

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЛИКВИДАЦИЕЙ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙНЫХ И ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ОБЪЕКТАХ

**Ю. Н. Матвеев, К. А. Карельская,
Н. А. Стукалова, Ж. П. Нкурийимана**

*ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический
университет», г. Тверь, Россия*

Рецензент д-р техн. наук, профессор Н. А. Семенов

Ключевые слова: алгоритм; задача оптимизации; математическое моделирование; нелинейное программирование; облако зараженного воздуха; опасная зона загрязнения; оперативное управление; поддержка принятия решений; чрезвычайные ситуации.

Аннотация: Приведен общий алгоритм поддержки принятия решений при возникновении аварий на техногенном объекте, функционирование которого определяет возможность возникновения чрезвычайной ситуации и позволяет рассчитать варианты управленческих решений в чрезвычайной ситуации. Выделены основные составляющие общего алгоритма.

Представлена математическая модель опасной зоны загрязнения. Выполнена постановка задачи оптимизации площади опасной зоны загрязнения, которая является сложной, уникальной для каждой конкретной чрезвычайной ситуации и относится к классу задач нелинейного программирования.

В Российской Федерации на сегодняшний день функционирует значительное число (более 1000) крупных химических и нефтехимических предприятий, на которых в качестве сырья для производства готовой продукции используется большое количество разнообразных ядовитых и взрывоопасных веществ. Готовая продукция данных предприятий (кислоты, щелочи, топливо и т.д.) также относится к классу аварийно химически опасных веществ (**АХОВ**). По частоте возникновения и тяжести последствий аварий для биотической среды химическая промышленность

Матвеев Юрий Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры электронных вычислительных машин; Карельская Катерина Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры электронных вычислительных машин, e-mail: kak69@yandex.ru; Стукалова Наталия Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и прикладной математики; Нкурийимана Жан Поль – аспирант факультета информационных технологий, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», г. Тверь, Россия.

входит в группу лидеров наряду с ядерными и металлургическими объектами [1]. Несанкционированное и неуправляемое проникновение токсичных химических веществ (**ТХВ**) в атмосферу, водоемы, почву является причиной быстрого массового поражения биотических объектов и приводит к опасному и долговременному загрязнению прилегающих территорий. К аварийно опасным химическим веществам, которые чаще всего применяются в химической промышленности, относятся: жидкие хлор, аммиак и фтор, соляная кислота, олеум, сероводород, сернистый газ, азотная кислота, нитрил акриловой кислоты, синильная кислота, фосген, метилмеркаптан, бензол, бромистый водород, фтористый водород, щелочи и компоненты ракетного топлива (**КРТ**).

Опасные особенности АХОВ [2]:

а) способность переноситься на большие расстояния за счет энергии приземного ветра и образовывать зоны химического заражения;

б) способность зараженного воздуха проникать в негерметизированные помещения;

в) существенные различия АХОВ по поражающим факторам, что требует применения для ликвидации последствий аварий значительной номенклатуры обеззараживающих веществ;

г) способность многих АХОВ оказывать токсичное воздействие на биотические объекты не только при непосредственном контакте с ними, но и при употреблении воды, продуктов из зараженной среды через значительный интервал времени.

Как правило, в промышленных условиях для хранения, перевозки, применения в технологических установках АХОВ переводятся в жидкое состояние и содержатся под высоким давлением.

При разрушении емкости с АХОВ происходит резкое падение высокого давления над жидкими веществами до величины атмосферного. Жидкое АХОВ вскипает и выбрасывается в атмосферу в виде газа, пара или аэрозоля, образуя облако зараженного воздуха (**ОЗВ**). Приземный ветер переносит ОЗВ в направлении своего распространения, во время которого сильнодействующие ядовитые вещества (**СДЯВ**) конденсируются и оседают на земную поверхность в виде капель, аэрозолей. Облако газа (пара, аэрозоля) АХОВ, образующееся в момент разрушения емкости, называется *первичным облаком зараженного воздуха* и является доминирующим фактором в образовании зоны загрязнения, так как в нем находится основная доля массы выделившегося опасного вещества, которая и распространяется на большие расстояния. Какая-то часть выделившегося жидкого АХОВ (с температурой кипения выше 20 °С) разливается по поверхности вблизи объекта аварии и в процессе естественного испарения также поступает в атмосферу, формируя вторичное облако заражения, которое является дополнительным фактором образования зоны загрязнения, хотя и распространяется на меньшие расстояния.

