

УДК: 355.58(075)

ЭКОЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ ПРИМЕНЕНИЯ ЖИДКОГО АММИАКА В РАЙОНАХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Л.П. Маслов, доцент, *С.М. Пестов, доцент, **Е.И. Хабарова, зав. кафедрой,
***К.М. Сухоруков, гл. инженер проекта, ***М.А. Минкин, директор

кафедра Химии и технологии редких и рассеянных элементов

*кафедра Неорганической химии

**кафедра Прикладной экологии и безопасности труда

МИТХТ им. М.В. Ломоносова

***ФГУП проектно-изыскательский институт ФУНДАМЕНТПРОЕКТ, г. Москва

e-mail: pestovsm@yandex.ru

Рассмотрены риски возникновения чрезвычайных экологических и технических ситуаций при авариях, связанных с использованием жидкого аммиака в качестве хладагента при строительстве в зонах вечной мерзлоты. Проведено моделирование зоны поражения при выбросах аммиака в атмосферу. Предложена модель взаимодействия аммиака с пластично мерзлыми грунтами. Сделан вывод о необходимости мониторинга аммиака в атмосферном воздухе и целесообразности замены жидкого аммиака на альтернативный хладагент – хладон-22.

Ключевые слова: хладагенты, жидкий аммиак, хладон-22, эколого-технологические риски

Высказывание Ломоносова о Сибири как об истоке процветания будущей России с полным правом может быть распространено и на районы Крайнего Севера. Промышленное освоение этих районов сопровождается переходом от точечных вариантов к площадному принципу использования территорий. Успех такого перехода в значительной мере определяется степенью соответствия применяемых технических средств особенностям климата, растительного и животного мира Севера. Особенно важным фактором, определяющим характер технических решений при строительстве в экстремальных условиях Севера, является повсеместное распространение вечно мерзлых грунтов, составляющих 65 % территории России.

Вечномерзлые грунты, представленные скальными и обломочно-скальными породами с малой долей льдистости не требуют специальных технических решений при строительстве. Напротив – строительство на вечномерзлых грунтах, сложенных пластично-мерзлыми осадочными породами, возможно только при использовании свайных конструкций и специальных охлаждаемых фундаментов. В противном случае – сезонное или техногенное оттаивание мерзлоты приводит к осадке грунта, которые при достаточной мощности и льдистости изначально мерзлого грунта приводят к значительным деформациям сооружений. Поэтому опорные сваи и конструкции необходимо специально охлаждать во избежание их проседания при

оттаивании грунта [1, 2]. Для этой цели в проектно-изыскательском институте ФУНДАМЕНТПРОЕКТ разработаны и успешно функционируют установки для стабилизации пластично-мерзлых грунтов (СПМГ), использующие принцип действия холодильных машин разного типа [3].

В качестве рабочего тела этих машин – хладагентов – с учетом требуемого диапазона температур могут использоваться различные легко кипящие жидкости: растворы солей, жидкий аммиак, фторхлоруглероды (фреоны, хладоны), спирты, эфиры [4]. Сейчас активно прорабатываются варианты использования сверхкритических хладагентов, например, на основе углекислоты. Выбор наиболее подходящего хладагента определяется, исходя из их технологических и теплотехнических свойств, экономических и токсикологических показателей. В табл. 1 представлены основные характеристики аммиака и разрешенного для применения (по категории озоноразрушающих средств) дифторхлорметана – «хладон-22».

Из табл. 1 следует, что, исходя только из теплотехнических свойств, наиболее подходящим теплоносителем является жидкий аммиак, поскольку из перечисленных веществ он характеризуется наибольшим значением теплоты испарения. Однако нельзя не учитывать, что аммиак является токсичным веществом, и при его массовом применении возможны локальные утечки и выбросы, которые представляют немалую опасность для обслуживающего персонала, местного

населения и окружающей среды. Кроме того, его разливы на поверхность почвы, вызывают многообразные эффекты, приводящие к

изменению несущих свойств подстилающего вечномёрзлого грунта и загрязнению поверхностных и грунтовых вод.

Таблица 1. Некоторые теплотехнические и токсикологические характеристики хладагентов [5, 6].

