

*В.В. СОЛОВЕЙ*, докт. техн. наук, ИПМаш НАН Украины,  
*О.В. ДАВИДЮК*, ЗАО «Северодонецкий ОРГХИМ», г. Северодонецк,  
*А.В. КОШЕЛЬНИК*, канд. техн. наук, ИПМаш НАН Украины

## **ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ВЗРЫВО-, ПОЖАРО- И ТОКСООПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

У роботі виконаний аналіз питань підвищення рівня промислової безпеки для взриво-, пожежно- і токсонебезпечних об'єктів хімічної промисловості. Показано, що застосування сучасних методів аналізу ризику аварій дозволить вирішувати завдання підвищення рівня безпеки більш ефективно. Розроблені алгоритм, математична модель і методика реалізовані у вигляді автоматизованого розрахункового комплексу, ефективність застосування якого показана на прикладі існуючого хімічного заводу з виробництва мінеральних добрив.

In clause questions of increase of a level of industrial safety for explosive-, firedangerous industrial targets are analyzed. It is shown, that application of modern methods of the analysis of risk of failures will allow solving a problem of increase of a level of safety more effectively. Developed the algorithm, mathematical model and a technique are realized in the form of the automated settlement complex which efficiency of application is shown on an example of an existing chemical plant on manufacture of mineral fertilizers.

**Постановка проблемы.** Повышение уровня безопасности взрыво-, пожаро- и токсоопасных промышленных объектов является актуальной проблемой и ее решение особенно востребовано морально и физически изношенными основными производственными фондами Украины. В данном аспекте количественная оценка риска аварий на сегодняшний день является резервом возможностей экономически обоснованного и технически эффективного повышения уровня промышленной безопасности.

**Анализ опубликованных материалов.** Проблеме эффективной реализации процедуры анализа риска аварий уделяется большое внимание, как в странах СНГ, так и за рубежом [1 – 5]. При этом акцент выполняемых работ стоит как на решении задачи прогнозирования возможных аварий, так и на разработке адекватных моделей оценки тяжести негативных последствий. Однако лишь немногие авторы указывают на возможность и необходимость применения методов количественной оценки риска аварий при определении технически и экономически эффективных мероприятий, направленных на повышение уровня безопасности.

**Постановка задачи и методы решения.** Решение обозначенной проблемы предполагает разработку алгоритма комплексной количественной оценки риска аварий и соответствующей математической модели. Численная реализация алгоритма и модели в виде автоматизированного расчетного комплекса предоставит тот инструментарий, посредством которого станет возможным решение следующих подзадач: определение наиболее опасных факторов и составляющих объекта; оценка уровня опасности объекта и анализ результатов; разработка мероприятий по уменьшению опасности объекта; оценка эффективности рассматриваемых мероприятий по повышению уровня безопасности и подготовка рекомендаций.

Учитывая многофакторность проводимого анализа и существенные различия между промышленными объектами разработка единого алгоритма и математической модели позволит унифицировать и формализовать сложную процедуру повышения уровня безопасности взрыво-, пожаро- и токсоопасных промышленных объектов.

В рамках проведения научных исследований в области управления промышленной безопасностью была разработана методика эффективного повышения уровня промышленной безопасности. Ниже будут представлены ее отдельные основные положения.

Управление состоянием промышленной безопасности не может быть эффективным, если в его основе не используется системный подход [6]. Необходимость применения системного подхода определена тем важным обстоятельством, что опасности аварий характеризуются вектором из двух составляющих:

- мерой возможности реализации негативного воздействия;
- тяжестью последствий негативного последствия.

Методикой предусматривается выполнение пяти основных этапов:

- установление наиболее опасных факторов и составляющих объекта;
- оценка уровня опасности объекта и анализ результатов;
- разработка мероприятий по уменьшению опасности объекта;
- оценка эффективности рассматриваемых мероприятий по повышению уровня безопасности и подготовка рекомендаций;
- реализация запланированных мероприятий.

Фактически расчетно-аналитический блок методики сводится к нахождению вектора опасности объекта до и после разработки защитных мероприятий.

