

Научная статья
УДК 614.83

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОВНЕЙ ТОКСИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ПРИ ВЫБРОСАХ АММИАКА НА ХИМИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ В РАЗЛИЧНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ (НА ПРИМЕРЕ АО «ВОРОНЕЖСИНТЕЗКАУЧУК»)

© СС ВУ Шишкин А. В.¹, Кочетова Ж. Ю.², Кузнецов И. Е.³

¹ Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»
394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54А, Российская Федерация
e-mail: tehchast55@mail.ru

² Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»
394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54А, Российская Федерация
e-mail: zk_yva@mail.ru; ORCID: 0000-0001-8838-9548

³ Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»
394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54А, Российская Федерация
e-mail: vaiumet@mail.ru; ORCID: 0009-0003-7526-2558

Поступила в редакцию 17.11.2024

После доработки 14.01.2025

Принята к публикации 05.02.2025

Аннотация

Цель. Повышение эффективности прогнозирования распространения аварийно химически опасных веществ (на примере выброса аммиака на предприятии I класса опасности, г. Воронеж) в различных метеорологических условиях и оценки опасности для населения путём интеграции программы расчёта токсических зон ALOHA и базы данных численности населения с учётом его плотности Maps.ie.

Процедура и методы. Алгоритмы ALOHA позволяют с высокой достоверностью прогнозировать распространение в воздухе токсикантов с учётом их физико-химических свойств; типа и масштаба аварии; подстилающей поверхности. Графическая интерпретация результатов моделирования наглядно показывает глубину и площадь распространения облака аварийно химически опасных веществ для 3 уровней токсической опасности. При использовании баз данных Maps.ie возможна точная оценка количества людей, нуждающихся в помощи и экстренной эвакуации при возникновении техногенной аварии.

Результаты. Проведена оценка потенциальных зон токсической опасности при возможной аварии на химически опасном объекте АО «Воронежсинтезкаучук». Рассмотрены различные сценарии аварии: утечка и гильотинный разрыв 10-тонной цистерны с аммиаком в зимний и летний периоды. Расчёты показали, что неблагоприятные условия развития чрезвычайной ситуации характерны при разрушении цистерны в жаркие сухие дни при слабой турбулентной атмосфере. В этих условиях радиус зоны потенциальной токсической опасности составляет 8,9 км, где проживает ~660 тыс. воронежцев, из них смертельной опасности подвергается ~4 тыс. человек на расстоянии 1,9 км от хранилища аммиака. Установлены наиболее неблагоприятные направления ветра, при которых подвергается опасности максимальное число людей. Так как апробация применяемых в работе алгоритмов на реальном объекте невозможна, было смоделировано распространение облака в результате уже свершившейся утечки аммиака. Модельные и известные из открытой печати сведения об аварии показали хорошую сходимость результатов.

Теоретическая и/или практическая значимость. Полученные закономерности распространения аварийно химически опасных веществ в воздухе с учётом особенностей подстилающей поверхности, метеорологических условий, характера, типа и масштаба аварии, а также применение алгоритмов для оценки численности уязвимого населения позволяют расширить теорию геоэкологического мониторинга потенциально химически опасных объектов.

Представленная схема интеграции алгоритмов ALOHA и базы данных численности населения Maps.ie может быть использована в качестве готового электронного руководства для лиц, принимающих решения при профилактике и возникновении чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: химия органического синтеза, аварийно химически опасные вещества, аммиак, прогнозное моделирование, экологический риск, ALOHA

DOI: 10.18384/2712-7621-2025-1-97-113

Original Article

FORECASTING TOXIC HAZARD LEVELS FOR AMMONIA EMISSIONS IN CHEMICAL PRODUCTION UNDER VARIOUS METEOROLOGICAL CONDITIONS (USING THE EXAMPLE OF VORONEZHSHYNTETZKAUCHUK JSC)

A. Shishkin¹, Zh. Kochetova², I. Kuznecov³

¹ Military Educational and Scientific Center of the Air Force of N. E. Zhukovsky
and Y. A. Gagarin Air Force Academy»
ul. Starykh Bolshevikov 54A, Voronezh 394064, Russian Federation
e-mail: tehchast55@mail.ru:

² Military Educational and Scientific Center of the Air Force of N. E. Zhukovsky
and Y. A. Gagarin Air Force Academy»
ul. Starykh Bolshevikov 54A, Voronezh 394064, Russian Federation
e-mail: zk_vva@mail.ru; ORCID: 0000-0001-8838-9548

³ Military Educational and Scientific Center of the Air Force of N. E. Zhukovsky
and Y. A. Gagarin Air Force Academy»
ul. Starykh Bolshevikov 54A, Voronezh 394064, Russian Federation
e-mail: vaiumet@mail.ru; ORCID: 0009-0003-7526-2558

Received 17.11.2024

Revised 14.01.2025

Accepted 05.02.2025

Abstract

Aim. Improving the efficiency of forecasting the spread of chemically hazardous substances (using the example of ammonia emissions at a chemically hazardous enterprise of hazard class I, Voronezh) in various meteorological conditions and assessing the danger to the population by integrating the ALOHA toxic zone calculation program and the population database, taking into account its density Maps.ie.

Methodology. ALOHA algorithms allow predicting the spread of toxicants in the air with high reliability, taking into account their physico-chemical properties, the type and scale of the accident, and the underlying surface. The graphical interpretation of the simulation results clearly shows the depth and area of the spread of a cloud of chemically hazardous substances for three levels of toxic hazard. When using databases Maps.ie It is possible to accurately estimate the number of people in need of assistance and emergency evacuation in the event of a man-made accident.

Results. An assessment of potential toxic hazard zones in the event of a possible accident at a chemically hazardous facility of JSC Voronezhshyntetzkaukhuk has been carried out. At the same time, various accident scenarios were considered – leakage and guillotine rupture of a 10-ton ammonia tank in winter and summer. Calculations have shown that unfavorable conditions for the development of an emergency situation are typical for the destruction of a tank on hot, dry days with a weak turbulent atmosphere. Under these conditions, the radius of the potential toxic hazard zone is 8,9 km, where ~660 thousand people live. Voronezh residents, of whom about 4 thousand people are in mortal danger at a distance of 1,9 km from the ammonia storage facility. The most unfavorable wind directions have been identified, in which the maximum number of people is at risk. Since it is impossible to test the algorithms used in the work on a real object, we simulated the spread of the cloud as a result of an already accomplished ammonia leak. The model and publicly available information about the accident showed good convergence of the results.

Research implications. The obtained patterns of the spread of chemically hazardous substances in the air, taking into account the characteristics of the underlying surface, meteorological conditions, the nature, type and scale of the accident, as well as the use of algorithms to estimate the number of vulnerable populations, make it possible to expand the theory of geoecological monitoring of potentially chemically hazardous objects. The presented scheme of integration of ALOHA algorithms and the population database Maps.ie It can be used as a ready-made electronic guide for decision makers in the prevention and occurrence of emergency situations.

Keywords: chemistry of organic synthesis, hazardous chemicals, ammonia, predictive modeling, environmental risk, ALOHA

DOI: 10.18384/2712-7621-2025-1-97-113

ВВЕДЕНИЕ

Аварии на химически опасных объектах (ХОО) характеризуются большим радиусом поражения и тяжестью последствий. По статистике, такие аварии чаще всего происходят по причинам отказа оборудования, ошибочных действий персонала, внешних воздействий природного и техногенного характера [14]. В последнее время возросла угроза террористических актов. Часто аварии приводят к гибели людей на самих предприятиях и масштабных территориях, прилегающих к ХОО [8]. Следует отметить, что предприятия находятся в населённых пунктах, которые обеспечивают их работниками. Многие объекты были построены несколько десятилетий назад. За это время количество жителей выросло, а устаревшее оборудование предприятий модернизируется не так быстро, как необходимо. Аварии на ХОО являются непредвиденными, поэтому единственным решением снижения их последствий к минимуму является быстрое и надёжное прогнозирование развития чрезвычайных ситуаций с целью выработки рекомендаций для лиц, принимающих решения.

Прогноз осложнен динамичностью и разнообразием факторов, влияющих на распространение аварийно химически опасных веществ (АХОВ). В литературе приводятся множество физико-математических моделей переноса облаков АХОВ от различных источников, базирующихся, в основном, на уравнениях массопереноса и требующих знания большого количества параметров [1; 2]. Эти модели, несомненно, представляют научный интерес, однако они редко применяются специалистами на практике, когда требуется своевременное принятие решений.

