

# Влияние метеоусловий, количества и свойств аварийно химически опасных веществ на параметры зоны химического заражения

**В.В. Сеницын**, канд. воен. наук, профессор,

**А.А. Кирсанов**, аспирант,

**Е.В. Кожемякина**, студент

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

e-mail: sinitsinivas@mail.ru

## Ключевые слова:

аварийно химически опасные вещества, фактическая зона химического заражения, физико-химические свойства веществ, степень вертикальной устойчивости воздуха.

*Работа посвящена исследованию влияния массы аварийно химически опасного вещества, его физико-химических свойств и метеоусловий в момент выхода вещества в окружающее пространство на величину фактической площади химического заражения. Исследования проводились с использованием программного обеспечения, реализующего "Методику прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте" (РД 52.04.253–90). Исследованиями установлено существенное влияние степени вертикальной устойчивости воздуха на величину фактической площади зоны химического заражения. С ростом температуры воздуха возрастает площадь заражения. В то же время усиление ветра ведет к снижению площади зоны химического заражения. Рост массы вещества, участвующего в аварии, ведёт к практически линейному росту фактической площади заражения. При одновременном исследовании двух веществ, незначительно отличающихся по массе и токсичности по отношению к хлору, при одинаковой массе и метеоусловиях выявлено, что величины фактических площадей химического заражения при плавном возрастании температуры воздуха резко меняются. При детальном исследовании этого явления установлено, что помимо метеоусловий, токсичности и массы веществ на основные характеристики зон заражения также влияют физико-химические свойства веществ: плотность по воздуху, летучесть и стабильность вещества при температурах.*

## 1. Введение

В случае чрезвычайной ситуации с выходом аварийно химически опасных веществ (АХОВ) в окружающее пространство образуется зона химического заражения, основными параметрами которой являются глубина распространения облака зараженного воздуха и площадь возможного и фактического заражения. В настоящее время существует довольно большое число математических моделей, описывающих процессы распространения примеси в атмосфере и загрязнения приземного слоя воздуха в чрезвычайных ситуациях с выбросом вредных веществ

при техногенных авариях (катастрофах) на химически опасных объектах. С точки зрения оповещения и защиты населения от поражающих факторов химического заражения при аварии с выбросом АХОВ в окружающее пространство и возникновении чрезвычайной ситуации (ЧС) наибольший интерес представляет математическая модель, реализованная в «Методике прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте» (РД 52.04.253–90) [1]. В настоящее время эта методика использует

ся в органах управления МЧС территориального и местного уровней.

Все расчеты по этой методике ведутся относительно эталонного вещества — хлора — при температуре воздуха  $20^{\circ}\text{C}$  и степени вертикальной устойчивости воздуха — инверсии. Приведение исходных данных — метеоусловий на момент аварии и характеристик конкретного вещества — к эталонным значениям осуществляется с помощью набора соответствующих табличных коэффициентов. В методике в табличном виде представлены сведения о 37 АХОВ, отнесенных Штабом ГО СССР к категории сильнодействующих ядовитых веществ. Указаны агрегатное состояние вещества в нормальных условиях (газ, жидкость), плотность в газообразном и сжиженном состоянии, токсичность по отношению к хлору и другие коэффициенты, необходимые для выполнения расчетов. Кроме того, представлены таблицы скорости переноса облака зараженного воздуха в зависимости от скорости ветра и степени вертикальной устойчивости приземного слоя атмосферы, а также глубина распространения зараженного воздуха в зависимости от скорости ветра и эквивалентной по отношению к хлору массы первичного (вторичного) облака.

## 2. Ход работы

Основная идея исследования заключалась в установлении закономерностей изменения параметров зоны химического заражения в зависимости от массы АХОВ и метеоусловий на момент аварии (температуры воздуха, скорости ветра и степени вертикальной устойчивости), а также физико-химических свойств веществ (токсичности и температуры кипения). Расчет значений выходных параметров зоны химического заражения производится по аналитическим зависимостям. Переменными служат масса АХОВ, соответствующие веществу табличные коэффициенты приведения физико-химических свойств вещества и метеоусловий к эталону, полученные в ходе расчётов значения глубины заражения первичным и вторичным облаком, а также глубина переноса облака зараженного воздуха, обусловленная скоростью ветра и степенью вертикальной устойчивости воздуха.