Наименование параметра	Обозначение	Аммиак	Хладон-22
Формула и молярная масса	М	NH_3 ; 17.03	CHF_2Cl ; 86.47
Температура кипения, °С (при Р = 101 кПа)	$t_{\text{кип}}$	-33.4	-40.85
Энтальпия испарения при $t_{\text{кип}}$, кДж/кг	$\Delta H_{\text{кип}}$	1371	233.5
Давление насыщенных паров при 21 °С, кПа	$P_{\text{н}}$	888.0	909.7
Плотность жидкости при $t_{\text{кип}}$, кг/м ³	$D_{\text{ж}}$	682.8	1406
Плотность газа при 0°С, кг/м ³	$D_{\text{г}}$	0.771	3.91
Пределы взрываемости, об. %		15-26	-
	ПДКр.з.	20	3000
Предельно допустимые концентрации, мг/м ³	ПДКмакс.раз.	0.2	100
	ПДКсреднесут.	0.04	10
Летальная токсодоза, мг·мин/л	LCt ₅₀	150	-
Пороговая токсодоза, мг·мин/л	PCt ₅₀	15	-

Целью данной работы является анализ эколого-технологических последствий утечек, выбросов и разливов аммиака в условиях Крайнего Севера в сравнении с альтернативным хладагентом – хладоном-22.

1. Сравнение токсикологических свойств хладагентов.

Хладон-22 не является токсичным веществом, хотя и не поддерживает дыхания. При вдыхании его паров возможно появление признаков удушья за счет вытеснения парами хладона-22 кислорода воздуха, тем более что плотность его паров значительно превосходит плотность воздуха. Поэтому при проектировании охлаждающих систем с использованием хладона-22 следует избегать замкнутых пространств, а в случае аварийной ситуации – предусмотреть возможность приточной вентиляции. Хладон-22 относится к классу фторхлоруглеводородов, которые отличаются чрезвычайной инертностью, не взаимодействуют с основными компонентами атмосферы, не реагируют с водой, почвами, минералами и не представляют никакой опасности для почвенных и водообитающих организмов. В тоже время аммиак, чрезвычайно выгодный в качестве хладагента, отличается большой реакционной способностью, является токсическим веществом, активно воздействует на органы дыхания человека, активен по отношению к компонентам атмосферы, легко растворяется в природных водах, взаимодействует с органическими и минеральными компонентами почвы. Поэтому при использовании аммиака требуется

предусматривать дорогостоящие системы контроля и аварийного оповещения (см. [7]). Кроме того, применение аммиака требует особых технологических приемов для обеспечения безопасности при его разливах и выбросах. Комплекс этих обстоятельств в значительной степени обесценивает преимущества использования аммиака и делает актуальным поиск альтернативных хладагентов. Поэтому рассмотрение хладона-22 как возможной замены аммиаку оправдано, а в перспективе переход к использованию сверхкритических жидкостей или применение эффекта Пельтье.

2. Моделирование зоны поражения при выбросе аммиака в атмосферу.

При разрушении оборудования, содержащего сжиженные опасные химические вещества (с температурой кипения ниже температуры окружающей среды) происходит их выброс в окружающую среду. Перегрев пролива жидкой фазы (ЖФ) приводит к ее вскипанию с образованием первичного газокapельного облака. Оставшаяся часть ЖФ проливается на подстилающую поверхность с последующим вскипанием и образованием вторичного облака [8–10]. Совместно они образуют зону химического поражения. В связи с огромными объемами производства аммиака, его хранение и переработка представляет наибольшую опасность (фактор риска даже выше, чем для хлора). Примеры аварий, вызвавших большой общественный резонанс, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Примеры аварий, связанных с утечкой жидкого аммиака.

Год и место аварии	Обстоятельства аварии	Пострадавшие и их число
1973, Южная Африка	Разрушение автоцистерны, образовалось облако длиной 450 м и шириной 300 м	Погибли 18 чел
1976, Хьюстон (Техас, США)	Авария автоцистерны, вылилось 19 т жидкого аммиака	Погибли 5 чел, пострадали 178 чел.
1977, Карталена (Колумбия)	Утечка аммиака	Погибли 30 чел, госпитализировано 22 чел.
1989, г. Ионава (Литва)	Разрушено хранилище, содержащее 10 тыс. т жидкого аммиака, образовалось озеро жидкого аммиака. В смеси с метаном возник пожар, продолжавшийся 3 суток. Зона химического заражения составила 400 км ² .	Погибли 7 чел., пострадали 57, эвакуировано 32 тыс. чел.