Характеристики типичных представителей АХОВ приведены в табл. 1 [3].

Таким образом, в химической промышленности значительное число технологических объектов является потенциальными источниками техногенной опасности. Минимизация опасных для биотической среды послед-

Таблица 1

**Распределение АХОВ по основным физико-химическим свойствам
и условиям хранения**

| Группа | Состояние веществ при хранении | Вещества |
|--------|---|--|
| 1 | Сжатые и сжиженные газы, хранящиеся в емкостях под избыточным давлением | Хлор, аммиак, сероводород, фосген |
| 2 | Летучие жидкости, хранящиеся в емкостях без избыточного давления | Синильная кислота, нитрил акриловой кислоты, тетраэтилсвинец, дифосген, хлорпикрин |
| 3 | Дымящие кислоты, хранящиеся в герметизированных емкостях | Серная ($p > 1,87$), азотная ($p > 1,4$), соляная ($p > 1,15$) |
| 4 | Сыпучие и твердые нелетучие вещества при хранении до $t = 40$ °С | Сулема, фосфор желтый, мышьяковый ангидрид |
| 5 | Сыпучие и твердые летучие вещества при хранении до $t = 40$ °С | Соли синильной кислоты, меркураны |

ствий произошедших аварий в первую очередь зависит от времени определения численных значений оценок поражающих факторов аварии и принятия эффективных управляющих решений, направленных на детоксикацию зоны заражения, что невозможно осуществить с помощью натуральных экспериментов на техногенных объектах. Единственным способом исследования причин возникновения, развития аварийной ситуации (АС) и оценки ее негативных последствий является математическое моделирование. Исследования с использованием методов математического моделирования позволяют определить, пусть и приближенно, количественные значения параметров эмиссии опасных веществ или источников энергии, проводя вычислительные эксперименты на ЭВМ. При развитии аварийной ситуации в чрезвычайную трудности управления ликвидацией чрезвычайной ситуации (ЧС) многократно возрастают [4].

Количественное обоснование принимаемых решений при ликвидации последствий ЧС в настоящее время невозможно без использования программно-технических комплексов (ПТК). Алгоритмическое и программное обеспечение ПТК предназначено для предоставления лицу, принимающему решение (ЛПР), количественно обоснованных вариантов (три-четыре) численных значений оперативных управляющих воздействий имеющимися средствами техногенного объекта для уменьшения негативных последствий ЧС.

В состав общего алгоритма поддержки и принятия решений (ППР) при ликвидации последствий ЧС должны входить следующие [5]:

- 1) алгоритм расчета и анализа факторов аварийной ситуации;
- 2) расчета вариантов управляющих воздействий имеющимися и выделяемыми дополнительно средствами техногенного объекта по локализации аварии и предотвращению развития АС в ЧС;
- 3) расчета вариантов мероприятий по управлению ликвидацией опасных последствий ЧС.

Общий алгоритм поддержки и принятия решений при возникновении аварий представлен на рис. 1.

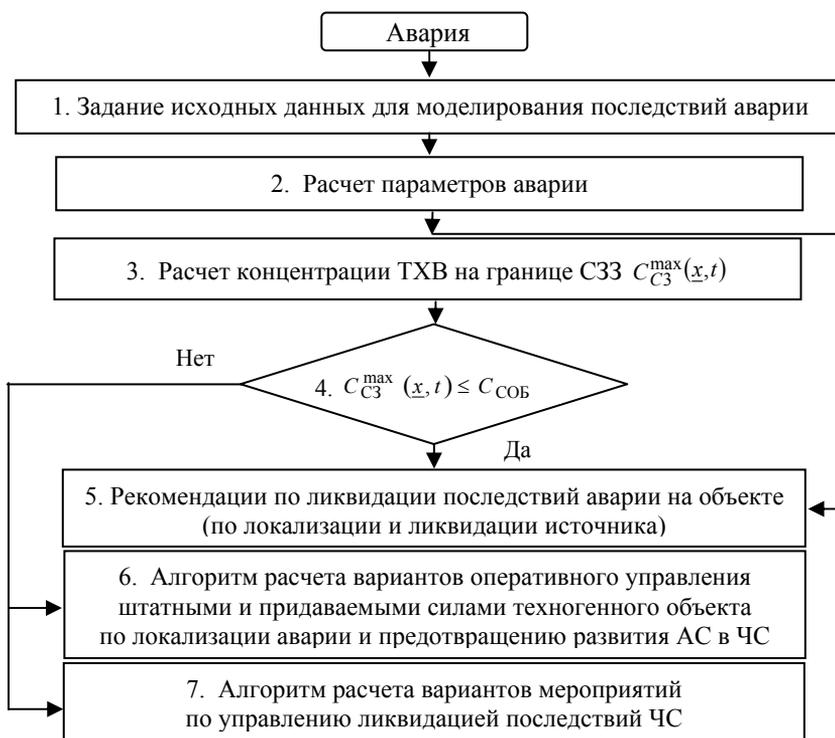


Рис. 1. Общий алгоритм поддержки принятия решений при возникновении аварий на техногенном объекте [7]