Исследование зависимостей, реализованных в рассматриваемой методике, показали, что основным параметром, характеризующим последствия ЧС с выходом АХОВ в окружающее пространство, является площадь зоны фактического заражения. Глубина зоны заражения, полученная в ходе расчетов, служит входной переменной для определения

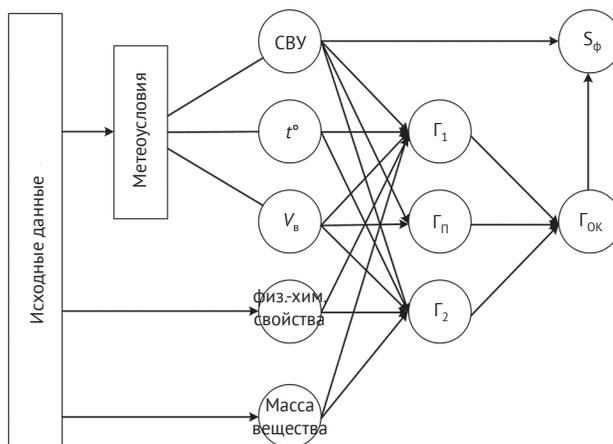


Рис. 1. Граф влияния исходных данных на основные параметры зоны химического заражения

площади зоны фактического заражения. Анализ функциональных зависимостей и вычислительного алгоритма методики [1] позволил представить структуру влияния исходных данных на основные параметры зоны химического заражения в виде графа (рис.1).

Для проведения вычислительного эксперимента разработано программное обеспечение для ЭВМ [2], позволяющее выполнять исследование для постановки различных задач.

### *Влияние температуры и степени вертикальной устойчивости воздуха в приземном слое*

Исследования проводилось относительно хлора, принятому в методике в качестве эталонного вещества. Расчеты выполнены в предположении свободного разлива на подстилающую поверхность 10 т вещества. Время прогноза соответствует продолжительности заражения, т. е. времени полного испарения вещества. Скорость ветра в приземном слое принята равной 4 м/с, что позволило расширить результаты исследования, так как в этом случае предоставляется возможность оценить, наряду с изменением температуры, влияние степени вертикальной устойчивости воздуха в приземном слое на величину исследуемого параметра. Исследования выполнены для интервала температур  $[-40^{\circ}\text{C}; +40^{\circ}\text{C}]$ .

Результаты исследования (рис. 2) показывают, что с ростом температуры воздуха площадь зоны фактического заражения возрастает, обусловленная интенсивностью испарения вещества. При этом существенное влияние на величину площади заражения оказывает степень вертикальной устойчивости воздуха. Наибольшие значения зоны фактического заражения достигаются при инверсии.

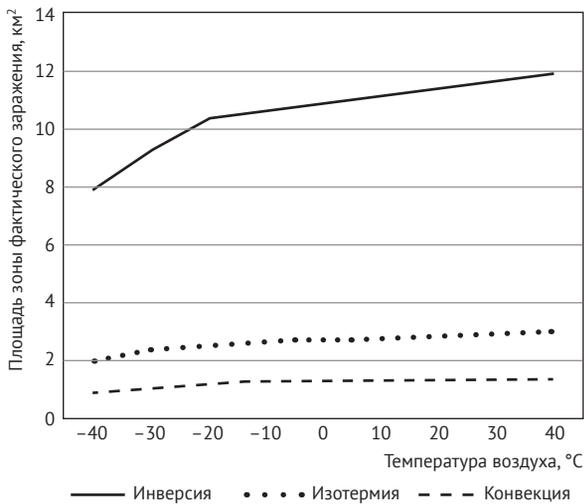


Рис. 2. Влияние температуры и степени вертикальной устойчивости воздуха на величину фактической площади зоны химического заражения (хлор, 10 т, свободный разлив)

*Влияние скорости ветра и степени вертикальной устойчивости воздуха*

Исследования проводились при тех же исходных данных: хлор, масса 10 т, свободный разлив на подстилающую поверхность, время прогноза соответствует продолжительности испарения, температура воздуха +20С. Чтобы одновременно показать влияние степени вертикальной устойчивости воздуха, исследование проводилось в интервале скорости ветра от 1 м/с до 4 м/с. Результаты исследования представлены графиками зависимости площади фактического заражения местности с увеличением скорости ве-