Зона химического заражения определялась по методике «Токси-2» [8]. Был проведен анализ последствий аварии для наиболее опасных условий: полное разрушение компрессора, инверсия, скорость ветра 1 м/с, температура $t = 18^{\circ}\text{C}$. Результаты моделирования последствий аварии на оборудовании для замораживания грунта (Масса жидкого аммиака – 924 кг) на открытом пространстве

представлены на рис. 1.

Ось координат X выбрана по направлению ветра. Показаны зоны со смертельной токсодозой (поражение 50 % персонала, сплошная линия) и с поражающей токсодозой для 50 % персонала (пунктирная линия). При расчете интенсивности испарения пролива аммиака также учитывались экспериментальные данные из [9, 10].

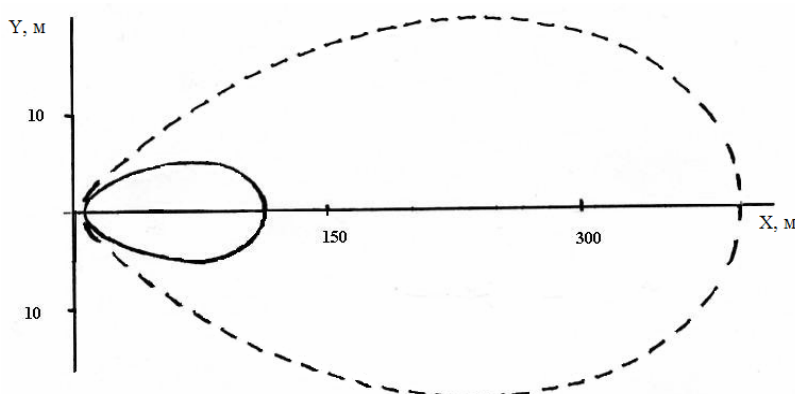


Рис. 1. Моделирование разрушения компрессора с жидким аммиаком (инверсия).

Таким образом, можно видеть, что последствиями аварии, связанной с разрушением оборудования, содержащего жидкий аммиак, могут стать отравление производственного персонала и угроза для их жизни. Опасный сценарий реализуется при плохом перемешивании слоев воздуха в условиях метеорологической инверсии. (Наиболее опасные последствия могут возникать в этих случаях при авариях на предприятиях по добыче углеводородного сырья). Поэтому необходим мониторинг состояния атмосферы, для реализации которого в РФ имеется соответствующий парк портативных газоанализаторов [11]. Для этой цели в МИТХТ им. М.В. Ломоносова разработаны высокочувствительные материа-

лы для газовых датчиков сенсорного типа [12, 13], пригодные для мониторинга низких концентраций аммиака в атмосферном воздухе.

3. Экологический анализ последствий воздействия аммиака

В результате воздействия выбросов аммиака возможно возникновение локальных изменений природно-техногенных экосистем, масштабы и интенсивность проявления которых зависит от конкретного соотношения инженерно-геологических и горно-технических параметров. Техногенные гидрогеологические и геоэкологические изменения сочетаются с воздействием аммиака на абиотические и биотические составляющие экосистем. В их числе могут быть:

- локальные изменения атмосферы изменения плотности и состава воздуха, появление аэрозолей, формирование тумана гидрата аммиака);

- воздействие на поверхностные водоёмы (изменение кислотно-щелочного баланса вод, увеличение содержания аммонийного азота, влияние на минеральный состав вод);

- при проливах аммиака на почву возникает ее резкое охлаждение (до -55°C и ниже) с формированием теплоизолирующей прослойки, проникновением вглубь почвы, взаимодействием со льдом и влагой и последующими химическими процессами с другими компонентами почвы). Биотические эффекты представлены в табл. 3.