Эксперты в области управления рисками рекомендуют развивать существующие ком-

пьютерные инструменты, позволяющие достигать большей точности прогнозирования и скорости предупредительных мероприятий. В Российской Федерации разработаны несколько программных продуктов для оценки рисков при техногенных авариях на различных ХОО (программа «Определение зон заражения АХОВ (по СП 165.1325800)»; приложение «Выброс АХОВ» и др.). Широкими функциональными возможностями характеризуется программа «ТОХИ+6 Риск», разработанная «Научно-техническим центром исследований проблем промышленной безопасности»¹. Эти программы в основном применяются узким кругом специалистов для прогнозирования рисков при проектировании и модернизации предприятий. Для их использования требуется высококвалифицированный персонал и довольно обширный перечень входных данных. При ошибочном вводе некорректных исходных параметров программы работают неправильно. Новым этапом в развитии подобных инструментов являются программные продукты с обратной связью, позволяющие за кратчайшие сроки и с минимальным набором унифицированных исходных данных прогнозировать геометрию зон токсической опасности с учётом изменяющихся метеорологических параметров во время развития чрезвычайной ситуации.

К таким инструментам относится общедоступная программа ALOHA (*Areal Locations of Hazardous Atmospheres* – Географическое расположение опасных сред), которая позволяет

¹ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024613026 Российская Федерация. ТОХИ+6 Риск: № 2024611276; заявл. 24.01.2024; опубл. 07.02.2024 / А. С. Печеркин, С. А. Буйновский, А. С. Софьин [и др.]; заявитель ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности».

довольно точно проводить оценку сценариев распространения облака АХОВ при утечках или залповых выбросах, а также оценивать уровни токсической и пожарной опасностей на удалении от источника выброса [16; 21]. Программное обеспечение для оценки пространственных масштабов химической опасности разработано Национальным управлением океанических и атмосферных исследований в сотрудничестве с Агентством по охране окружающей среды (США). Это одна из наиболее распространённых программ, предназначенная для прогнозирования развития техногенных аварий. Информация, предоставляемая интегрированным приложением ALOHA и ГИС, используется для управления чрезвычайными ситуациями в режиме реального времени.

При возникновении химической аварии важно правильно оценить риски для населения на прилегающих к предприятиям территориях, которые рассчитываются как вероятность наступления нежелательного события (вред здоровью, смерть). В большинстве исследований для оценки риска используется модель однородного распределения населения по плотности [9; 10; 12]. Для повышения точности прогнозирования риска необходимо объединение модели распространения аварийно химически опасных веществ с географической информационной системой (ГИС), содержащей базу данных о количестве населения, плотности застройки, типе подстилающей поверхности.

Цель исследования – повышение эффективности прогноза распространения АХОВ (на примере аварийного выброса аммиака на химически опасном предприятии I класса опасности, г. Воронеж) при различных погодных условиях и оценки токсической опасности для населения путём интеграции программы ALOHA и базы данных ГИС.

В качестве примера для оценки токсической опасности для населения выбран аммиак – аварийно химически опасное вещество, широко используемое во многих отраслях химической промышленности и хранящееся на складах, как правило, в больших количествах. Предел воспламеняемости аммиака с воздухом составляет 15–28% объёмных, температура самовоспламенения – 650 °С [18]. Вероятность воспламенения смеси аммиака с воздухом в широком интервале темпера-

тур при нормальном атмосферном давлении очень мала, поэтому установки по производству и хранению аммиака не считаются пожароопасными, и в данной статье риски от пожара не рассматриваются.

Аммиак является высокотоксичным веществом, которое оказывает неблагоприятное воздействие даже на больших расстояниях от источника выброса. В воздухе населённых пунктов предельно допустимые концентрации (ПДК) аммиака составляют 0,04 и 0,2 мг/м³ (среднесуточная и максимально разовая соответственно). Порог восприятия запаха аммиака – 0,5 мг/м³ [7].

Проведём оценку токсической опасности для населения при возможной аварии на крупнейшем в Российской Федерации химически опасном предприятии I класса опасности АО «Воронежсинтезкаучук», расположенного в черте г. Воронеж (рис. 1).

На микроклимат городов и перемещение в них воздушных масс существенное влияние оказывают условия аккумуляции тепла, тепловой баланс и неоднородность подстилающей поверхности. Перечисленные факторы стараются учитывать при прогнозировании распространения токсичных облаков атмосферным воздухом. Однако это сопряжено с рядом трудностей, главная из которых – сложность моделирования баланса тепло-массообмена (включающего потоки тепла от подстилающей поверхности, воздуха, поступления с выброшенной жидкостью, фазовых переходов «пар-жидкость») в условиях неоднородности рельефа и шероховатости местности, застроек различной высоты и геометрии, высокой динамичности атмосферы [4; 19].

Воронеж находится в зоне умеренного климата, здесь ярко выражена сезонность. Летние заморозки при этом исключены, а климатическое лето охватывает первую часть октября. Количество солнечных дней в году – 158; средние годовые температура – +7,4 °С, влажность воздуха – 74%;, скорость ветра – 2,9 м/с. Погоду и климат формируют ветры западного, юго-западного, северо-восточного направлений, частота проникновения которых наибольшая. Роза ветров за многолетний период показывает, что преобладающими являются ветры западного и юго-западного направлений.

Территориальное размещение Воронежа на границе Среднерусской возвышенности

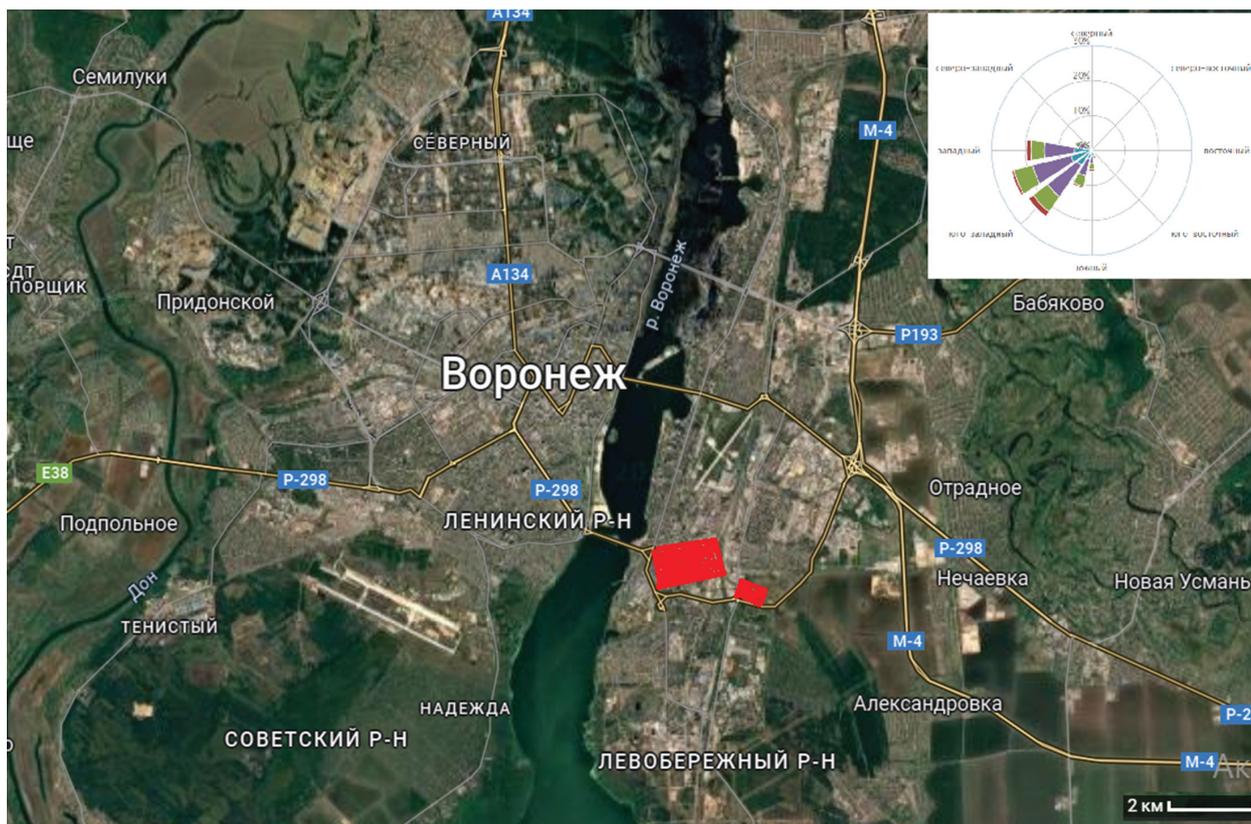


Рис. 1 / Fig. 1. АО «Воронежсинтезкаучук» (■) в структуре г. Воронежа и схематичное изображение преобладающего направления ветров / Voronezhskintezkauchuk (■) in the Voronezh city structure and a schematic representation of the prevailing wind direction.