Критерием комплексной оценки вектора опасности служит понятие риска аварий. Математически риск интерпретируется как математическое ожидание негативных последствий, определяемое как произведение величины тяжести последствий (количество погибших или пострадавших человек, или величина материального ущерба) и вероятность их реализации. Временным интервалом оценки, как правило, служит 1 год. Суммирование таких произведений с учетом того, что подразумевается под тяжестью последствий (количество погибших или материальный ущерб), позволяет получить: ожидаемое количество погибших за 1 год (коллективный риск); ожидаемый материальный ущерб за 1 год (имущественный риск). Построив диаграммы коллективного и имущественного рисков для каждого сценария аварии, можно будет определить наиболее опасные сценарии и составляющие промышленного объекта. Далее, согласно разработанной методики, определяются мероприятия [5], направленные на:

- снижение меры возможности реализации негативного воздействия (группа А);

- уменьшение тяжести последствий негативного воздействия (группа Б).

К мероприятиям группы А относятся:

1) исключение или уменьшение количества операций по управлению технологическим процессом, выполняемых в ручную, оснащение производств автоматизированными системами управления технологическим процессом, в том числе замена запорной и регулирующей арматуры с ручным приводом на управляемые дистанционно;

2) дублирование наиболее важных точек контроля параметров технологического процесса (температура, давление, расход, концентрация и др.);

3) оснащение системами акустико-эмиссионного мониторинга состояния основного металла и сварных соединений технологического оборудования и трубопроводов (предупреждение быстрого разрушения, утечек);

4) подготовка и аттестация обслуживающего персонала, проведение учебных тревог и др.;

5) другие мероприятия, определяемые для каждого объекта индивидуально.

К мероприятиям группы Б относятся:

1) обеспечение персонала средствами индивидуальной защиты;

2) исключение фактора физического перегрева обращаемого вещества (особенно это актуально для сжиженных газов: аммиака, этилена, пропилена,

пропана, бутана);

3) оснащение быстродающей отсечной арматурой;

4) другие мероприятия, определяемые для каждого объекта индивидуально.

Необходимые алгоритм и математическая модель были разработаны и численно реализованы в виде автоматизированного расчетного комплекса [4, 7]. Эффективность применения разработанной методики была оценена при анализе риска аварий и разработке мероприятий по повышению уровня промышленной безопасности для существующего химического завода по производству минеральных удобрений. Анализ показал, что основная опасность данного объекта определяется наличием на заводе большого количества жидкого аммиака, доставляемого в железнодорожных цистернах и хранимого в шаровых и горизонтальных резервуарах под давлением от 4 до 15 атм. (более 3 тыс. т.) (рис. 1 и рис. 2).

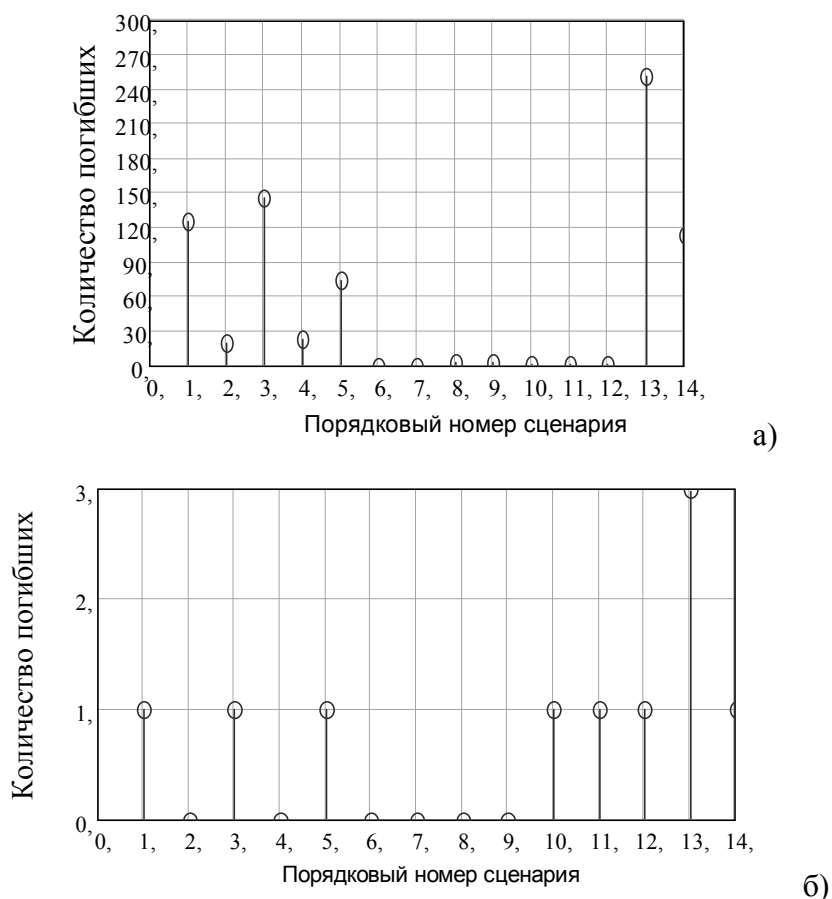
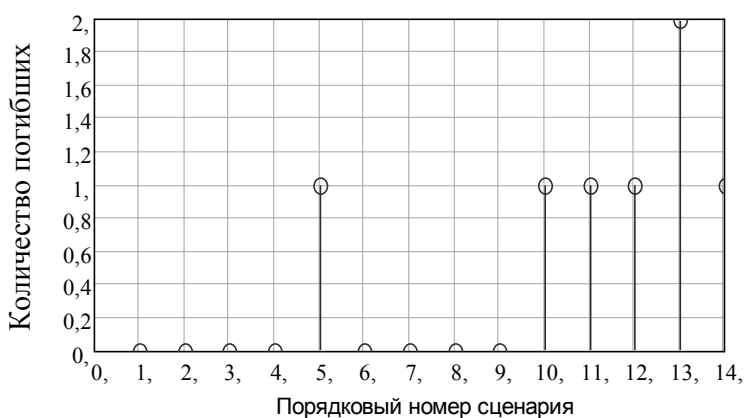