Таблица 3. Воздействие аммиака на биотические составляющие экосистем [14, 15].

Виды воздействия	Характер воздействия	Мишень
Воздействие на почвенную микрофлору	Аммиак, связываясь с органическим веществом почвы, благоприятствует микробиологическому разложению органических компонентов почвы (особенно лигнина), увеличивает плодородие почвы.	Грибы, бактерии, актиномицеты
Воздействие на почвообитающих насекомых	Аммиак подавляет жизнедеятельность насекомых, вызывает гибель организмов с мягкими незащищенными кожными покровами. В зоне попадания оказывает губительное влияние, как на вредных, так и на полезных почвообитающих насекомых.	Насекомые с хитиновыми покровами и безхитиновые (черви, личинки, жуки, осы и др.)
Воздействие на растения	Изменяется кислотно-основной баланс почвы, увеличивается содержание усвояемого азота, изменяется видовой состав	Типичные растения тундровой зоны
Воздействие на мелких животных	Аммиак обладает дератизационным эффектом: $DL_{50} = 36 \text{ мг/л}$ (крысы), $DL_{50} = 6 \text{ мг/л}$ (мыши)	Мыши, лемминги, кролики и др.
Воздействие на обитателей водоёмов	В зимний период вызывает заморы рыб, в летний – изменение видового состава микрофауны, бурное разрастание водных растений.	Рыбы, земноводные, водные растения, одноклеточные.

4. Оценка влияния пролива аммиака на поверхность грунтов, проникновение в грунт и распространение в грунтовых водах

При проливе жидкого аммиака на твердую поверхность грунта сценарии физико-химических проявлений будут существенно различаться. В первую очередь, развитие событий будет определяться характером и состоянием поверхности грунта. Твердая, плотная, сухая, непористая площадка, как, например асфальтированная или бетонированная поверхность, при попадании жидкого аммиака послужит всего лишь поддоном, с которого он испарится в атмосферу, образуя токсическое облако (рис. 1). Иное дело – другие виды поверхности, представляющие собой либо естественный почвенный покров, подстилающие его породы, либо искусственный насыпной грунт. В этом случае развитие событий зависит от множества факторов. В их числе следует учитывать как термодинамические и химические свойства аммиака, так и физические и физико-химические свойства грунта: влажность, льдистость, минералогический состав,

структуру поверхности грунта и его профиль по глубине [1, 16]. При впитывании аммиака в грунт создаются предпосылки для проявления многообразных химических и физико-химических свойств аммиака. С учетом этих свойств может быть предложена следующая модель взаимодействия. При её реализации можно наблюдать три ступени развития процесса.

Первая (кратковременно протекающая) ступень – испарение жидкого аммиака с поверхности, связана с низкой температурой кипения (-33.4°C) и высокими значениями теплоёмкости ($38.1 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{K)}$) и энтальпии испарения (табл. 1). С поверхности проливов аммиак испаряется особенно бурно в период первоначального испарения. На испарение расходуется тепло верхнего слоя почвы/грунта. Это приводит к резкому и значительному охлаждению поверхностного слоя почвы (или грунта).

Скорость испарения в этот период очень сильно зависит от теплопроводности и пористости подстилающей поверхности. Например, для бута эта скорость примерно в 25 раз больше, чем для песка, и в 11 раз больше,

чем для средней почвы [17]. В результате охлаждения почвы ее теплопроводность снижается, и верхний слой приобретает свойство теплоизолирующей прослойки, препятствующей подводу тепла от глубинных слоев грунта. Определяющим фактором становится тепло атмосферного воздуха. Температура жидкого аммиака в результате испарения уменьшается (вплоть до -55°C и ниже), испарение замедляется и постепенно переходит в стационарный режим.