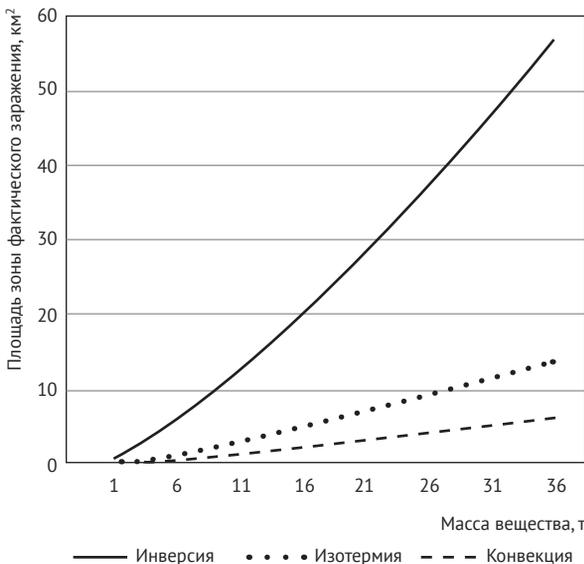


Рис. 4. Влияние массы АХОВ на площадь зоны фактического заражения

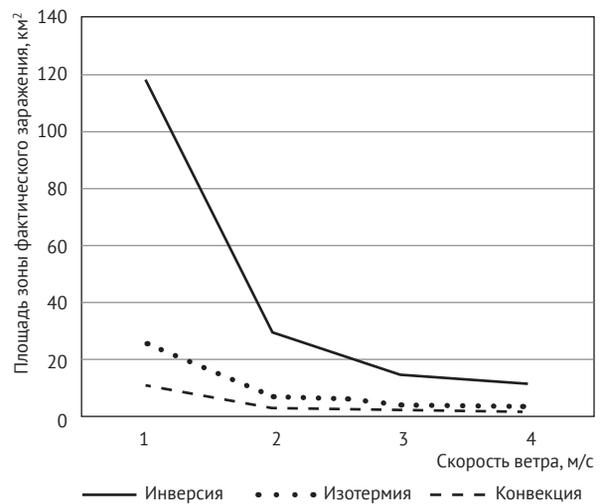


Рис. 3. Влияние скорости ветра на площадь зоны фактического заражения

тра для каждой степени вертикальной устойчивости воздуха (рис. 3).

При скорости ветра выше 4 м/с в приземном слое воздуха наступает изотермия, обусловленная активным перемешиванием воздушных масс. Очевидно, что увеличение скорости ветра более 5 м/с не изменит характер исследуемой зависимости. С увеличением скорости ветра существенно уменьшается фактическая площадь химического заражения, а также глубина зоны химического заражения.

*Влияние количества вещества при аварии*

Зависимость площади фактического заражения от массы АХОВ, вышедшего в окружающее пространство, исследовано на примере хлора при трёх степенях вертикальной устойчивости приземного слоя воздуха. Результаты исследований (рис. 4) показывают практически линейное увеличение площади зоны фактического заражения с ростом массы АХОВ при аварии. Одновременно еще раз подтверждено, что самая неблагоприятная с точки зрения возможных последствий — авария на химически опасном объекте с выходом опасных веществ в окружающее пространство при скорости приземного ветра не более 4 м/с и степени вертикальной устойчивости воздуха — инверсия.

*Сравнение значений фактической зоны химического заражения для газа и жидкости*

Номенклатура АХОВ содержит как газы, так и жидкости, т.е. вещества, отличающиеся агрегатным состоянием при атмосферном давлении. При этом газы хранятся в сжиженном состоянии под

давлением собственных паров либо изотермически. Очевидно, что сжиженные газы при выходе в окружающее пространство будут испаряться быстрее, чем жидкости. Чтобы выяснить характер изменения величины площади заражения при одинаковых метеоусловиях для сжиженного газа и жидкости, был проведен вычислительный эксперимент попарного сравнения величины зоны химического заражения двух наиболее распространенных в промышленности веществ — сжиженного аммиака (под давлением) и нитрила акриловой кислоты (жидкость). Этот выбор обусловлен еще и тем, что в рассматриваемых состояниях сжиженный аммиак и нитрил акриловой кислоты незначительно отличаются по плотности, однако существенно отличаются как температурой кипения, так и токсичностью по отношению к хлору (табл. 1).