Источник: Google Maps

и Окско-Донской низменной равнины своеобразно проявляется в термическом режиме города, что особенно заметно в зимний период (зима мягкая, умеренно морозная, с повышенной влажностью воздуха и устойчивым снежным покровом, который образуется только в январе). Летом же погода теплая и сухая, особенно в июле и первой половине августа [5].

Рельеф Воронежа контрастен: правобережная часть находится на поверхности второй и четвертой надпойменной террасы с абсолютными отметками от 100 до 160 м, левобережная (где находится предприятие) — на пониженной плоскоравнинной поверхности, постепенно переходящей в речную террасу [17]. Ветры, беспрепятственно пересекающие с востока равнинную территорию, задерживаются возвышенностью. Воздушные массы застаиваются, выхолаживая земную поверхность.

Солнечная радиация — ведущий фактор, определяющий тепловое состояние подсти-

лающей поверхности и прилежащих слоёв воздуха. Максимальное нагревание земной поверхности отмечается 22 июня при наибольшем угле наклона солнечных лучей и наибольшей продолжительности светового дня, минимальное — при наименьшем угле падения солнечных лучей и коротком световом дне (22 декабря). Годовая сумма солнечной энергии для Воронежа — 3 785 МДж/м², основная доля поступления которой приходится на тёплый весенне-летний период [5].

Тепловой баланс городской поверхности в значительной мере определяется скоростью её охлаждения или аккумуляции тепла. Проведённые ранее исследования позволили зонировать территорию города по характерным микроклиматическим особенностям в зависимости от функционального использования земель и типа подстилающей поверхности (в т. ч. здания и сооружения; много-, средне- и малоэтажные застройки; сады; зелёные насаждения; луговая и кустарниковая растительность; сельскохозяйственные тер-

ритории; промышленная зона; грунтовые, асфальтированные или железные дороги; локальные рельефные неровности; водная поверхность) [15].

С. А. Куролап и И. В. Попова установили микроклиматическую дифференциацию территории города для теплого периода (рис. 2,

табл. 1¹). Дифференциация актуальна для высоких летних температур, когда низкая рассеивающая способность атмосферы и приземная инверсия в ночное время способствуют возникновению дополнительных токсических рисков для населения центральной части города в случае аварии на ХОО.

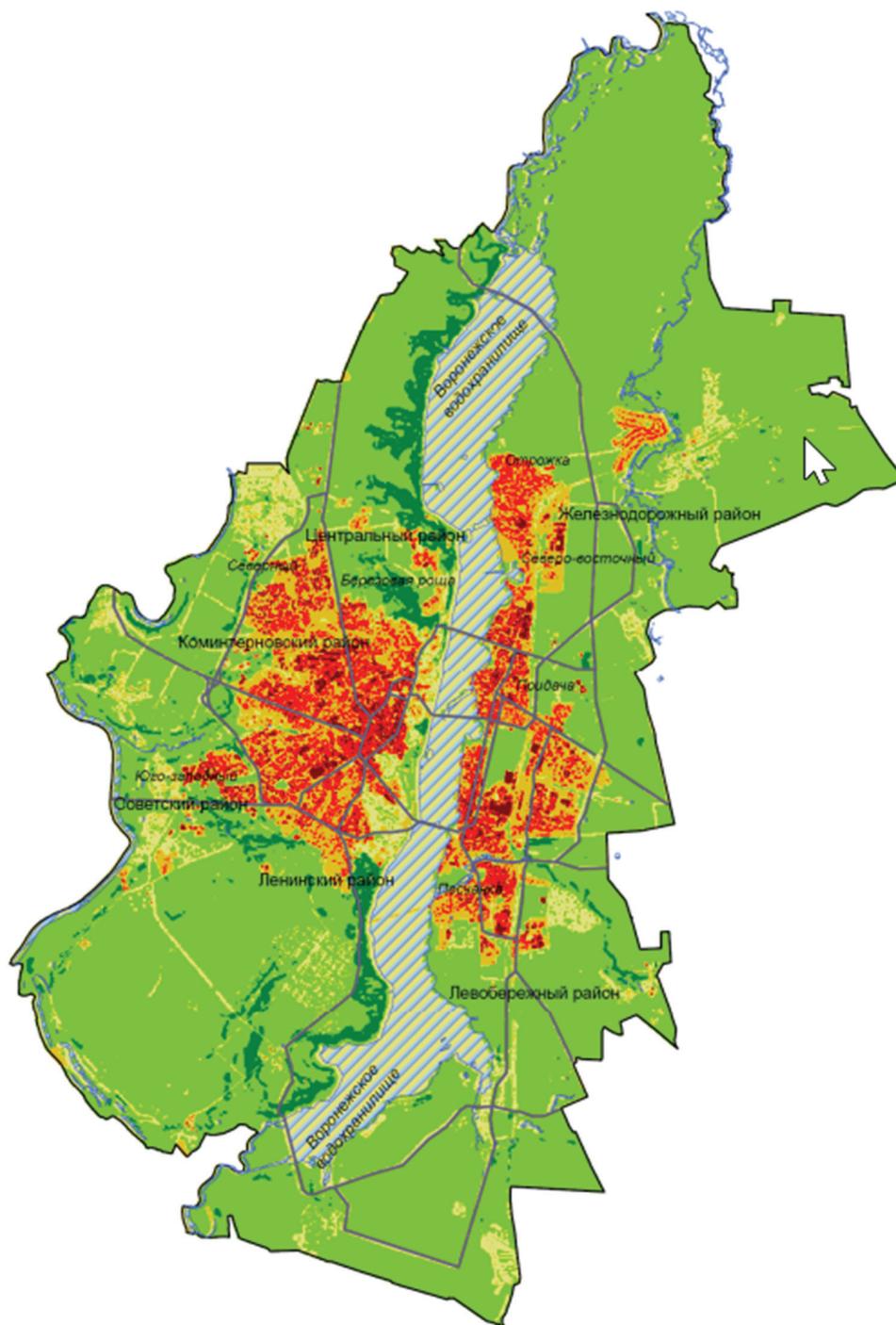


Рис. 2 / Fig. 2. Микроклиматическая дифференциация территории городского округа Воронежа / Microclimatic differentiation of the territory of the Voronezh city district

Источник: [15, с. 39]

¹ Условные обозначения к рисунку 2 и краткое описание установленных климатопов приведено в таблице 1.

Таблица 1/Table 1

Характеристики микроклиматических зон городской среды / Characteristics of microclimatic zones of the urban environment

Усл. обозначение	Преобладающие условия	Характеристика
	Холодный воздух, аэрационные коридоры	Участки с незначительной шероховатостью поверхности, наиболее активно участвующие в охлаждении и возникновении холодных потоков воздуха. Садово-парковый климатоп; аквальный климатоп в теплый период года; железнодорожный климатоп в ночное время суток
	Смешанный воздух, выраженное влияние аэрационных коридоров	Озеленённые участки, склоны, территория частной застройки, удалённая от источников загрязнения атмосферы. Селитебно-рекреационный климатоп
	Смешанный воздух, частая смена ветровых режимов от слабовыраженных аэрационных коридоров до перегретого слабоventилируемого воздуха	Участки застройки малой и средней этажности со средней степенью озеленения. Селитебный климатоп
	Перегретый слабо вентилируемый воздух	Промышленная зона, территория городской застройки с низкой степенью озеленения в центральной части города, сельскохозяйственные поля. Промышленный климатоп
	Сильно перегретый воздух, застойный воздух	Слабо-озеленённые участки плотной современной многоэтажной застройки, открытые площади и участки улично-дорожной сети в центральной части города. Транспортный железнодорожный климатоп в тёплое время года и при ясном небе

Источник: [15, с. 37]

Облако аммиака в зависимости от направления ветра может распространяться от источника выброса на территории с различными условиями, но большая часть жителей г. Воронежа находится зонах с перегретым, слабо вентилируемым или застойным воздухом. Анализ показывает, что само предприятие находится в зоне промышленного климатоп (промышленная, селитебная зоны), для которого характерен перегретый и слабо вентилируемый воздух, что повышает риски образования концентрированного облака и рассеяния его на большом удалении от источника.