Вторая стадия развития процесса связана с явлением впитывания переохлажденного аммиака в почву и образованием водных растворов аммиака. Раствор аммиака может образовываться и при отрицательных температурах. При этом выделяется теплота реакций образования гидрата аммиака и нейтрализации им почвенных кислот, расходуемая на таяние льдистой фракции почвы – «растепление грунта». Характер первоначального впитывания определяется соотношением между капиллярно-гравитационным потоком жидкости и её испарением с фронта смачивания, которое, в свою очередь, зависит от проницаемости и влажности среды. Дальнейшее продвижение фронта концентрации растворов аммиака определяется величинами скорости фильтрации и коэффициента диффузии и является достаточно медленным процессом. Он сопровождается проявлением токсического действия на почвенные организмы и на обитателей природных вод (табл. 3). Распространение ореола загрязнения в грунтовых водах является длительным процессом (до 4-6 лет) [17], в течение которого необходим мониторинг санитарного состояния грунтовых вод.

Третья стадия процесса связана с химическими и физико-химическими взаимодействиями раствора аммиака с минеральными и органическими компонентами грунта. Действие жидкого аммиака, а также образовавшихся его водных растворов на эти составляющие грунта существенно нарушает его механо-физические характеристики.

Для прогнозирования развития этого процесса необходимо знание зонального распределения поверхностных геологического структур, а в выбранных районах освоения – структуры и минералогического профиля грунта по глубине. Структура грунта определяющим образом зависит от его минералогического состава. В зонах вечной мерзлоты преобладающими являются, в основном, осадочные породы: пески, супеси, суглинки и глины, покрытые биогенными

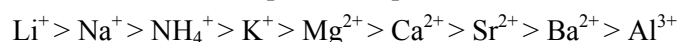
(заторфованными) грунтами. Пески представлены кварцем, различными формами кремнезема, мелкодисперсными фракциями гидрофобных минералов. Глины представляют собой породы сложного химико-минералогического состава, содержащие высокодисперсные частицы пластичных собственно глинистых минералов и различные непластичные примеси (кварц, полевые шпаты, слюды, гидроксиды железа, карбонаты и др.). Глинистые минералы представляют собой гидроалюмосиликаты разнообразного состава. К ним относятся, например, каолинит, составляющий основу каолинов, монтмориллонит – минерал примерно такого же состава, но содержащий в виде твердого раствора до 5% Fe_2O_3 , галлузит, а также гидрослюда, бейделлит, нонтронит, пирофиллит и др. Для глинистых минералов характерна слоистая структура, состоящая из чередующихся кремнекислородных и алюмокислородных слоев.

При смешении глины с водой и её растворами последовательно протекает ряд коллоидно-химических явлений, изменяющих физико-химические свойства системы и обеспечивающих образование коагуляционных структур [14]. Гидрофильные глинистые коллоиды, адсорбируют воду, образуя сольватную оболочку, состоящую из прочно связанного слоя адсорбционной воды, и диффузного слоя слабо связанной воды. Толщина сольватного слоя для различных минералов неодинакова (до 0.075 мкм) и зависит как от индивидуальных свойств минерала, так и от наличия различных электролитов в почвенном растворе. Сольватная вода имеет повышенную плотность, пониженные температуру замерзания и диэлектрическую постоянную. Такая вода теряет способность растворять находящиеся в глиняной суспензии вещества.

В результате, при насыщении глин водой она расходуется на: а) образование сольватных оболочек (прочно связанная вода); б) образование диффузных оболочек (рыхло связанная вода); в) заполнение объема между частицами породы (свободная или разжижающая вода). В монтмориллонитовых глинах вода особенно интенсивно проникает в межслоевое пространство, раздвигая пакеты молекулярной структуры глинистого минерала. Это обуславливает сильное набухание и образование высокопластичного глиняного массива. Минералы каолиновой группы связывают меньшее количество воды, удерживаемой на поверхности частиц, и дают менее пластичный материал. Минералы типа

гидроslюд отличаются частичным проникновением воды в межплоскостное пространство и занимают промежуточное положение.