Наиболее интересные результаты были получены при исследовании зависимости фактической площади зоны химического заражения при изменении температуры (рис. 5).

На графике видно, что в начальном периоде повышения температуры наблюдается пересечение значений исследуемых величин. Это обусловлено тем, что с ростом температуры увеличивается интенсивность испарения жидкости, в то время как испарение аммиака уже практически закончилось. В рассматриваемом эксперименте доминирующее влияние на величину фактической площади зоны химического заражения оказывает токсичность вещества.

#### Влияние физико-химических свойств АХОВ

Удачная программная реализация [2] «Методики...» [1], обеспечившая выполнение исследова-

Таблица 1  
Физико-химические характеристики АХОВ

АХОВ	Плотность, т/м <sup>3</sup>	Температура кипения, °С	Токсичность по отношению к хлору	Масса, т
Аммиак, сжиженный газ под давлением	0,681	-33,42	0,04	20
Нитрил акриловой кислоты (НАК)	0,806	77,3	0,8	20

ний, позволила после соответствующей доработки применить разработанный программный продукт для оценки влияния физико-химических свойств АХОВ на основные параметры зоны химического заражения. С точки зрения исследования влияния физико-химических свойств вещества на основные параметры зоны химического заражения наибольший интерес представляют пары веществ, незначительно отличающиеся по токсичности и температуре кипения. Для поиска таких пар предложена метрика

$$\rho(p_i, p_j) = \sqrt{(K_{zi} - K_{zj})^2 + (T_i - T_j)^2},$$

где  $K_z$  — отношение пороговой токсодозы хлора к пороговой токсодозе АХОВ, табл. №14 «Методики...» [1];

$T_i$  — температура кипения АХОВ, табл. №14 «Методики...» [1].

Результаты выборки из списка АХОВ по предложенной метрике позволили выбрать пару веществ

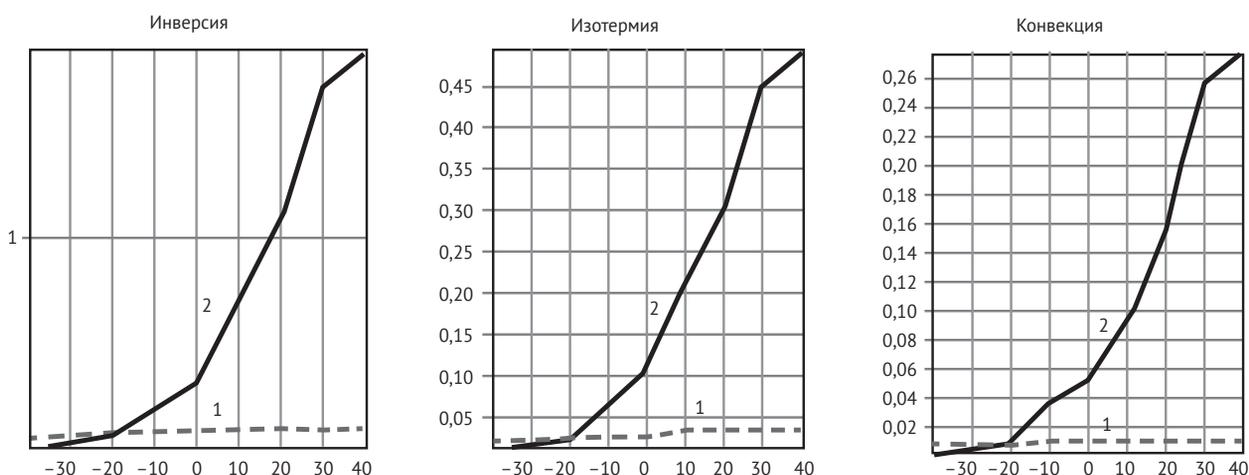


Рис. 5. Влияние температуры и степени вертикальной устойчивости на величину зоны фактического заражения (1 — аммиак; 2 — нитрил акриловой кислоты)

Таблица 2

Пара АХОВ, близких по токсичности и температуре кипения

Вещество	Токсичность по отношению к хлору (K <sub>3</sub> )	Температура кипения, С°	Метрика, ρ
Диметиламин	0,5	6,9	0,9613
Метилмеркаптан	0,353	5,95	

с наименьшим отклонением по токсичности и температуре кипения (табл. 2).