Рис. 1. Количество погибших из числа персонала, третьих лиц и населения при различных сценариях аварии с учетом землетрясения:

а) без учета СИЗ; б) при использовании СИЗ и эвакуации населения с учетом охлаждения и понижения вероятности с использованием СИЗ



а)



б)

Рис. 2. Количество погибших из числа персонала, третьих лиц и населения при различных сценариях аварии с учетом землетрясения:

а) с учетом охлаждения и понижения вероятности без учета СИЗ;

б) с учетом охлаждения и понижения вероятности с использованием СИЗ

Здесь идентификация сценария производится по порядковому номеру с легендой:

1) полная разгерметизация горизонтального резервуара, первичное облако аммиака, масса аммиака в облаке 35 т;

2) полная разгерметизация горизонтального резервуара, вторичное облако аммиака, время экспозиции 60 мин.;

3) полная разгерметизация шарового резервуара, первичное облако аммиака, масса аммиака в облаке 274 т;

4) полная разгерметизация шарового резервуара, вторичное облако аммиака, время экспозиции 60 мин.;

5) полная разгерметизация ж/д. цистерны, первичное облако аммиака, масса аммиака в облаке 10 т;

6) полная разгерметизация ж/д. цистерны, вторичное облако аммиака, время экспозиции 60 мин.;

7) полная разгерметизация емкости с аммиачной водой, вторичное облако аммиака, время экспозиции 60 мин.;

8) гильотинный разрыв трубопровода, вторичное облако аммиака, время экспозиции 60 мин.;

9) гильотинный разрыв трубопровода, вторичное облако аммиака, время экспозиции 60 мин.;

10) взрыв аммиачно-воздушной смеси в помещении компрессорной, масса аммиака 0,5 т;

11) взрыв аммиачно-воздушной смеси в помещении компрессорной, масса аммиака 0,3 т;

12) взрыв аммиачно-воздушной смеси в помещении компрессорной, масса аммиака 0,01 т;

13) полная разгерметизация всего технологического оборудования вследствие землетрясения или теракта, масса аммиака в первичном облаке 1000 т;

14) полная разгерметизация всего технологического оборудования вследствие землетрясения или теракта, время экспозиции 60 мин.

Ниже на рис. 3 и рис.4 представлены F/G диаграммы для различных вариантов реализации мероприятий по повышению степени безопасности.

Влияние температуры (фактора перегрева) на массу аммиака в первичном облаке представлено при полной разгерметизации шарового резервуара в виде графика на рис. 5. Зависимость величины токсодозы аммиака от расстояния и различных температур хранения жидкого аммиака приведена в виде графика на рис. 6.

