 691–702.
22. Burges E.A. 15-th Symposium International Combustion. Tokyo, 1974. P. 283.

REFERENCES

1. Mustafin T.N., Sayfedinov A.G., Sharapov I.I., Vizgalov S.V. System of vaporization suppression and neutralization of liquid ammonia spills at the refrigeration plant. *Bulletin of Technological University*. 2015; 18(17):237-240. (rus).
2. Savchuk O.N. Improvement of methods of liquidation of consequences of accidents with depressurization of tanks with ammonia during their transportation by motor transport. *Problems of risk management in the technosphere*. 2024; 2024(2):(70):34-44. (rus).
3. Suardin J.A., Yanjun Wang, Willson M., Mannan M.S. Field experiments on high expansion (HEX) foam application for controlling LNG pool fire. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 165:612-622. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.10.040
4. Gavkalyuk B.V., Shatalova N.V. Problems of safe transportation of ammonia by automobile transport. *Problems of risk management in the technosphere*. 2019; 4(52):117-123. EDN CHYRXL. (rus).
5. Sinitsyn V.V., Tatarinov V.V., Prus Yu.V., Kirsanov A.A. Statistics of automobile transportation of dangerous goods and accidents. *Technosphere safety technologies*. 2018; 4(80):24-35. DOI: 10.25257/TTS.2018.4.80.24-35. EDN VNBHSD. (rus).
6. Zhu Z., Li S. Analysis of the operation status of atmospheric pressure tank trucks for road transportation of liquid dangerous goods. *Chemical Engineering Communications*. 2020; 46:201-217.
7. Ivanov Y.A., Strizhevskiy I.I. *Storage and transportation of liquid ammonia*. Moscow, Khimiya, 1991; 75. (rus).
8. Alekseeva O.K., Kozlov S.I., Fateev V.N. Hydrogen transportation. *Transportation on alternative fuel*. 2011; 3(21):18-24. EDN NXVCQJ. (rus).
9. Bagheri M., Verma M., Verter V. Transport mode selection for toxic gases: rail or road? *Risk Analysis*. 2013; 34(1):168-186. DOI: 10.1111/risa.12063
10. Kartunov R.I. Organization of the fire safety management system of the ammonia production shop. *Symbol of Science*. 2020; 3:28-30.
11. Vogman L.P. Physical-chemical and fire-explosive properties of ammonia and fire hazard of defence objects in which it is used. *Refrigeration equipment*. 2020; 3:48-54. DOI: 10.17816/rf104062. EDN WLGFOZ. (rus).
12. Vogman L.P. Fire and explosion hazard during depressurization of equipment with ammonia. *Occupational Safety in Industry*. 2021; 10:27-33. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-10-27-30. EDN BSROKL. (rus).
13. Savchuk O.N. Refinement of geometrical parameters of the spillage area of accidentally chemically hazardous substances transported by automobile transport. *Problems of risk management in the technosphere*. 2024; 3(71):63-73. (rus).
14. Liu X., Saat M.R., Barkan C.P.L. Analysis of the likelihood of multiple tank wagon release incidents in rail transport of hazardous materials. *Journal of Hazardous Materials*. 2014; 276:442-451. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.05.029
15. Baratov A.N. *Burning-fire-explosion-safety*. Moscow, VNIPO of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2003; 363. (rus).
16. Huang W., Zhang Y., Zuo B., Yua Y., De Dieu G.J., Xu Y. Using an expanded Safety Failure Event Network to analyze railway dangerous goods transportation system risk-accident. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020; 65:104122. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104122
17. Ford P. Enhancing Fire Safety in Commercial Vehicles: Assessing the Efficacy and Advantages of Exploding Fire Extinguishing Balls. *Journal of Transportation Technologies*. 2024; 14:521-548. DOI: 10.4236/jtts.2024.144029
18. Nedorchuk B.L., Filippov V.N., Shebeko Yu.N. General technical requirements for safety of railway tanks for transportation of hazardous materials. *Rail vehicles at the turn of the century*. Krakow, Arlamow, 2000; 1:197-203.
19. Kotov G.V., Eremin A.A.P., Tishchenko V.G. Calculation of the number of hose sprayers for water curtains in the liquidation of emergency situations associated with ammonia spill. *Bulletin of the Command and Engineering Institute of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus*. 2007; 2(6):40-45. (rus).
20. Inanloo B., Tansel B. Explosion impacts during transport of hazardous cargo: GIS-based characterization of over-pressure impacts and delineation of flammable zones for ammonia. *Journal of Environmental Management*. 2015; 156:1-9. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.02.044
21. Resplandy A. *Chimie Industrie – Genie Chimique*. 1969; 102(6):691-702.
22. Burges E.A. *15-th Symposium International Combustion*. Tokio, 1974; 283.

Поступила 20.12.2024, после доработки 08.04.2025;

принята к публикации 11.04.2025

Received December 20, 2024; Received in revised form April 08, 2025;

Accepted April 11, 2025

Информация об авторах

ВОГМАН Леонид Петрович, д.т.н., главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; Scopus AuthorID: 57722362000; ORCID: 0000-0003-4222-3379; e-mail: vniipo-3.5.3@yandex.ru

БОЛОДЬЯН Иван Ардашевич, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; AuthorID: 529585; Scopus AuthorID: 6508266383; e-mail: vniipo3.5.3@yandex.ru

ПРОСТОВ Евгений Николаевич, старший научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ScopusID: 6506573345; SPIN-код: 1752-9236; AuthorID: 1288447; e-mail: Prostov.vniipo@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Leonid P. VOGMAN, Dr. Sci. (Eng.), Main Researcher, All Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; Scopus AuthorID: 57722362000; ORCID: 0000000342223379; e-mail: vniipo3.5.3@yandex.ru

Ivan A. BOLODYAN, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Main Researcher, All Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; AuthorID: 529585; Scopus AuthorID: 6508266383; e-mail: vniipo3.5.3@yandex.ru

Eugene N. PROSTOV, Senior Researcher, All Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ScopusID: 6506573345; SPIN-code: 1752-9236; AuthorID 1288447; e-mail: Prostov.vniipo@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interest.