Тонкие слои воды на поверхности глинистых частиц, проникая по микро-трещинам и микропорам, вызывают расклинивающее давление, диспергируя твердые частицы. Часть воды проникает внутрь структуры глинистых минералов, располагаясь между слоями их структуры, увеличивая расстояние между плоскостями ячеек. В итоге всех этих процессов происходит увеличение объема системы, т.е. наблюдается набухание глин, в основе которого лежит действие адсорбционных, осмотических и капиллярных сил. Вследствие набухания глина превращается в тестообразную массу, теряя свою механическую прочность. При попадании водных растворов в глинистые слои они приобретают пластичность, придающую глинистым массам свойство тиксотропности, т.е. способность приобретать подвижность при механических воздействиях, а затем вновь загустевать в состоянии покоя. Тиксотроп-



Чем активнее ионы в сорбированном комплексе, тем более объемны диффузные водные оболочки, окружающие глинистые частицы, и большее количество воды они поглощают из грунтовых растворов. Поэтому ионы аммония, образующиеся в результате взаимодействия аммиака с растаявшей водой, вытесняют из сорбированного слоя ионы, стоящие правее NH_4^+ в ряду замещения и вызывают разжижение глинистой массы.

Процесс разжижения протекает последовательно. Сначала – стабилизация глинистой массы происходит при введении электролита в количестве меньшем, чем может поглотить сорбированный комплекс глинистого материала. При этом идет обмен поглощенных материалом катионов на катионы электролита (ионы NH_4^+ в качестве разжижителя), и вследствие этого происходит разукрупнение присутствующих агрегатов – дефлокуляция. Дальнейшее увеличение концентрации разжижителя в грунтовых водах приводит к разжижению глинистой массы. Это вызывает уменьшение степени диссоциации поглощенного электролита ($\text{NH}_4^+ + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{H}^+$), вследствие чего уменьшается толщина слоя рыхло связанной воды, и часть её переходит в разжижающую свободную воду, в результате чего происходит разжижение глинистой массы. При последующем увеличении концентрации электролита (завершающая

ность может наблюдаться в течение неограниченного времени при сохранении основных свойств глинистой массы.

Разжижающее свойство воды может быть увеличено при попадании в грунтовые воды электролитов. Их действие основано на адсорбционной и ионообменной способности глинистых частиц. В нейтральных и слабощелочных средах у глинистых частиц преобладает отрицательный заряд, за счет чего глины приобретают способность адсорбировать положительные ионы из раствора. Природные и техногенные воды, контактирующие с глинами, содержат ионы различных растворимых солей, вследствие чего в состав адсорбционного комплекса входят различные катионы Ca, Na, Mg, Al и т.д. Адсорбционная способность этого комплекса определяется поверхностной активностью глинистого минерала и его поровой структурой. Способность глинистых частиц к обмену адсорбированных катионов в таком комплексе уменьшается с повышением заряда катиона в последовательности:

стадия процесса) – размер водных оболочек достигает критической величины, и они начинают слипаться в более крупные агрегаты (коагуляция). При этом часть свободной воды механически связывается, и вязкость глинистой массы увеличивается.

При проливе аммиака на реальную поверхность первым слоем, подвергающимся действию аммиака, является биогенный – почвенный слой. Для него характерно наличие гумусовых и фульвокислот, соли которых являются природным аккумулятором поливалентных ионов (Mg^{2+} , Ca^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} , Al^{3+} и т.д.), включая и токсичные (например, Pb^{2+}). Действие аммиака на эти природные соли приводит к вытеснению этих катионов из природных депозитов и увеличению их концентраций в грунтовых водах. Результатом этого является с одной стороны – увеличение разжижающего влияния грунтовых вод на нижележащие глинистые слои, с другой стороны – повышение концентрации токсических веществ в грунтовых водах. Суммарная степень выраженности этих изменений определяются фазовым и минералогическим составом грунтов и их структурой.

Из изложенного следует, что при оттаивании грунтов в результате действия аммиака возникают два противоположных процесса: 1) уплотнение (уменьшение

пористости при отжатию талой воды); 2) набухание, связанное с изменением структуры глинистых агрегатов. Следствием протекания и первого и второго процесса будет значительное увеличение коэффициента сжимаемости оттаявшего грунта (до нескольких раз) по сравнению с немерзлыми грунтами. То есть неблагоприятное действие аммиака на вечномёрзлые грунты заключается в: 1) его растепляющем действии за счёт теплоты реакции взаимодействия с льдистой фракцией; 2) разжижении глинистого грунта в результате адсорбционных и ионообменных равновесий на дисперсных частицах глинистых минералов; 3) загрязнении грунтовых вод ионами аммония и поливалентных элементов. Суммарно эти процессы приводят к ухудшению механических свойств грунта и загрязнению окружающей среды.