Представленные результаты расчета величины ингаляционной токсодозы аммиака в зависимости от расстояния до источника выброса и температуры хранения жидкого аммиака позволяют сделать следующие выводы. При хранении аммиака под различным давлением достигаются различные уровни смертельного поражения: температура хранения минус 33 °С, дальность зоны смертельного поражения с вероятностью 50 % составляет 200 м и далее соответственно: минус 27 °С – 800 м; 0 °С – 2030 м; плюс 10 °С – 2360 м; плюс 20 °С – 2640 м (расчеты выполнены по методике Токси 2.2).

Из результатов расчетов следует, что хранение жидкого аммиака при температуре минус 33 °С позволит сократить зону возможного смертельного поражения с 2640 м до 200 м, т.е. в 13 раз.

С другой стороны важно учесть повторяемость направлений ветра для

всех возможных источников СДЯВ. Построенная математическая модель позволила получить интересную реальную картину для выбросов СДЯВ, когда образуются т.н. зоны с пониженным и повышенным риском токсического воздействия, которая представлена на рис. 7 и рис. 8 (по температуре цвета можно судить о повторяемости заданного направления в исследуемой точке пространства).

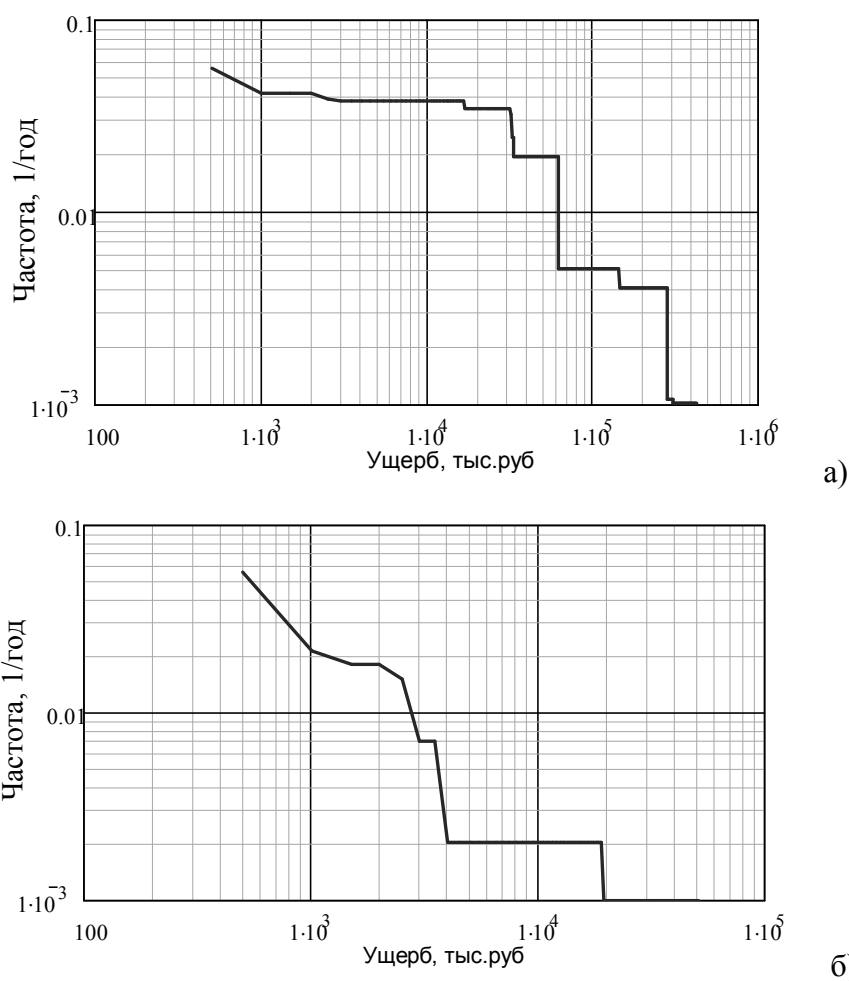
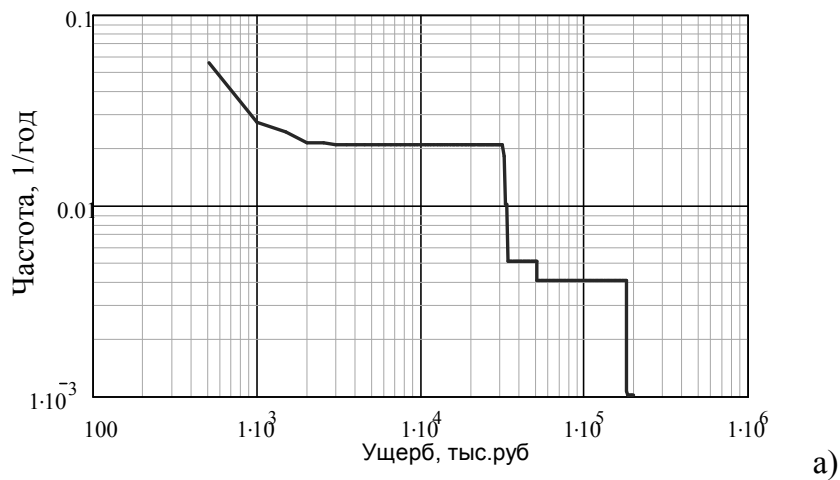