Исследования зависимости площади фактического заражения от массы пролитого в результате аварии АХОВ, а также от скорости ветра показали незначительную разницу полученных значений. В то же время, при рассмотрении графиков зависимости площади фактического заражения от температуры воздуха было отмечено нехарактерное пересечение графиков (рис. 6).

Такое пересечение говорит о том, что расчет фактической площади заражения по коэффициентам, предлагаемым Методикой прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте [1], неточный, а, следовательно, требуется углубленное изучение данного вопроса.

Подобные расхождения в результатах расчета для схожих веществ наталкивают на следующую идею: «Поведение вещества, разлившегося в результате аварии, во многом должно определяться структурой этого вещества, его физико-химическими свойствами». Попробуем объяснить полученные в данном исследовании результаты именно с точки зрения данного тезиса.

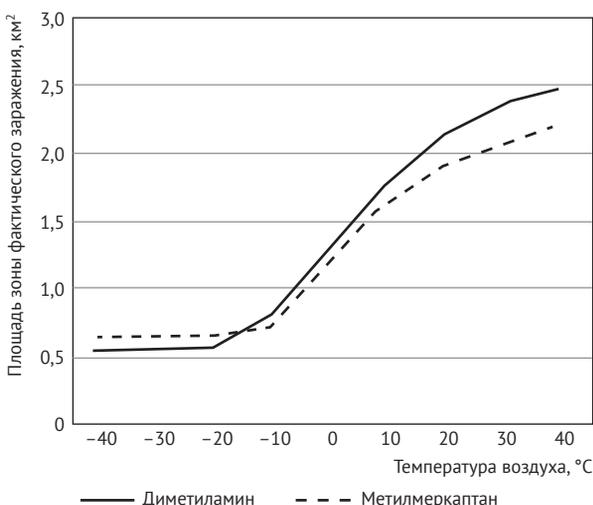


Рис. 6. Зависимость площади фактического заражения от температуры воздуха для пары веществ диметиламин-метилмеркаптан

### 3. Анализ выявленных закономерностей

Основным фактором распространения загрязнения при разливе АХОВ являются токсичность вещества и метеоусловия, сопровождающие аварию, в результате которой произошел вылив АХОВ. Ранее производилось исследование влияния именно этих условий на характеристики зон заражения АХОВ. Однако в ходе рассмотрения графиков зависимости пар схожих веществ *были обнаружены нетривиальные пересечения*. Объясним данное явление, опираясь на некоторые физико-химические свойства веществ. Рассмотрим, какие процессы происходят при разливе производимого или транспортируемого АХОВ (рис. 7):

- утечка АХОВ в виде газа или жидкости (самостоятельного вещества или сжиженного газа);
- растекание АХОВ по открытой местности. В случае перевозки сжиженного газа (перевозка осуществляется под большим давлением) имеет место переход АХОВ в газообразное состояние;
- распространение газообразного АХОВ вследствие обыкновенной диффузии;
- возможна деструкция веществ вследствие взаимодействия АХОВ с воздухом (одни вещества могут быть химически более устойчивыми, чем другие).

Все вышеперечисленные процессы для различных АХОВ будут протекать со своими особенностями, вследствие наличия у них следующих свойств.

*Плотность по воздуху* — отношение плотности одного вещества к плотности воздуха. Таким образом, это величина показывает, во сколько раз вещество плотнее воздуха.

*Летучесть (фугитивность)* — термодинамическая величина, используется для описания свойств реальных газовых смесей, свойство жидких и твердых веществ переходить в газообразное состояние. Мера летучести — концентрация насыщенного пара данного вещества при рассматриваемой температуре.

*Стабильность вещества при температуре* — термодинамическая величина, характеризующая способность вещества взаимодействовать с другими веществами при определенных температурах. Иными словами, это величина, зависящая от температуры, которая показывает, насколько устойчиво состояние вещества при непосредственном контакте его с другими веществами.