Исходные данные по аварии (блок 1) используются при расчете численных значений параметров источника начального загрязнения в блоке 2. Численные значения данных параметров используются для расчета по математическим моделям поля концентраций численного значения величины максимальной концентрации ТХВ на границах санитарной защитной зоны (СЗЗ) – $C_{СЗЗ}^{max}(x,t)$. Определяется отклонение рассчитанного численного значения максимальной концентрации $C_{СЗЗ}^{max}(x,t)$ от величины стандарта относительной безопасности (СОБ) – нормативного показателя (блок 4).

Если численное значение $C_{СЗЗ}^{max}(x,t)$ не более величины $C_{СОБ}$, то есть

$$C_{СЗЗ}^{max}(x,t) \leq C_{СОБ}, \quad (1)$$

то это означает, что ОЗВ не пересекает границ СЗЗ и угрозы ЧС и не возникнет. В этом случае рассчитываются варианты управляющих воздействий для устранения последствий аварии на объекте (блок 5), в том числе по ликвидации источника начального загрязнения.

Если численное значение концентрации $C_{СЗЗ}^{max}(x,t)$ больше значения величины стандарта относительной безопасности $C_{СОБ}$, то есть

$$C_{СЗЗ}^{max}(x,t) > C_{СОБ}, \quad (2)$$

то ОЗВ пересекает границы СЗЗ и возникает ЧС [6].

Блок-схема (см. рис. 1) иллюстрирует основные идеи алгоритма поддержки принятия решений. Требуется конкретизация формальных операций, то есть проведение декомпозиции общего алгоритма до элементарных фрагментов.

Анализ аварийных ситуаций, уже произошедших на техногенных химических объектах, позволил сделать вывод, что основными причинами возможного попадания ТХВ в атмосферу являются [8]:

- разрушение оболочки емкости в результате взрыва;
- вытекание (пролив) ТХВ на земную поверхность или в поддон;
- пожар в хранилище ТХВ, в том числе и с его разрушением;
- возгорание ТХВ по площади разлива.

В методике ФГУП «ГосНИИОХТ» [5] в качестве основного показателя, характеризующего угрозу от попадания ТХВ в атмосферу, принята опасная зона загрязнения (**ОЗЗ**), которая определяется как площадь эллипса на плоскости $x_{3h}=1,5$ м в трехмерном евклидовом пространстве E_3 с координатными осями $0x_1, 0x_2, 0x_3$, где концентрация ТХВ в течение определенного интервала времени будет не меньше $C_{СОБ}$. Вне опасной зоны загрязнения концентрация ТХВ над поверхностью Земли всегда должна быть меньше, чем $C_{СОБ}$.

Ввиду того, что количественные оценки ущерба от последствий аварий во многом зависят от размеров (площади) ОЗЗ [5, 9], целью функционирования алгоритма оперативного управления является расчет управляющих воздействий по минимизации пространственных границ поражающего действия ОЗВ или, другими словами, минимизации площади ОЗЗ. Минимум площади ОЗЗ – показатель эффективности оптимизационной задачи. Решение такого рода задач требует определенной свободы выбора численных значений параметров оптимизации, то есть объект оптимизации должен реагировать на управляющие воздействия, которые изменяют его состояние в соответствии с определенными условиями.

Математической моделью ОЗЗ является площадь эллипса, на всех точках которой концентрация ТХВ в течение времени, соответствующего интервалу (t_n^*, t_k^*) будет не меньше величины нормативного показателя $C_{СОБ}$. Индексы «н» и «к» обозначают начало и окончание процесса образования ОЗЗ на плоскости $x_{3h}=1,5$ м.

Площадь эллипса рассчитывается по формуле [10]:

$$S = \frac{1}{4} \pi ab, \quad (3)$$

где a, b – длины осей эллипса.