АО «Воронежсинтезкаучук» ежегодно выпускает более 360 т синтетических каучуков и СБС-полимеров (термоэластопластов)¹. Предприятие расположено на 3 производ-

¹ Нормы технологического проектирования складов жидких средств химизации НТП-АПК 1.10.13.002-03. Утв. Министерством сельского хозяйства РФ 31 декабря 2003 г.; Официальный сайт АО «Воронежсинтезкаучук». Проектная документация. Режим доступа: <https://clck.ru/3MmVFh> (дата обращения: 03.11.2024).

ственных площадках: основное производство, установка первичной переработки бутадиена и производных бензола, установка очистки промышленных сточных вод производства синтетических каучуков. Хранилище аммиака расположено на севере производственной площадки 1. В случае аварийного выброса аммиака токсичное облако может распространиться на близлежащие жилые комплексы различной этажности. Как было показано выше, токсическая опасность для населения зависит от большого числа факторов, которые должны быть учтены при моделировании аварийной ситуации. Алгоритм проведения исследования и источники необходимых баз данных представлены на рисунке 3.

Таким образом, приведённые в статье исследования включают 3 основных этапа:

- 1) сбор данных для моделирования распространения облака АХОВ;
- 2) прогноз зон токсической опасности при распространении облака аммиака;



Рис. 3 / Fig. 3. Алгоритм оценки токсической опасности при аварии на химически опасном предприятии / The algorithm for assessing the toxic hazard in case of an accident at a chemically hazardous enterprise

Источник: составлено авторами

3) оценка численности населения в зонах токсической опасности.

СБОР ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОБЛАКА АХОВ

Программа АЛОНА выбрана для исследования благодаря возможности надёжного моделирования поведения в приземной атмосфере большого числа лёгких и тяжёлых газов, которые образуют облака АХОВ при утечках и выбросах из цистерн и трубопроводов. В программе предусмотрена возможность дополнять банк данных о свойствах химических соединений, поведение которых в атмосфере необходимо моделировать. Облака токсикантов распространяются в считанные минуты на большие расстояния, рассеиваются под действием ветра и турбулентности атмосферного воздуха, оседают на поверхности под действием гравитационных сил. В АЛОНА используется 2 подхода для прогноза переноса и рассеивания газовых облаков в атмосфере — Гауссово рассеивание в воздухе и рассеивание тяжёлых газов [3; 13]. На основе информации о свойствах химического вещества, метеопараметрах и характере выброса программа выбирает оптимальную методику расчёта.

1. Аммиак легче воздуха. Он хранится в резервуарах под давлением 2–8 кПа при тем-

пературе -33° молекулярная масса — 17,03 г/моль;

2. температура кипения — $(-33,35)^{\circ}$ давление паров при 20° концентрация насыщения в окружающей среде — 1 000 000 частей на миллион (100%).

Наиболее значимыми факторами, влияющими на рассеивание газовых облаков, являются скорость, направление ветра, температурная инверсия и атмосферная турбулентность (табл. 2). Температура и влажность оказывают меньшее влияние. Так как предсказать время и атмосферные условия на момент аварии невозможно, то в данной работе рассматривали 6 значительно различающихся по начальным условиям сценариев возможных аварий на предприятии АО «Воронеж-синтезкаучк».

При распространении химических соединений в воздухе класс вертикальной устойчивости атмосферы играет важнейшую роль, как в формировании облака, так и в его перемещении и осаждении. В приземном слое температура воздуха по мере увеличения высоты повышается. Чаще всего это инверсионный процесс, вызванный тем, что летом в безветренные ночи потоки воздуха от нагретой за день земной поверхности поднимаются вверх, а охлаждённый на высоте 20–40 м воздух опускается вниз. Задерживающий слой затрудняет вертикальное перемешивание воздуха,

Таблица 2 / Table 2

Метеорологические условия для моделирования выброса аммиака / Meteorological conditions for modeling ammonia emissions

Атмосферные параметры	Зима (ср.)		Зима (экстр.)	Лето (ср.)		Лето (экстр.)
	3-1	3-2	3-3	Л-1	Л-2	Л-3
Обозначение сценария	3-1	3-2	3-3	Л-1	Л-2	Л-3
Время	9:00	21:00	15:00	9:00	21:00	15:00
Скорость ветра, м/с	2,9	3,2	9,0	2,3	1,4	9,0
Температура, °С	-6,3	-5,5	-20,9	+20,4	+20,1	+35,0
Влажность, % относит.	87	85	35	62	63	15
Класс устойчивости атмосферы	B	D	D	B	A	C

Источник: составлено авторами с использованием архивных данных сайта Воронежской метеостанции (средние и экстремальные значения за январь и июнь 2013–2023 гг.)

поэтому под ним часто скапливаются пыль и водяные пары, формируются слои тумана или дыма. Инверсия не даёт распространиться облаку токсиканта по высоте, и образуются наиболее «подходящие» условия для сохранения и перемещения его высоких концентраций.

Для изотермии более свойственны стабильность температуры воздуха в некотором атмосферном слое и стабильные равновесные состояния воздуха. Изотермия типична для пасмурной погоды и, как правило, возникает в утренние и вечерние часы. Она так же, как и инверсия способствует длительному застою аэрозолей и паров токсичных соединений в промышленных зонах и населённых пунктах.

При неустойчивой атмосфере наблюдается конвекция – процесс вертикального перемещения тёплого воздуха вверх, а холодного (более плотного) – вниз. Обычно это явление наблюдается летом в дневные часы при безветренной и ясной погоде. Поднимающиеся

вверх потоки воздуха рассеивают облако токсичного вещества, разбавляют его и препятствует горизонтальному распространению.

Класс устойчивости в программе АЛОНА автоматически учитывается при вводе скорости ветра, облачности и солнечном излучении в соответствии с классификацией Паскуила (табл. 3). Шесть классов устойчивости (от А до F) характеризуют степень атмосферной турбулентности. Классы А, В, С связаны с инверсионными условиями атмосферы, возникающими, когда солнечная энергия нагревает земную поверхность, в результате чего газовые облака рассеиваются вместе с характерными восходящими и нисходящими потоками. Класс D обозначает нейтральное состояние стабильности (изотермия), при котором турбулентность, обусловленная ветровой динамикой, может привести к рассеиванию облаков на большее расстояние от источника выбросов.

Таблица 3 / Table 3

Класс устойчивости атмосферы по Паскуилу/ The stability class of the atmosphere according to Pasquale

Скорость ветра, м/с	День				Сумерки	Ночь		
	Интенсивность солнечного излучения					Уровень облачности (восьмые доли)		
	сильная	умеренная	слабая	сплошная		0–3	4–7	8
J	A	A-B	B	C	D	F	F	D
(2–3)	A-B	B	C	C	D	F	E	D
[3–5)	B	B-C	C	C	D	E	D	D
[5-6)	C	C-D	D	D	D	D	D	D
≥ 6	C	D	D	D	D	D	D	D

Источник: РД 52.18.717-2009. Методика расчета рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах. Обнинск: ГУ НПО «Тайфун», 2009. 123 с.

Как было показано выше, все современные модели, описывающие перенос загрязняющих веществ атмосферным воздухом, учитывают тип подстилающей поверхности, который оказывает значительное влияние на рассеивание загрязнений. АЛОНА предлагает 3 варианта в качестве исходных данных неровностей подстилающей поверхности: «открытая местность»; «город или лес»; «открытая вода». Мы рассматривали второй вариант, т. к. прилегающие к ХОО территории в основном относятся к промышленному и селитебному климатопам (табл. 1, рис. 2).

Для описания источника выброса аммиака в атмосферу использовали проектную документацию, приведённую на официальном сайте АО «Воронежсинтезкаучук»:

- тип резервуара – вертикальный цилиндрический с двойными стенками;
- масса АХОВ в резервуаре – 10 т;
- объём цистерны – 15,88 м³; цистерна заполнена аммиаком на 80%;
- состояние АХОВ – сжиженный газ с температурой (–33,2) °C высота утечки над землей – 1 м.