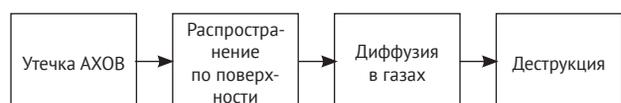


Рис. 7. Последовательность процессов, сопровождающих аварию с АХОВ

Растекание	Испарение, диффузия	Деструкция
Плотность по воздуху	Плотность по воздуху	Стабильность при температурах
Стабильность при температурах	Фугитивность (летучесть)	Фугитивность (летучесть)

Рис. 8. Влияние физико-химических свойств АХОВ на разных этапах заражения

Наглядно покажем влияние данных свойств на различных этапах заражения (рис. 8):

Проведем сравнение диметиламина и метилмеркаптана по относительной плотности по воздуху (табл. 3).

Исходя из приведенных расчетов, относительная плотность по воздуху метилмеркаптана незначительно выше, чем диметиламина. Следовательно, сделать вывод о влиянии данного свойства на параметры зон заражения АХОВ достаточно сложно.

Проведем сравнение диметиламина и метилмеркаптана по фугитивности (летучести). Опираясь будем на то, что чем выше давление паров вещества, тем легче оно испаряется, а, следовательно, более легколетучий (табл. 4). Давление насыщенных паров индивидуальных жидкостей при фактической температуре определяются по уравнениям Антуана:

$$\lg(P) = A - \frac{B}{T}, \quad (1)$$

$$\lg(P) = A - \frac{B}{T + C}, \quad (2),$$

где:  $P$  — давление насыщенного пара, в мм рт. ст.;

$T$  — абсолютная температура, град. К;

$t$  — температура в °С;  $A, B, C$  — коэффициенты [4].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте. РД 52.04.253–90. СПб., 2000.
2. Курсанов А.А., Сеницын В.В. Программное обеспечение исследования влияния массы, метеоусловий, токсичности и физико-химических свойств АХОВ на параметры зоны химического заражения. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015662165 18 ноября 2015 г.
3. Никольский Б.П., Григоров О.Н., Позин М.Е. Справочник химика. М.: Госхимиздат, 1967, т. 1, с. 694.

Таблица 4  
Данные для расчета давления насыщенного пара [4]

Вещество	Уравнение	Температурный интервал, °С		A	B	C
		от	до			
Диметил-амин	—	—	—	—	—	—
Метил-меркаптан	(2)	-51,28	+5,97	6,18911	1030,117	240,289

Расчетное давление насыщенного пара для метилмеркаптана при температуре  $T = 5$  °С:

$$\lg(P) = A - \frac{B}{T + C} = 6,18911 - \frac{1030,117}{5 + 240,289} = 1,99$$

В нашем случае диметиламин нелетучее вещество, он распространяется в виде тумана. Сравнивая ситуации, в которых могла произойти утечка рассмотренных АХОВ (при прочих равных условиях), отметим, что фактическая площадь химического заражения диметиламином больше, чем метилмеркаптаном. Так как последний более летучий, он не задерживается в больших концентрациях возле поверхности земли, как это происходит с диметиламином. Именно этим можно объяснить, что при определенных температурах графики зависимости фактической площади химического заражения с ростом температуры для рассмотренных АХОВ пересекаются, показывая неоднородность поведения данных веществ при их утечке. Значительное влияние на характеристики зоны заражения оказывают не только их токсичность вещества и метеоусловия, сопровождающие утечку АХОВ, но и физико-химические свойства вещества.

Таблица 3  
Расчет относительной плотности по воздуху сравниваемых веществ

Вещество	Формула для расчёта	Молярная масса вещества	Относительная плотность
Метилмеркаптан $\text{CH}_3\text{SH}$	$D_{\text{возд}}(\text{газа}) = \frac{M(\text{газа})}{M(\text{воздуха})}$ , где $M(\text{воздуха}) = 28,98$ (г/моль)	$M(\text{CH}_3\text{SH}) = 48,11$ (г/моль)	1,66
Диметиламин $(\text{CH}_3)_2\text{NH}$		$M((\text{CH}_3)_2\text{NH}) = 45,08$ (г/моль)	1,55

## REFERENCES

1. Official Document 52.04.253-90. Highly toxic substances infection's the extent forecasting the method in case of accidents (destruction) on chemically hazardous objects and transport. St. Petesburg, 2000 (in Russian).
2. Sinitcyn V.V., Kirsanov A.A. The software of research of influence of mass, weather conditions, toxicity and physic-chemical properties of hazardous chemicals on the parameters of the zone of chemical contamination. Certificate of state registration of computer programs No. 2015662165. Rospatent, 2015 (in Russian).
3. Nikolsky B.P., Grigorov O.N., Pozin M.E. Guide of chemical. Goskhimizdat Publ., 1967, vol. 1, p. 694 (in Russian).