В итоге, при комплексном рассмотрении

различных аспектов использования аммиака в качестве хладагента для сохранения несущих свойств грунтов в зоне вечной мерзлоты может быть сделан вывод о существовании больших рисков возникновения неблагоприятных последствий выбросов и проливов аммиака на окружающую среду, разрушения строительных конструкций, обслуживающего персонала и местного населения. Минимизация этих рисков (создание систем контроля и оповещения, средств ликвидации и предупреждения чрезвычайных ситуаций) в значительной степени снижает привлекательность применения жидкого аммиака в качестве хладагента в пользу альтернативных хладагентов, среди которых в настоящее время наиболее привлекательным является хладон-22, а в перспективе – сверхкритические хладагенты типа жидкой углекислоты под давлением.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Цытович, Н. А. Механика мерзлых грунтов / Н. А. Цытович. – М. : ВШ, 1973. – 448 с.
2. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. – М. : Гос. Строит. Комитет СССР, 1990. – 58 с.
3. Минкин, М. А. Фундаментпроекту – 55 лет / М. А. Минкин, Е. М. Кольцов // Промышленное и гражданское строительство. – 2006. – № 9. – С. 30–32.
4. Иоффе, Д. М. Малые холодильные машины и торговое холодильное оборудование / Д. М. Иоффе, В. Б. Якобсон. – М. : Гос. изд. торг. лит., 1961. – 304 с.
5. Промышленные фторорганические продукты / Б. Н. Максимов [и др.]. – Л. : Химия, 1990. – 464 с.
6. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – М. : Изд. Стандартов, 1988. – 75 с.
7. ПБ 09-595-03. Правила безопасности аммиачных холодильных установок. – М. : ПИО ОБТ, 2003. – 47 с.
8. Методика оценки последствий химических аварий. (Методика «Токси». Редакция 2.2) : сб. документов № 2, серия 27. – М. : НТЦ Промбезопасность, 2001. – 57 с.
9. Цыкало, А. Л. Испарение и рассеивание аммиака при его разливах и утечках / А. Л. Цыкало, И. И. Стрижевский, А. Д. Багмет // Промышленность по производству минеральных удобрений. Серия : Азотная промышленность. – М. : НИИТЭХИМ, 1982. – 51 с.
10. Сравнительный анализ методик определения массы паров, образующихся при испарении пролива / С. М. Пестов [и др.] // Технология нефти и газа. – 2005. – № 1. – С. 22–25.
11. Исследование ассортимента газоанализаторов, представленных на российском рынке и предназначенных для мониторинга CO₂, SO₂, NO₂, NH₃ / Т. А. Хабарова, В. Д. Румянцева, Л. П. Маслов, А. В. Цой, Е. И. Хабарова // Вестник МИТХТ. – 2007. – Т. 2, № 1. – С. 82–86.
12. Маслов, Л. П. Резистивные полупроводниковые газовые каталитические сенсоры рецепторного типа / Л. П. Маслов, П. В. Ермуратский // Датчики и системы. – 2006. – № 8. – С. 1–4.
13. Патент 2172487 РФ, МКИ⁷ G 01 N 27/12. Датчик определения гидридов азота и их производных в газовых средах / Л. П. Маслов [и др.]. – № 98119436/28; заявлено 26.10.98; опубл. 20.08.01, Бюл. № 23.
14. Иванов, Ю. А. Хранение и транспортировка жидкого аммиака / Ю. А. Иванов, И. И. Стрижевский. – М. : Химия, 1991. – 80 с.
15. Пожарский, В. К. Жидкий аммиак – удобрение и реагент / В. К. Пожарский, В. М. Серов, В. Н. Чмулев. – Ставрополь : Изд. Кн., 1981. – 112 с.
16. Грунтоведение / В. Т. Трофимов [и др.]. – М. : Изд. МГУ, 2005. – 1024 с.
17. Магистральные аммиакопроводы / С. В. Нерпин [и др.]. // Тр. ГИАП. – 1978. – Вып. 51. – С. 43–66.