Случайный выброс аммиака из резервуара для хранения обычно происходит из-за неисправности оборудования, например, при разрыве ёмкости или неправильного расположения клапанов. Здесь рассматриваются оба варианта для всех 6 сценариев:

1. утечка – неправильное расположение клапана, при этом аммиак попадает в атмосферу через патрубок во время погрузочно-разгрузочных работ. Диаметр патрубка резервуара для хранения составляет 50 мм; предполагается, что через всё сечение патрубка химикат попадает в атмосферу;

2. мгновенный выброс аммиака при значительном разрушении цистерны (например, при падении на неё летательного аппарата).

ПРОГНОЗ ЗОН ТОКСИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ОБЛАКА АММИАКА

Для оценки численности населения, которое может оказаться в зоне токсического воздействия после аварийного выброса аммиака, использовали возможности Google Maps¹.

¹ Maps.ie: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.maps.ie/about-us.htm> (дата обращения: 12.12.2024).

Maps.ie позволяет создать радиус или любую геометрическую фигуру для оценки количества людей, проживающих в выбранной области. Этот инструмент для составления карт можно использовать для довольно точного определения численности населения в любой точке мира на основании изображений со спутников (классификация с помощью искусственного интеллекта жилых и нежилых зон, промышленных и рекреационных территорий, этажности застроек), переписи населения, кадастровых карт, находящихся в открытом доступе.

При попадании аммиака в атмосферу непосредственной опасностью для людей является его вдыхание. Уровень опасности – это концентрация химического вещества в атмосферном воздухе, приводящая к тем или иным неблагоприятным последствиям для здоровья человека при вдыхании АХОВ в течение 1 часа. В АЛОНА используются 3 уровня опасности вдыхания токсичных веществ: I – 30; II – 160; III – 1100 ppm. Для этих уровней опасности клинико-токсикологическая характеристика ингаляционного воздействия аммиака на основе зависимости «концентрация-эффект» в пересчёте на российские нормативы (ПДК_{мр}) может быть представлена следующим образом²:

I. *лёгкая форма отравления* – содержание аммиака в воздухе более 21,5 мг/м³, что соответствует 3,6 ПДК_{мр}. Вследствие сильного раздражения верхних дыхательных путей и глаз наблюдается слезотечение, сухой кашель, потеря обоняния, сухость в носу. Возможен отёк слизистых оболочек гортани и трахеи. Пострадавшие жалуются на снижение работоспособности, головную боль, раздражительность. Симптоматика через 2–3 недели без видимых остаточных явлений исчезает;

II. *отравление средней тяжести* – содержание аммиака более 112 мг/м³, что соответствует 107,5 ПДК_{мр}. Пострадавшие жалуются на затруднённое дыхание, у части людей индуцирующее страх смерти. Через несколько часов может развиваться цианоз. Выявляется острое глоточно-трахеальное воспаление. В течение 48–72 ч. после поражения состояние больного улучшается;

² Организация медицинского обеспечения населения при химических авариях: руководство / Г. П. Простакишин, И. В. Воронцов, Ю. С. Гольдфарб и др. М.: ВЦМК «Защита», 2004. 222 с.

III. *отравление тяжёлой степени* – содержание аммиака в воздухе более 786 мг/м^3 , что соответствует $3934 \text{ ПДК}_{\text{мр}}$. Через несколько минут после воздействия аммиака наступает мышечная слабость, возникают тетанические судороги. Резко снижается слуховой порог. В некоторых случаях пострадавшие сильно возбуждены, находятся в состоянии буйного бреда, не способны стоять. Возможен химический ожог глаз и верхних дыхательных путей. В первые минуты после поражения может наступить смерть от острой сердечной недостаточности или остановки дыхания. Чаще смерть наступает через несколько часов или дней после несчастного случая от отёка гортани или лёгких.

Каждый уровень опасности обозначен в программе АЛОНА в виде очерченной зоны, выделенной цветами. Зона опасности представляет собой область, в пределах которой уровень воздействия превышает уровень, вызывающий перечисленные выше симптомы. Пунктиром обозначается возможное изменение направления движения облака при заданных погодных условиях (рис. 4).

Сравнение результатов моделирования распространения облака аммиака в 12 различных сценариях показывает, что на глубину заражения территории в течение первого часа главным образом влияет характер аварийной ситуации: при мгновенном разрушении цистерны площадь заражённой территории в 2–3 раза больше, чем при утечке.

При изменении метеорологических условий значительные различия наблюдаются как в расстоянии воздействия, так и в ширине шлейфа. При сопоставимых скоростях ветра в летний период времени глубина заражения больше, чем в зимний, но при этом ширина шлейфа аммиачного облака гораздо меньше. Развитие чрезвычайной ситуации в ясную погоду и утренние часы опаснее, чем вечером из-за инверсии атмосферы. Это происходит из-за того, что аммиачное облако рассеивается вдали от источника выброса, что приводит к опасному токсическому воздействию на большее количество людей.

ОЦЕНКА ЧИСЛЕННОСТИ НАСЕЛЕНИЯ В ЗОНАХ ТОКСИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

Для оценки численности населения, жизнь и здоровье которого подвергаются потен-

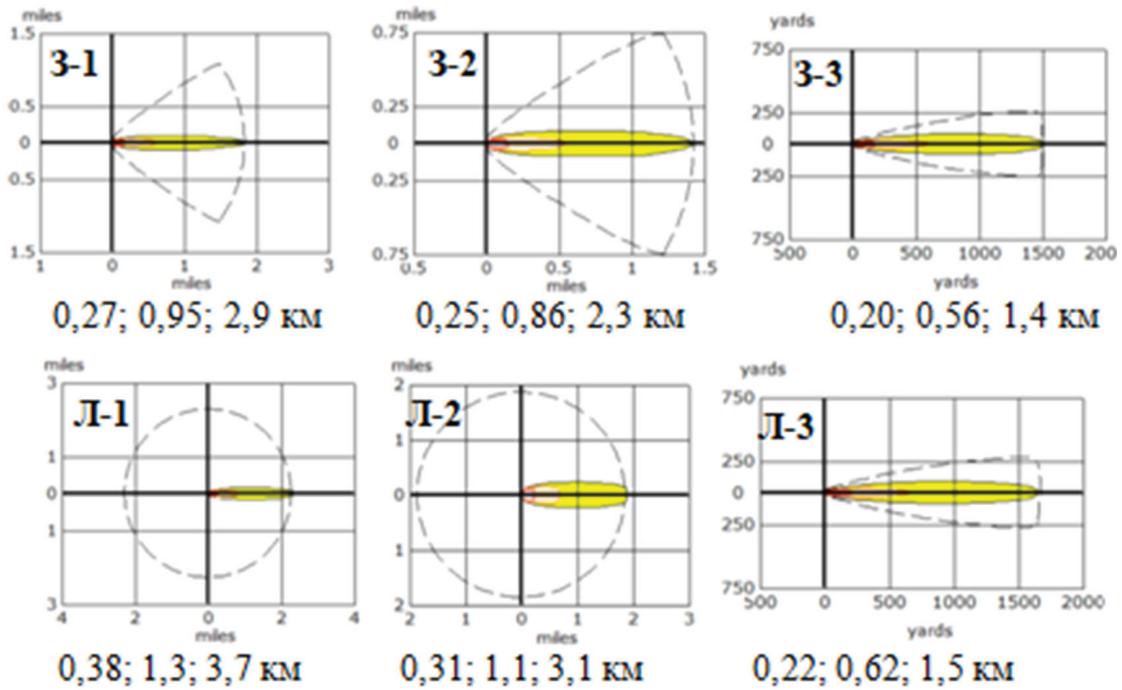
циальному риску, рассмотрим наиболее неблагоприятный сценарий развития чрезвычайной ситуации – разрушение резервуара с аммиаком в летний период (утро).

Средняя численность населения г. Воронежа на 2024 г. по оценкам составляет 1 046 425 чел., а его плотность – $1\,768 \text{ чел./км}^2$. Плотность населения в городе крайне неравномерна, зависит от наличия промышленных зон, зелёных насаждений, водных поверхностей, этажности застроек и многих других факторов. Более точно рассчитать плотность населения на отдельных участках города возможно с применением ГИС Maps.ie.