## Research of the Influence of Meteorological Conditions, Quantity and Physic Chemical Properties of the Hazardous Chemical Substances on the Basic Parameters of Chemical Contamination Zone

V.V. Sinitsin, Candidate of Military Sciences, Professor, Bauman Moscow State Technical University

A.A. Kirsanov, Postgraduate Student, Bauman Moscow State Technical University

E.V. Kozhemyakina, Student, Bauman Moscow State Technical University

*The work is devoted to the study of influence of mass emergency chemically hazardous substances, the physic chemical properties and weather conditions at the time of release of substance into the environment on value actual area of chemical contamination. The studies were carried out using software that implements «Highly toxic substances infection's the extent forecasting the method in case of accidents (destruction) on chemically hazardous objects and transport». Research has shown a significant impact on the value of the actual area of the zone of chemical contamination to the degree of vertical stability of air. With the increase of temperature increases the area of infection. At the same time, the wind leads to a decrease in the area of the zone of chemical contamination. The increasing mass of the substances involved in the accident, leads to an almost linear growth of the actual area of infection. With the simultaneous study of two substances is slightly different in mass and toxicity to chlorine at the same weight and the weather conditions revealed an interesting phenomenon: the magnitude of the actual area of chemical contamination, at a smooth temperature increase of the air change dramatically. A detailed study the phenomenon found that in addition to weather conditions, toxicity and mass of substances on the basic characteristics of the infected areas is also affected by the physic and chemical properties of substances: density of air, buoyancy and stability of the substance at temperatures.*

**Keywords:** emergency chemically hazardous substances, actual area of chemical contamination, physic chemical properties of substances, degree of vertical stability air.

### Атомные станции малой мощности и плавучие АЭС

Более 60% территорий северных и дальневосточных регионов России не входит в систему централизованного энергоснабжения. Энергетическая безопасность и условия для устойчивого социально-экономического развития отдаленных российских регионов могут быть обеспечены путем широкого применения энергетических установок малой мощности, в частности, атомных станций малой мощности (АСММ) и плавучих атомных теплоэлектростанций (ПАТЭС).

Россия обладает приоритетом в разработке малогабаритных атомных энергоустановок как «традиционного» водо-водяного типа (КЛТ-40С), так и перспективных на быстрых нейтронах с жидкометаллическим свинцово-висмутовым теплоносителем (СВБР-100). Эти разработки используют опыт создания ЯЭУ боевых кораблей, АПЛ и атомных ледоколов, основанный на наличии уникальных ядерных технологий, в частности, технологии реакторов на промежуточных нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем. В настоящее время завершается создание первой в мире ПАТЭС «Академик

Ломоносов» на основе судовой реакторной установки КЛТ-40С водо-водяного типа (головной разработчик ОАО «ОКБМ Африкантов»). Установленная электрическая мощность двух РУ составляет 70 МВт, тепловая мощность — до 300 Гкал/час; реакторы могут также использоваться в системе опреснения морской воды. Основными достоинствами ПАТЭС являются: мобильность; возможность размещения практически в любой береговой зоне, в том числе в районах высокой сейсмической активности и вечной мерзлоты; отсутствие необходимости в развитой береговой инфраструктуре; высокий уровень экологической и радиационной безопасности (после окончания эксплуатации ПАТЭС береговые сооружения могут быть утилизированы до состояния «зеленой лужайки»).

ПАТЭС спроектированная так, чтобы устоять перед цунами и землетрясениями, подобно тем, что стали причиной катастрофы на Фукусиме (2011), будет размещена на российском Крайнем Севере — Чукотке и начнет производить электроэнергию в 2020 году.