Применительно к расчету площади ОЗЗ E_3 имеем:

$$S_{ОЗЗ} = \frac{1}{4} \pi L l_2^m = \frac{\pi}{2} (x_{1к}^* - x_{1н}^*) y_g^m \approx \pi x_{1с}^m y_g^m = \pi u_1 t_m^* y_g^m, \quad (4)$$

где $L = x_{1к}^* - x_{1н}^*$ – протяженность ОЗЗ по оси $0x_1$ – ось a эллипса; l_2^m – максимальная ширина ОЗЗ ($l_2^m = 2 y_g^m$) – ось b эллипса; $x_{1н}^*$ – координата точки

на оси $0x_1$, в которой ОЗВ впервые касается плоскости $x_{3h} = 1,5$ м (расстояние от источника выброса ТХВ – начала системы координат); $x_{1к}^*$ – координата точки на оси $0x_1$, в которой заканчивается ОЗЗ; x_{1C}^m – координата точки на оси $0x_1$ – центра пятна загрязнения максимального радиуса, ($x_{1C}^m \approx x_{1н}^* + L/2$); t_n^* – момент времени, в который на высоте $h = 1,5$ м впервые фиксируется значение концентрации ТХВ, превышающее величину нормативного показателя СОБ [12], $C_{СОБ}(t_n^* = x_{1н}^*/u_1)$; t_k^* – момент времени исчезновения ОЗЗ, ($t_k^* = x_{1к}^*/u_1$); t_m^* – момент времени, в который произойдет перемещение центра пятна загрязнения в точку E_3 с координатами $x_C^m = (x_{1C}^m; 0; 1,5)^T$ ($t_m^* = x_{1C}^m/u_1$); u_1 – усредненная скорость ветра по оси $0x_1$; y_g^m – максимальный радиус пятна загрязнения.

Математическая постановка задачи оптимизации площади ОЗЗ имеет следующий вид.

Вычислить управляющие воздействия $U = U_1, U_2, \dots, U_m$, $m = 5$, которые доставляют минимум целевой функции:

$$I = \pi x_{1C}^m y_g^m = \pi u_1 t_m^* y_g^m = \pi u_1 t_m^* |a(1,5; t_m^*)| \quad (5)$$

при ограничениях (множества допустимых значений переменных):

$$C(x_1, x_2, x_{3h}, x_{30}, t) \geq C_{СОБ}; \quad (6)$$

$$x_{1н} \leq x_{1C} \leq x_{1к}; \quad (7)$$

$$-y_g^m \leq x_2 \leq y_g^m; \quad (8)$$

$$0 \leq x_{30} \leq H^{\max}; \quad (9)$$

$$t_n^* \leq t_m^* \leq t_k^*; \quad (10)$$

$$0 \leq U_k \leq U_k^{\max}, k = \overline{1, m}, \quad (11)$$

где $|a(1,5; t_m^*)|$ – величина максимального радиуса пятна загрязнения; H – превышение источника загрязнения над плоскостью $x_{3h} = 1,5$ м; $U_1(M_1), U_4(q_2), U_5(q_1)$ – управляющие воздействия, приводящие к обеднению ОЗВ; $U_2(S_{OC}), U_3(S_{пр})$ – управляющие воздействия, снижающие производительность начального источника химического загрязнения (НИХЗ); M_1 – масса ТХВ в первичном ОЗВ; q_1 – удельная производительность НИХЗ с площади пролива ТХВ (первичное ОЗВ); q_2 – удельная производительность НИХЗ с поверхности осаждения ТХВ (вторичное ОЗВ); S_{OC} – общая площадь поверхности осаждения ТХВ; $S_{пр}$ – общая площадь пролива ТХВ.

Множество допустимых значений, определяемое ограничениями (6) – (11), наложенными на каждую искомую переменную, необходимо допол-

нить условиями, налагаемыми на совокупность переменных, то есть уравнениями связей. Задача (5) – (11) относится к классу задач нелинейного программирования, и разработка эффективного алгоритма ее решения связана со значительными сложностями вычислительного характера для каждой конкретной ЧС [11].