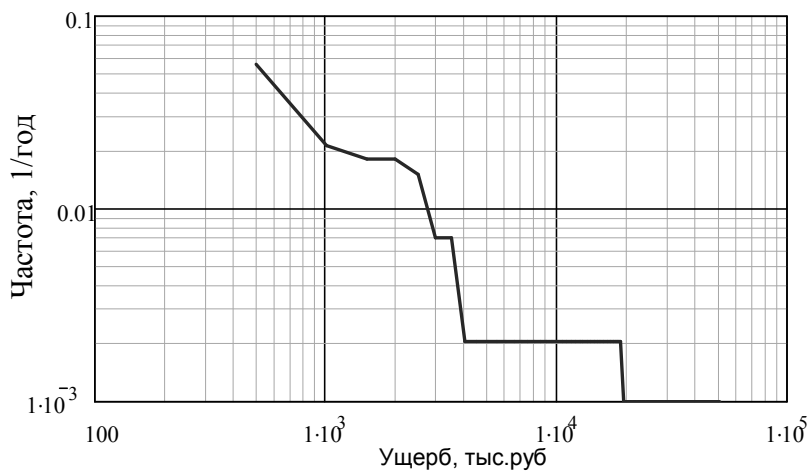
Рис. 3. F/G диаграммы:

а) без реализации защитных мероприятий; б) с исключением степени перегрева

Для определения пространственного распределения потенциального территориального риска гибели человека с полным численным учетом румбовой схемы повторяемости направлений ветра был разработан алгоритм и соответствующая математическая модель, численная реализация которой завершилась созданием автоматизированного расчетного комплекса «FR. Fields of risk» (рис. 9) [4, 7]. При расчетах принималось, что время ингаляционного воздействия аммиака составляет 60 мин.



а)



б)

Рис. 4. F/G диаграммы:

а) с уменьшением вероятности возможных аварий в 10 раз;

б) с исключением степени перегрева и уменьшением вероятности возможных аварий в 10 раз

Проблема определения научно и экономически обоснованной величины затрат на противоаварийные мероприятия  $SS$  актуальна прежде всего для собственника предприятия. В целях определения научно-обоснованного минимума затрат для последующей рекомендации владельцу завода был применен следующий метод [4, 8]. Рассматривая риск причинения ущерба  $R$  как математическое ожидание ущерба за 1 год очевидно считать величину ожидаемых затрат как минимальную величину инвестиций на противоаварийные мероприятия  $S$ , дол./год:

$$S \geq R = \sum_x \sum_y \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_i \cdot \lambda_{i,j} \cdot G_{i,j}(x, y). \quad (1)$$



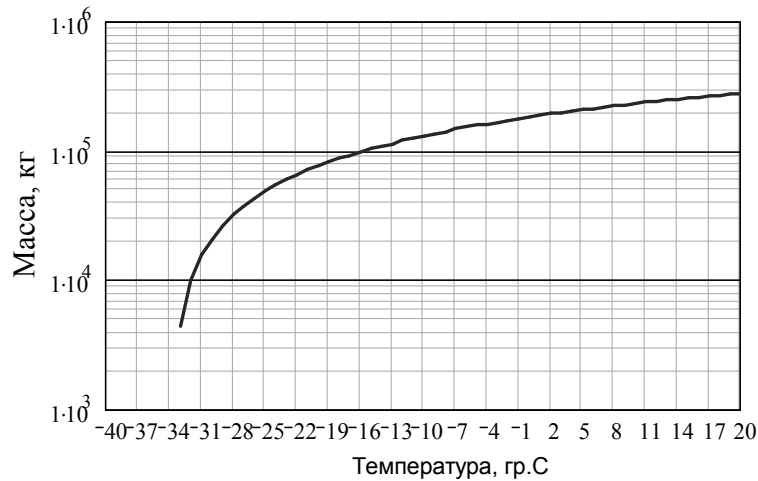


Рис. 5 Зависимость массы аммиака в первичном облаке от температуры хранения жидкого аммиака