При применении прогностических метеорологических моделей, основанных на методах статистики и численного моделирования можно с некоторой достоверностью, которая зависит главным образом от долгосрочности прогноза и качества статистических данных, предсказать направление и скорость ветра в тот или иной период времени [6]. Но предсказать время самой аварии и изменения направления ветра в процессе развития аварийной ситуации невозможно, поэтому АЛОНА рассчитывает зону возможного заражения в зависимости от устойчивости атмосферы (пунктирная линия, рис. 4). Общая площадь заражённой территории при разрушении 10-тонной цистерны с аммиаком составляет $\sim 240 \text{ км}^2$. На этой территории, как показывает интерактивная карта, проживает 659 тыс. чел. В зоне высокой опасности (III), где содержание аммиака в воздухе может находиться на уровне летальных концентраций, на сегодняшний день проживают более 527 тыс. чел. (рис. 5).

При моделировании распространения облака аммиака с учётом преобладающего юго-западного ветра в зоне высокой токсической опасности (III) могут оказаться работники самого предприятия АО «Воронежсинтезкаучук», работники Воронежского акционерного самолётостроительного общества (ВАСО), а также часть Левобережного района, в котором расположены в основном 4-х и 5-ти этажные здания, где проживает $\sim 1,1 \text{ тыс. чел.}$ Во второй зоне находится большая часть территории ВАСО, часть испытательного аэродрома «Придача», а также частный сектор, в основном с 1- и 2-этажными застройками. На этом участке проживает $\sim 7 \text{ тыс. чел.}$ В первую зону опасности попадают участки микрорайонов

Утечка из клапана с диаметром 50 мм



Гильотинное разрушение цистерны

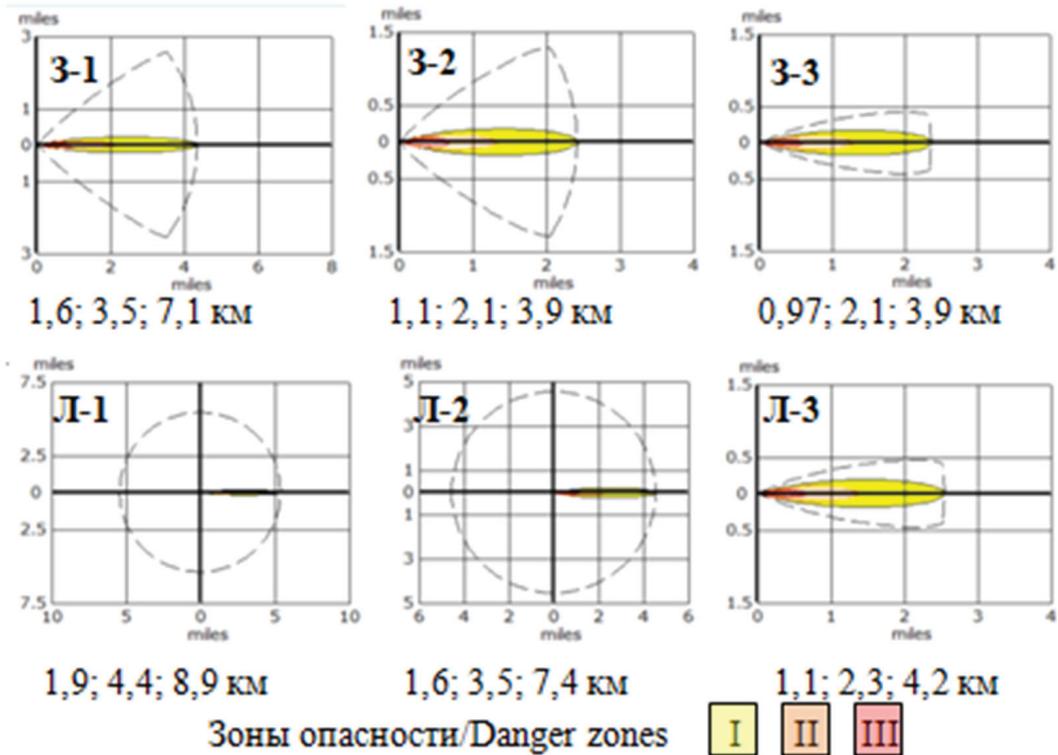
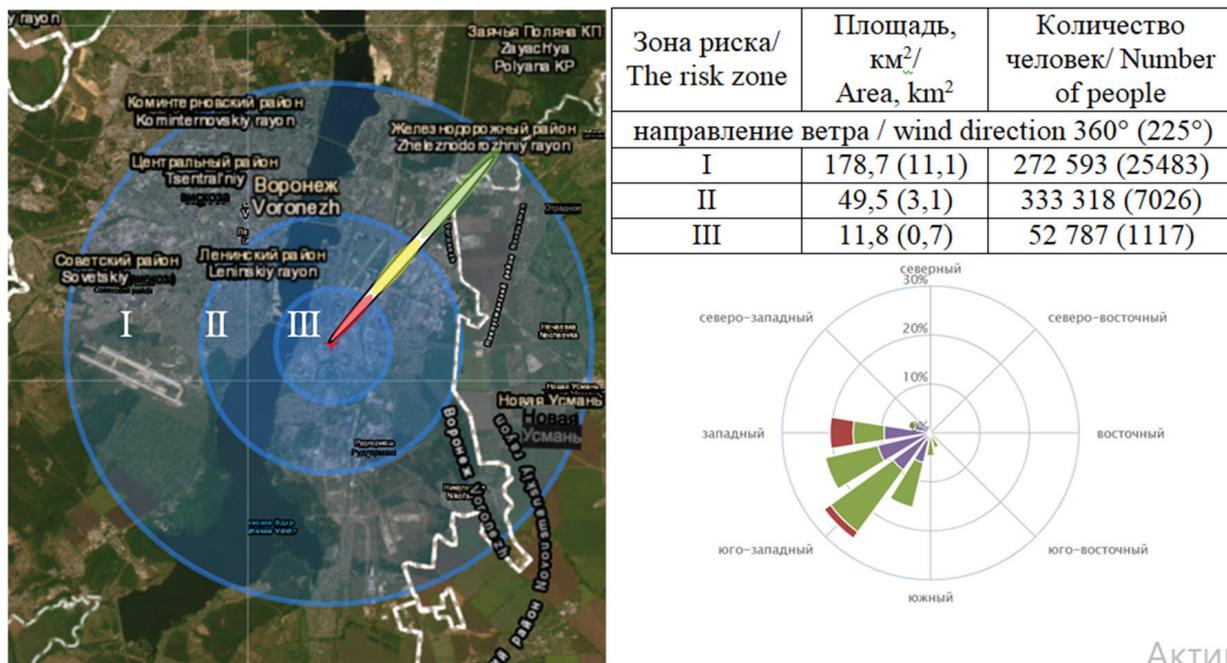


Рис. 4 / Fig. 4. Токсические зоны распространения облака аммиака при различных метеорологических условиях и типах аварии / Toxic zones of ammonia cloud propagation under various meteorological conditions and types of accidents

Источник: составлено авторами в программе ALOHA



Актив

Рис. 5 / Fig. 5. Зоны риска при любом возможном направлении ветра и с учётом розы ветров, нанесённые на карту плотности населения г. Воронежа / Risk zones in any possible wind direction and taking into account the wind rose, plotted on the population density map of Voronezh

Источник: составлено авторами с применением ГИС Maps.ie; архива сайта Meteo7.ru

ВАИ, Черёмушки, пос. Отрадное и с. Бабяково, а также крупная нефтебаза «Воронежнефтепродукт». Численность населения составляет более 25 тыс. чел.

По приведённому выше алгоритму рассчитали численность населения, которое подвергается потенциальному риску в условиях реализации сценария Л-1 при различном направлении ветра. Для этого карту, предоставленную ГИС Maps.ie, делили на 4 сектора, соответствующих юго-западному (ЮЗ), северо-

ро-западному (СЗ), северо-восточному (СВ) и юго-восточному (ЮВ) направлениям ветра. В выделенных секторах определяли количество населения (табл. 4).

Итак, в зоне отравления аммиаком тяжёлой степени пострадает больше людей, если токсичные облака будут двигаться в СВ и ЮВ направлениях. Второму и третьему уровням риска подвержено большинство населения, проживающее в СВ и СЗ направлениях от источника аммиака.