Список литературы

1. Егоров, А. Ф. Анализ риска, оценка последствий аварий и управление безопасностью химических, нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств / А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая. – М. : КолосС, 2010. – 528 с.
2. Матрюков, Б. С. Безопасность в чрезвычайных ситуациях в природно-техногенной сфере. Прогнозирование последствий : учеб. пособие / Б. С. Матрюков. – М. : Академия, 2011. – 368 с.
3. Чрезвычайные ситуации природного, техногенного и социального характера и защита от них / под ред. Л. А. Михайлова. – СПб. : Питер, 2008. – 240 с.
4. Безопасность жизнедеятельности. Защита населения и территорий в чрезвычайных ситуациях : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Я. Д. Вишняков [и др.]. – М. : Академия, 2007. – 304 с.
5. Оценка масштабов и последствий аварийных ситуаций на объектах хранения и уничтожения химического оружия: методика ОКР / ФГУП ГосНИИОХТ. – М. : ФГУП ГосНИИОХТ, 2002. – 128 с.
6. Калыгин, В. Г. Безопасность жизнедеятельности. Промышленная и экологическая безопасность, безопасность в техногенных чрезвычайных ситуациях / В. Г. Калыгин, В. А. Бондарь, Р. Я. Дедеян. – М. : КолосС, Химия, 2006. – 520 с.
7. Разработка модели, математического и программного обеспечения прогнозирования химической обстановки при возникновении аварий на пусковом комплексе объекта хранения и уничтожения химического оружия «Горный». Создание и испытание программного комплекса прогнозирования химической обстановки для пускового комплекса объекта уничтожения химического оружия «Горный». Промежуточный отчет по НИР «Конда», этап 3, № 716. – Редкино : ОАО «РОКБА», 2001. – 114 с.
8. Методика оценки последствий аварий на объектах по хранению и объектах по уничтожению химического оружия (проект). В отчете о НИР «Разработка методики оценки последствий аварий на объектах по хранению и уничтожению химического оружия» (шифр «Вагонетка-МОП»). – М. : АГЗ, 2001. – 181 с.
9. Методика оценки последствий химических аварий (методика «Токси»). – М. : НТЦ «Пром. безопасность», 1993. – 19 с.
10. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1968. – 720 с.
11. Матвеев, Ю. Н. Обоснование и выбор методики моделирования аварийного загрязнения атмосферы / Ю. Н. Матвеев, Н. А. Стукалова // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике : сб. ст. XVI Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза, 2016. – С. 182 – 186.
12. Матвеев, Ю. Н. Основы построения автоматизированных систем оперативного управления технической безопасностью химических производств : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.06 / Ю. Н. Матвеев. – Тверь, 2011. – 352 с.

References

1. Yegorov A.F., Savitskaya T.V *Analiz riska, otsenka posledstviy avariy i upravleniye bezopasnost'yu khimicheskikh, neftepererabatyvayushchikh i neftekhimicheskikh proizvodstv* [Risk Analysis, Assessment of Accident Consequences and Safety

Management of Chemical, Oil Refining and Petrochemical Producers], Moscow: KolosS, 2010, 528 p. (In Russ.)

2. Mastryukov B.S. *Bezopasnost' v chrezvychaynykh situatsiyakh v prirodno-tekhnogennoy sfere. Prognozirovaniye posledstviy: Ucheb. posobiye* [Security in emergency situations in the natural and man-made sphere. Forecasting the consequences: Proc. allowance], Moscow: Akademiya, 2011, 368 p. (In Russ.)

3. *Chrezvychaynyye situatsii prirodnogo, tekhnogenogo i sotsial'nogo kharaktera i zashchita ot nikh* [Emergency situations of natural, technogenic and social character and protection against them], Mikhaylov L. A. (Ed.), St. Petersburg: Piter, 2008, 240 p. (In Russ.)

4. Vishnyakov Ya.D., Vagin V.I., Ovchinnikov V.V., Starodubets A.N. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. Zashchita naseleniya i territoriy v chrezvychaynykh situatsiyakh: ucheb. posobiye dlya stud. vyssh. ucheb. zavedeniy* [Life safety. Protection of the population and territories in emergency situations: Textbook. allowance for stud. supreme. training. institutions], Moscow: Akademiya, 2007, 304 p. (In Russ.)

5. *Otsenka masshtabov i posledstviy avariynykh situatsiy na ob'yektakh khraneniya i unichtozheniya khimicheskogo oruzhiya: metodika. OKR* [Assessment of the scale and consequences of emergency situations at chemical weapons storage and destruction facilities: methodology. R & D], Moscow: FGUP GosNIIOKHT, 2002, 128 p. (In Russ.)

6. Kalygin V.G., Bondar' V.A., Dedeyan R.Ya. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. Promyshlennaya i ekologicheskaya bezopasnost', bezopasnost' v tekhnogennykh chrezvychaynykh situatsiyakh* [Safety of life. Industrial and ecological safety, safety in technogenic emergency situations], Moscow: KolosS, Khimiya, 2006, 520 p. (In Russ.)