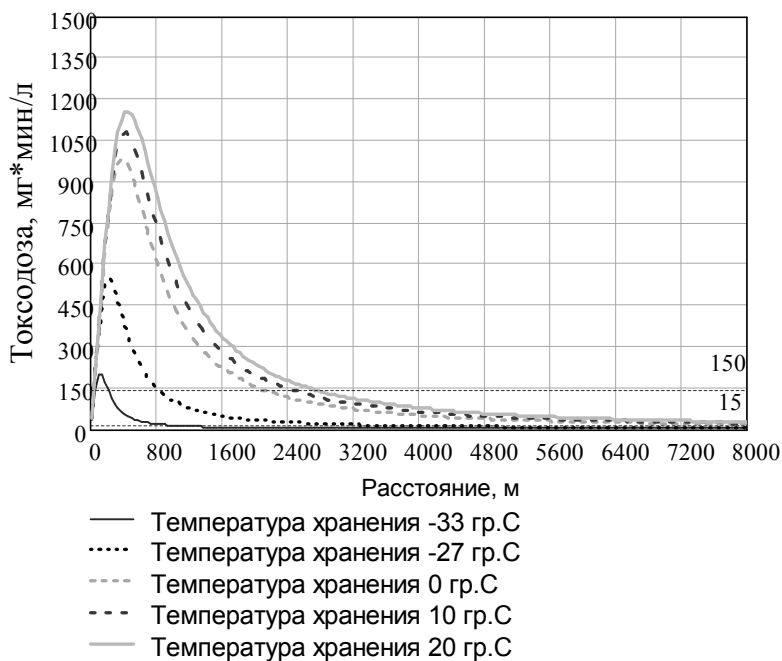


Рис. 6 Зависимость величины токсодозы аммиака от расстояния и различных температур хранения жидкого аммиака

Далее определяются параметры дискретной случайной величины – нанесение ущерба в результате аварии. Определяются дисперсия, математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение случайной величины. Используя правило «трех сигм», получим, что вероятность отклонения ущерба от аварии за год не превысит 0,018, т.е. менее 2 %. Тогда величину  $SS$  определим по формуле:

$$SS = S + 3 \cdot \delta[X]. \quad (2)$$

Здесь  $\delta[X] = \sqrt{D[X]}$ ;  $D[X] = M[X^2] - (M[X])^2 = \left( \sum_{i=1}^n [(G_i)^2 \cdot P_i] \right) - \left( \sum_{i=1}^n [G_i \cdot P_i] \right)^2$ .

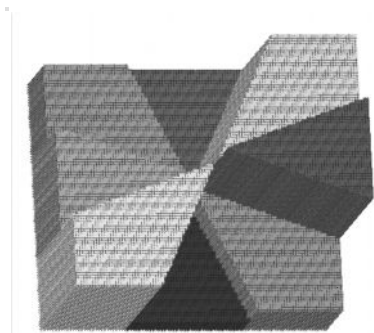


Рис. 7. Графическое отображение повторяемости направлений ветра при выбросе из одного источника

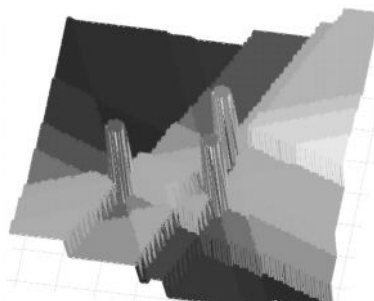


Рис. 8. Графическое отображение повторяемости направлений ветра при выбросе из 3-х источников