Таблица 4 / Table 4

Количество населения в зонах токсической опасности при реализации сценария выброса аммиака в экстремальных климатических условиях / The number of people in potential risk zones in the implementation of the ammonia emission scenario in extreme climatic conditions

Уровень риска	Концентрация аммиака в воздухе, мг/м ³	Количество населения, подвергающегося риску в секторе направления ветра				Критическое воздействие аммиака
		СВ	ЮВ	ЮЗ	СЗ	
I	J	36645	349015	165213	60293	Обратимое раздражение
II	≥112	25707	107779	81030	39510	В большинстве случаев обратимое раздражение
III	≥786	5829	3002	18507	10756	Возможна мгновенная смерть

Источник: составлено авторами с применением ГИС Maps.ie

Перенести хранилища АХОВ в менее населённые районы – сложное и дорогостоящее мероприятие. Поэтому для снижения потенциального риска возможно только строительство достаточно высоких защитных стен вокруг хранилища, предотвращающих рассеивание АХОВ за счёт подавления воздействия ветра; установление на территориях хранилищ автоматических форсунок для распыления воды.

Апробацию используемого подхода прогнозирования токсической опасности для населения при выбросах АХОВ при разгерметизации 10-тонной цистерны аммиака по понятным причинам провести невозможно. Для подтверждения правильности оценки производили расчёт распространения облака аммиака от утечки на трубопроводе «Тольятти-Одесса», произошедшей в июне 2015 г. на территории Терновского района Воронежской области. Расчётные и известные из открытой печати сведения об аварии показали хорошую сходимость [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из результатов моделирования распространения облака аммиака следует, что вид аварии (утечка или выброс), а также погодные условия играют решающую роль при распространении токсичного облака. В случае наилучшего сценария аварии на предприятии «Воронежсинтезкаучук» (тёплая солнечная погода, скорость ветра ~2 м/с, класс устойчивости атмосферы В), максимальный радиус зоны распространения облака составит 8,9 км, при этом потенциальному риску подвергается здоровье более 660 тысяч жителей города.

При оценке токсических рисков для населения г. Воронежа были показаны возможности программы АЛОНА для прогнозирования последствий техногенных катастроф, связанных с утечками и выбросами токсичных соединений. Из преимуществ этой программы надо отметить возможность моделирования многих сценариев выброса (распространения облаков токсичных газов, факельных по-

жаров, взрывов паровых облаков, пожаров в лужах) и оценки разных типов опасности (токсичности, воспламеняемости, теплового излучения и избыточного давления).

Программа способна минимизировать ошибки прогнозирования при вводе данных, т. к. перепроверяет входные значения и предупреждает пользователя, если значение маловероятно или физически невозможно. На сегодняшний день собственная библиотека АЛОНА насчитывает более тысячи химических веществ, поэтому пользователям не надо вводить большой блок данных о свойствах исследуемых токсикантов. Программа способна генерировать выходные данные как в текстовом, так и графическом варианте. Она не только создаёт схемы зон угроз, изменения силы источника во времени, но и даёт подробные описания к ним, выносит рекомендации о необходимости учёта пользователем дополнительных сценариев (возможности взрыва и пожара при заданных условиях, конденсации паров токсиканта).

Интеграция программы АЛОНА и технологий ГИС позволяет в сжатые сроки получить представление о численности населения, требующего срочной эвакуации в случае техногенной аварии. Поскольку ветер даже в очень короткие интервалы времени меняет своё направление, необходимо заранее оценить угрозу для населения в разных направлениях от хранилища АХОВ с целью обеспечения эффективной готовности и своевременной эвакуации людей.

Развитие этого исследования с использованием большего перечня сценариев по погодным и техническим параметрам хранения различных АХОВ может быть использовано в качестве готового электронного руководства для лиц, принимающих решения о снижении последствий техногенной аварии на химически опасных объектах. Применяемые в программе подходы к оценке метеорологических и технических условий не противоречат российским нормативным документам. Открытый доступ, обучение, удобство интерфейса, исключение ошибок при вводе параметров позволяют рекомендовать программу АЛОНА для широкого круга пользователей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агапова Е. А., Сумской С. И. Аналитический обзор математических моделей распространения облаков тяжелых газов // *Безопасность труда в промышленности*. 2017. № 5. С. 23–31. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-5-23–31.
2. Аксаков А. В. Моделирование распространения выбросов опасных веществ с облаками горячего газа в условиях промышленной и городской застройки // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2004. № 1. С. 46–52.
3. Бояршинов М. Г., Балабанов Д. С. Перенос и рассеяние воздушным потоком тяжелого газа, эмитированного точечным источником // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2010. № 3. С. 72–84.
4. Галеев А. Д., Кузнецов К. М., Поникаров С. И. Проверка математической модели распространения двухфазного выброса аммиака // *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. № 17 (22). С. 364–366.
5. Дмитриева В. А., Сушков А. И. Температурный режим Воронежской области в условиях меняющегося климата // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*. 2023. № 2. С. 56–63. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2023/2/56-63.
6. Заболотников Г. В., Веселкин М. Г. Использование международных авиационных метеорологических кодов METAR (SPECI) и TAF. СПб: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2006. 22 с.
7. Идентификация факторов риска при производстве синтетического каучука / Ю. И. Степкин, Н. П. Мамчик, Л. М. Ищенко, О. В. Каменева, Е. П. Гайдукова, В. И. Каменев // *Гигиена и санитария*. 2015. Т. 94. № 9. С. 33–35.
8. Иноземцев В. А., Серебренников Б. В. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // *Вестник Академии военных наук*. 2018. № 2 (63). С. 161–170.
9. Исаев В. С. Аварийно химически опасные вещества (АХОВ). Методика прогнозирования и оценки химической обстановки. М.: Военные знания, 2012. 54 с.
10. Кочетова Ж. Ю., Маслова Н. В., Базарский О. В. Авиационно-ракетные кластеры и окружающая среда: монография. М.: ИНФРА-М, 2022. 266 с.
11. Кочетова Ж. Ю., Шишкин А. В., Внукова С. В., Тронин А. Л. Программное обеспечение для моделирования распространения облака аммиака при разгерметизации трубопровода / *Физические основы наукоемких технологий. Материалы Всероссийской научно-методической конференции*. Воронеж: ВГЛУ, 2024. С. 56–62.
12. Малькова И. Л., Петров Д. В. Территориальный анализ канцерогенного риска здоровью населения г. Ижевска // *Наука Удмуртии*. 2021. № 1. С. 37–42.
13. Методы расчёта полей концентрации токсичных веществ и токсидоз при авариях на опасных химических объектах / А. В. Ильющонок, Н. С. Лешенюк, В. С. Отчик, В. М. Попов // *Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь*. 2013. Т. 2. № 18. С. 109–117.
14. Панасенко К. Н., Губриенко О. А. Анализ причин аварий на потенциально опасных химических объектах при использовании аммиака на предприятиях // *Форум молодых ученых*. 2022. № 5. С. 286–289.
15. Попова И. В., Куролап С. А. Анализ микроклимата городской среды: сборник научных статей «Экологическая оценка и картографирование состояния городской среды». Воронеж: Цифровая полиграфия, 2014. 167 с.
16. Применение программного обеспечения ALOHA в оценках пожарного риска / Ж. Н. Саласар, А. К. Чибас, А. В. Краснов, Ю. А. Гарсия, Л. Г. Абреу // *Нефтегазовое дело*. 2019. № 4. С. 56–70. DOI: 10.17122/ogbus-2019-4-56-70.
17. Серeda Л. О., Яблонских Л. А., Куролап С. А. Мониторинг эколого-геохимического состояния почвенного покрова города Воронежа // *Вестник Волгоградского государственного университета. Серия: Естественные науки*. 2015. № 2. С. 66–73. DOI: 10.15688/jvolsu11.2015.2.8.
18. Чалых М. В., Разиньков Н. Д. О некоторых особенностях обеспечения пожарной безопасности технологической линии ТЭП-50 на ОАО «Воронежсинтезкаучук» и возможностях уменьшения пожарного риска // *Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций*. 2015. № 1. С. 17–21.
19. Шатров А. В., Шварц К. Г. Численное моделирование атмосферных мезомасштабных процессов переноса примесей в окрестности города Кирова // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2010. Т. 3, № 3. С. 117–125.
20. Characteristics and prevention of road transport Liquefied Natural Gas (LNG) accidents / Junwei Zeng, Min Wang, Yufei Liu, Qian Yong-sheng // *Advanced Forum on Transportation of China*. 2011. DOI: 10.1049/cp.2011.1408.
21. Maruta M., Kułynycz V. ALOHA – modern tool for modeling the risks associated with the spread of volatile pollutants in extraction of hydrocarbons // *AGH Drilling Oil Gas*. 2016. № 33. P. 315–322. DOI: 10.7494/drill.2016.33.2.315.