7. *Razrabotka modeli, matematicheskogo i programmnogo obespecheniya prognozirovaniya khimicheskoy obstanovki pri vozniknovenii avariyy na puskovom komplekse ob'yekta khraneniya i unichtozheniya khimicheskogo oruzhiya "Gornyy". Sozdaniye i ispytaniye programmnogo kompleksa prognozirovaniya khimicheskoy obstanovki dlya puskovogo kompleksa ob'yekta unichtozheniya khimicheskogo oruzhiya "Gornyy". Promezhutochnyy otchet po NIR "Konda"* [Development of a model, mathematical and software for forecasting the chemical situation in the event of accidents on the launch complex of the object of storage and destruction of chemical weapons "Gornyy". Creation and testing of the software complex for forecasting chemical conditions for the launch complex of the Gornyy chemical weapons destruction facility. Interim report on R & D "Konda"], stage 3, no. 716, Redkino: OAO "ROKBA", 2001, 114 p. (In Russ.)

8. *Metodika otsenki posledstviy avariyy na ob'yektakh po khraneniyu i ob'yektakh po unichtozheniyu khimicheskogo oruzhiya (proyekt). V otchete o NIR "Razrabotka metodiki otsenki posledstviy avariyy na ob'yektakh po khraneniyu i unichtozheniyu khimicheskogo oruzhiya" (shifr "Vagonetka-MOP")* [Methodology for assessing the consequences of accidents at storage facilities and facilities for the destruction of chemical weapons (draft). In the report on research "Development of methods for assessing the consequences of accidents at chemical weapons storage and destruction facilities" (code "Vagonetka-MOP")], Moscow: AGZ, 2001, 181 p. (In Russ.)

9. *Metodika otsenki posledstviy khimicheskikh avariyy (metodika "Toksi")* [Methodology for assessing the consequences of chemical accidents ("Toxi" technique)], Moscow: NTTS "Prom. Bezopasnost'", 1993, 19 p. (In Russ.)

10. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [A handbook on mathematics for scientists and engineers], Moscow: Nauka, 1968, 720 p. (In Russ.)

11. Matveyev Yu.N., Stukalova N.A. [Substantiation and choice of methods for modeling emergency air pollution], *Problemy informatiki v obrazovanii, upravlenii, ekonomike i tekhnike: sb. statey XVI Mezhdunar. nauchno-tekhn. konf.* [Problems

of Informatics in Education, Management, Economics and Technology: Digest of articles XVI International. scientific and technical. conf.], Penza: PDZ, 2016, pp. 182-186. (In Russ.)

12. Matveyev Yu.N. *Extended abstract of candidate's of technical thesis*, Tver', 2011, 352 p. (In Russ.)

Decision-Making for Management of Recovery of Accident and Emergency Situations at Chemical Hazardous Sites

**Yu. N. Matveev, K. A. Karelskaya,
N. A. Stukalova, Zh. P. Nkuriyimana**

Tver State Technical University, Tver, Russia

Keywords: decision-making; mathematical modeling; algorithm; emergency situations; cloud of contaminated air; hazardous contamination zone; operational control; optimization problem; non-linear programming.

Abstract: Enterprises of chemical industry use a large amount of toxic and explosive substances. Spills and emissions of toxic substances to the environment can cause irreparable harm to nature and human health. Therefore, the tasks of accident prevention and containment at hazardous production facilities, the tasks of analysis, risk assessment and safety management of chemical production facilities are relevant.

The only way to study causes of emergence, development of an emergency situation and assess its negative consequences is mathematical modeling.

To help a decision-maker reduce negative consequences of emergency situations, the article provides a general algorithm for supporting decision-making in the event of accidents at an industrial site. The functioning of the general decision support algorithm determines the possibility of emergence of an emergency situation and allows calculating options for management decisions in an emergency situation. The main components of the general algorithm are highlighted in the article.

A hazardous contamination zone is the main indicator characterizing the threat from insertion of toxic chemicals in the atmosphere. The purpose of the operational control algorithm functioning is to minimize the area of the hazardous contamination zone. The authors have presented a mathematical model of the hazardous contamination zone and set the task of optimizing the area of the hazardous contamination zone, which is complex, unique for each specific emergency situation and belongs to the class of non-linear programming tasks.

© Ю. Н. Матвеев, К. А. Карельская,
Н. А. Стукалова, Ж. П. Нкурийимана, 2018