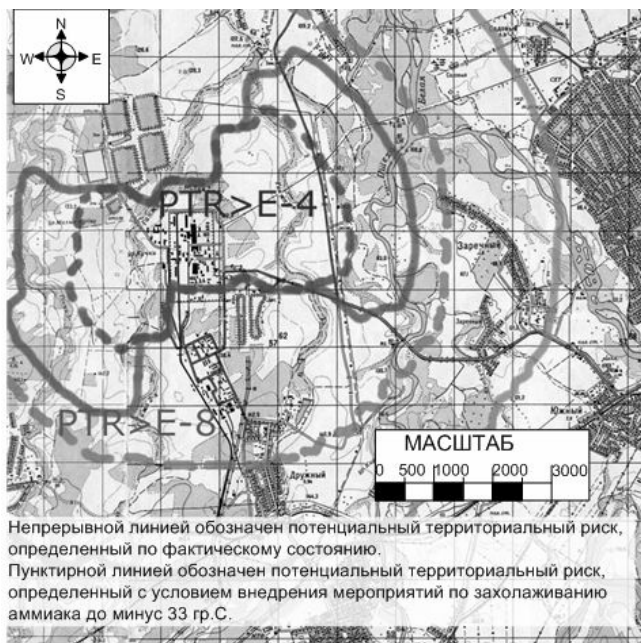
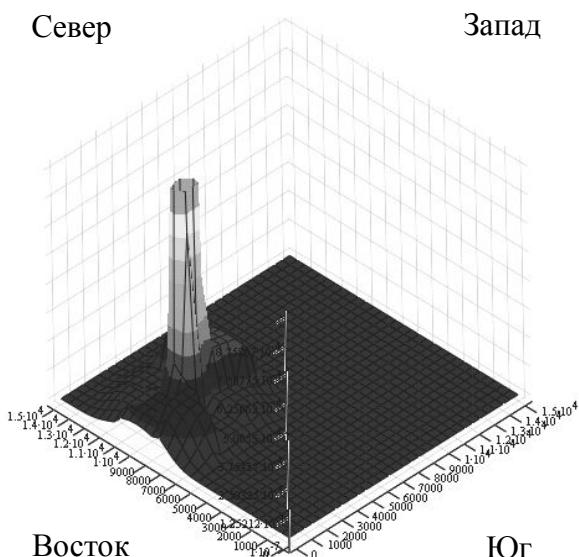


Рис. 9. Потенциальный территориальный риск гибели человека

Результаты расчетов представим ниже в табл. 1.

Очевидно, что при учете правила «трех сигм» получаются адекватные величины затрат на предупредительные мероприятия. Данный расчетно-аналитический блок был успешно внедрен в разработанный алгоритм и математическая модель количественной оценки риска аварий, и реализован в расчетном комплексе «FR. Fields of risk» [4, 7].

Отдельные результаты многовариантного расчета эффективности меро-

приятый по повышению безопасности, в зависимости от того какой подход будет выбран, представлены в табл. 2.

Таблица 1

Определение величины лимита средств, отводимого на противоаварийные мероприятия (авария с вероятностью  $10^{-5}$ )

Значение ущерба, дол. США	Лимит средств без учета отклонения $S$ , дол. США	Лимит средств с учетом одинарного отклонения $SS$ , дол. США	Лимит средств $SS$ с учетом правила «трех сигм», дол. США
1000000	10	3172	9497
10000000	100	31630	94970

Таблица 2

Эффективность мероприятий по повышению безопасности

Наименование показателя, мероприятия	Кол. рисков без СИЗ, чел./год	Социальная эффективность без учета ж/д. цистерн, %	Социальная эффективность с учетом ж/д. цистерн, %	Ожидаемый ущерб без исп. СИЗ (стоим. жизни 270000руб), тыс.руб/год	Ожидаемый ущерб с использованием СИЗ (стоим. жизни 270000руб), тыс.руб/год	Экономическая эффективность с учетом СИЗ, %	Ожидаемый ущерб без исп. СИЗ, (стоим. жизни 1258000 руб) тыс.руб/год
Без мероприятий	1,506	-	-	2882	1347	53,3	4717
С охлаждением шаровых р-ров	1,499	0,2	0,5	не определялся	не определялся	не определялся	не определялся
С охлаждением шаровых и горизонт. р-ров	1,185	63,4	21,3	не определялся	158 (снижение в 8,5 раз)	94,52	3917
С понижением вероятности всех аварий в 10 раз	0,151	не менее 90	90 (снижение в 10 раз)	не определялся	135 (снижение в 10 раз)	95,32	не определялся
С исключением фактора физ. перегрева и уменьшением вероятности всех аварий в 10 раз	0,132	не менее 91	91 (снижение в 10 раз)	не определялся	16 (снижение в 84 раза)	99,45	не определялся

Результаты исследований показали, что рекомендуемая величина инвестиций на повышение уровня безопасности, полученная в результате расчета предлагаемым методом, формула (2), после внедрения рекомендуемых мероприятий снизится в 4400 раз, т.е. с 70400 тыс.руб. до 16 тыс.руб. Фактически же величина инвестиций 16 тыс.руб означает, что достигнутый уровень промышленной безопасности в целом является приемлемым.