REFERENCES

1. Agapova E. A., Sumskoy S. I. [Analytical review of mathematical models for the propagation of clouds of heavy gases]. In: *Bezopasnost truda v promyshlennosti* [Occupational safety in industry], 2017, no. 5, pp. 23–31. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-5-23-31.
2. Aksakov A. V. [Modeling of the spread of emissions of hazardous substances with clouds of hot gas in industrial and urban development]. In: *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Reports of the Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics], 2004, no. 1 (9), pp. 46–52.
3. Boyarshinov M. G., Balabanov D. S. [Transfer and scattering by air flow of heavy gas emitted by a point source]. In: *Vestnik Permskogo nacionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics], 2010, no. 3, pp. 72–84.
4. Galeev A. D., Kuznecov K. M., Ponikarov S. I. [Verification of the mathematical model of the propagation of two-phase ammonia emission]. In: *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2014, no. 17 (22), pp. 364–366.
5. Dmitrieva V. A., Sushkov A. I. [Temperature regime of the Voronezh region in a changing climate]. In: *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya* [Bulletin of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology], 2023, no. 2, pp. 56–63. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2023/2/56-63.
6. Zabolotnikov G. V., Veselkin M. G. *Ispolzovanie mezhdunarodnykh aviacionnykh meteorologicheskikh kodov METAR (SPECI) i TAF* [The use of international aviation meteorological codes METAR (SPECI) and TAF]. St. Petersburg, Rossijskij gosudarstvennyj gidrometeorologicheskij universitet Publ., 2006, 22 p.
7. Stepkin Yu. I., Mamchik N. P., Ishchenko L. M., Kameneva O. V., Gaidukova E. P., Kamenev V. I. [Identification of risk factors in the production of synthetic rubber]. In: *Gigiena i sanitariya* [Hygiene and sanitation], 2015, vol. 94, no. 9, pp. 33–35.
8. Inozemcev V. A., Serebrennikov B. V. [On the protection of the population and territories from natural and man-made emergencies]. In: *Vestnik Akademii voennykh nauk* [Bulletin of the Academy of Military Sciences], 2018, no. 2 (63), pp. 161–170.
9. Isaev V. S. *Avarijno himicheski opasnye veshchestva (AHOV). Metodika prognozirovaniya i ochenki himicheskoj obstanovki* [Emergency chemical hazardous substances. Methods of forecasting and assessment of the chemical situation]. Moscow, Voennye znaniya Publ., 2012, 54 p.
10. Kochetova Zh. Yu., Maslova N. V., Bazarskij O. V. *Aviacionno-raketnye klasteri i okruzhayushchaya sreda: monografiya* [Aviation and missile clusters and the environment: monograph]. Moscow, IN-FRA-M Publ., 2022, 266 p.
11. Kochetova Zh. Yu., Shishkin A. V., Vnukova S. V., Tronin A. L. [Software for modeling the propagation of an ammonia cloud during pipeline depressurization]. In: *Fizicheskie osnovy naukoemkikh tekhnologij. Materialy Vserossijskoj nauchno-metodicheskoy konferencii* [The physical foundations of high-tech technologies]. Voronezh, VGLU Publ., 2024, pp. 56–62.
12. Malkova I. L., Petrov D. V. [Territorial analysis of carcinogenic risk to the health of the population of Izhevsk]. In: *Nauka Udmurtii* [Nauka Udmurtia], 2021, no. 1 (93), pp. 37–42.
13. Ilyushonok A. V., Leshenyuk N. S., Otchik V. S., Popov V. M. [Methods of calculating fields of concentration of toxic substances and toxidosis in accidents at hazardous chemical facilities]. In: *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus* [Bulletin of the Command Engineering Institute of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus], 2013, vol. 2, no. 18, pp. 109–117.
14. Panasenko K. N., Gubrienko O. A. [Analysis of the causes of accidents at potentially hazardous chemical facilities when using ammonia at enterprises]. In: *Forum molodyh uchenykh* [Forum of Young Scientists], 2022, no. 5, pp. 286–289.
15. Popova I. V., Kurolap S. A. [Analysis of the microclimate of the urban environment]. In: *Sbornik nauchnykh statej «Ekologicheskaya ocenka i kartografirovaniye sostoyaniya gorodskoj sredy»* [Collection of scientific articles "Ecological assessment and mapping of the state of the urban environment"]. Voronezh, Cifrovaya poligrafiya Publ., 2014, 167 p.
16. Salasar Zh. N., Chibas A. K., Krasnov A. V., Garsiya Yu. A., Abreu L. G. [Application of ALOHA software in fire risk assessments]. In: *Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo»* [Online publication "Oil and gas business"], 2019, no. 4, pp. 56–70. DOI: 10.17122/ogbus-2019-4-56-70.
17. Sereda L. O., Yablonskih L. A., Kurolap S. A. [Monitoring of the ecological and geochemical state of the Voronezh city soil cover]. In: *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki* [Bulletin of the Volgograd State University. Series: Natural Sciences], 2015, no. 2, pp. 66–73. DOI: 10.15688/jvolsu11.2015.2.8.
18. Chalyh M. V., Razinkov N. D. [About some features of ensuring fire safety of the TEP-50 technological line at JSC Voronezhskintezkauchuk and the possibilities of reducing fire risk]. In: *Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidacii posledstvij chrezvychajnykh situacij* [Problems of ensuring safety in the aftermath of emergencies], 2015, no. 1, pp. 17–21.
19. Shatrov A. V., Shvarc K. G. [Numerical modeling of atmospheric mesoscale processes of impurity

- transfer in the vicinity of the city of Kirov]. In: *Vychislitel'naya mekhanika sploshnyh sred* [Computational mechanics of continuous media], 2010, vol. 3, no 3, pp. 117–125.
20. Junwei Zeng, Min Wang, Yufei Liu, Qian Yongsheng. Characteristics and prevention of road transport Liquefied Natural Gas (LNG) accidents. In: *Advanced Forum on Transportation of China*, 2011. DOI: 10.1049/cp.2011.1408.
21. Maruta M. Kułynycz V. ALOHA – modern tool for modeling the risks associated with the spread of volatile pollutants in extraction of hydrocarbons. In: *AGH Drilling Oil Gas*, 2016, no. 33 (2), pp. 315–322. DOI: 10.7494/drill.2016.33.2.315.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шишкин Алексей Викторович – адъюнкт кафедры радиотехнических систем (и средств обеспечения полётов) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»;
e-mail: tehchast55@mail.ru

Кочетова Жанна Юрьевна – доктор географических наук, доцент кафедры радиотехнических систем (и средств обеспечения полётов) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»;
e-mail: zk_vva@mail.ru

Кузнецов Илья Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, начальник кафедры гидрометеорологического обеспечения Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»;
e-mail: vaiumet@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey V. Shishkin – Adjunct, Department of Radio Engineering Systems (and Flight Support Equipment), Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy»; branch, Chelyabinsk;
e-mail: tehchast55@mail.ru

Zhanna Yu. Kochetova – Dr. Sci. (Geography), Assoc. Prof., Department of Radio Engineering Systems (and Flight Support Equipment), Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy»;
e-mail: zk_vva@mail.ru

Ilya E. Kuznecov – Dr. Sci. (Engineering), Prof., Departmentally Head, Department Hydrometeorological Support, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy»;
e-mail: vaiumet@mail.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Шишкин А. В., Кочетова Ж. Ю., Кузнецов И. Е. Прогнозирование уровней токсической опасности при выбросах аммиака на химическом производстве в различных метеорологических условиях (на примере АО «Воронежсинтезкаучук») // Географическая среда и живые системы. 2025. № 1. С. 97–113.
DOI: 10.18384/2712-7621-2025-1-97-113

FOR CITATION

Shishkin A. V., Kochetova Zh. Yu., Kuznecov I. E. Forecasting toxic hazard levels for ammonia emissions in chemical production under various meteorological conditions (using the example of Voronezhskintezkauchuk JSC). In: *Geographical Environment and Living Systems*, 2025, no. 1, pp. 97–113.
DOI: 10.18384/2712-7621-2025-1-97-113