Из данных, приведенных в табл. 2, следует, что реализация технических мероприятий по отдельным единицам оборудования, характеризуемого высокой угрозой негативных последствий, без учета всей совокупности параметров возможных опасностей объекта (вероятность аварии, масса и состояние АХОВ и др.) будет неэффективной.

Поэтому необходимо использовать системный подход, заключающийся в количественной оценке, как меры возможности возникновения аварии, так и параметров ее последствий. Подлежат реализации мероприятия, охватывающие все или большую часть оборудования, объектов защиты и определяющие возможность возникновения аварии (оснащение системой АСУТП и средствами СИЗ), а также реализация мероприятий по уменьшению тяжести последствий возможных аварий (исключение фактора перегрева жидкого аммиака, отгон ж/д цистерн с аммиаком при получении сообщения сейсмостанции об угрозе землетрясения).

При этом видно, что даже повышение размера компенсационных выплат при гибели человека в 4,5 раза, т.е. с 10000 \$ до 46000 \$, не могут обеспечить превалирование мероприятий по снижению тяжести последствий над мероприятиями по снижению меры возможности возникновения аварии.

В целом же результаты многовариантных расчетов эффективности рекомендуемых мероприятий показали, что их реализация позволит снизить ожидаемый материальный ущерб в 84 раза, сократить ожидаемое количество погибших в 2 раза при наличии СИЗ и до 11 раз при отсутствии СИЗ или эвакуации (табл. 2).

**Выводы.** Сформулирована и решена задача повышения уровня безопасности взрыво-, пожаро- и токсоопасных объектов химической промышленности. В рамках решения данной задачи разработаны соответствующие алгоритм, математическая модель и методика. Применение методов количественной оценки риска аварий на базе разработанного алгоритма и математической модели позволяют определить вектор опасности промышленного объек-

та и эффективные мероприятия по повышению безопасности. Эффективность предлагаемого подхода показана на примере существующего химического завода по производству минеральных удобрений.

**Список литературы:** 1. *Азаров Н.И., Давидюк О.В., Лисанов М.В.* Предупреждение промышленных аварий на основе директив Севезо // *Безопасность труда в промышленности.* – 2006. – № 12. – С. 42 – 47. 2. *Соловей В.В., Давидюк О.В., Буц Ю.В.* Анализ и оценка риска аварий – основа принятия решений при управлении промышленной безопасностью // *Проблемы надзвичайних ситуацій: Зб. наук. праць УЦЗ України.* – Х.: УЦЗУ, 2006. – Вип. 4. – С. 219 – 231. 3. *Гражданкин А.И., Лисанов М.В., Печеркин А.С.* Количественная оценка риска аварий в декларациях промышленной безопасности опасных производственных объектов топливно-энергетического комплекса // *Безопасность труда в промышленности.* – 2005. – № 1. – С. 46 – 48. 4. *Давидюк О.В., Азаров Н.И., Соловей В.В.* Повышение эффективности реализации процедуры анализа риска аварий // *Семинар “Об опыте декларирования промышленной безопасности и страхования ответственности. Развитие методов оценки риска аварий на опасных производственных объектах.* Москва: Науч.-техн. центр по безопасности в промышленности Ростехнадзора, 23 октября 2007 г. 5. *Давидюк О.В., Соловей В.В.* Оценка вероятности возникновения аварии графом «дерева отказов» // *Проблемы машиностроения.* – 2007. – №1. – С. 45 – 53. 6. *Белов П.Г.* Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере. – М.: Изд. центр «Академия», 2003. – 512 с. 7. *Давидюк О.В.* Разработка алгоритма количественной оценки риска аварий на объектах повышенной опасности // *Доклад. XV межд. науч.-практ. конференция «Информационные технологии: наука, технология, образования, здоровье»,* 17 – 18 мая 2007 г. – Харьков: НТУ «ХПИ». 8. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Наука, 1988. – 480 с.

*Поступила в редколлегию 28.07.08 г.*