

**УДК 519.711.3:681.3:623.45**

**Стукалова Наталия Александровна**

ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ)  
Россия, Тверь  
Доцент  
E-Mail: [nast77@mail.ru](mailto:nast77@mail.ru)

**Матвеев Юрий Николаевич**

ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ)  
Россия, Тверь  
Доктор технических наук, профессор  
E-Mail: [matveev4700@mail.ru](mailto:matveev4700@mail.ru)

**Долженко Алексей Борисович**

ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ)  
Россия, Тверь<sup>1</sup>  
Кандидат технических наук, доцент  
E-Mail: [dolzhenko\\_2010@mail.ru](mailto:dolzhenko_2010@mail.ru)

**Автоматизированная система управления  
технологическими процессами уничтожения  
химического оружия**

---

<sup>1</sup> 170026, Тверь, Комсомольский проспект 5, офис 517

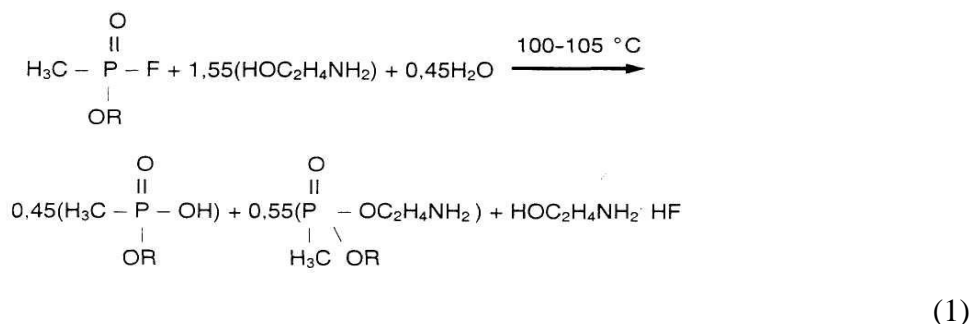
**Аннотация.** В данной статье исследована возможность оперативного управления процессом уничтожения химического оружия. В работе рассмотрена автоматизированная система управления технологическими процессами, которая позволяет повысить эффективность работы комплексов уничтожения химического оружия в штатном режиме функционирования. Проведена формализация задачи управления. Сформулирована задача оптимального управления, как задача минимизации. Задача оперативного управления производственным комплексом ставится в виде задачи линейного программирования. Целевая функция данной задачи – это линейная функция, которая определяет максимально возможные массы отравляющих веществ. Области допустимых значений режимных параметров технологических операций (уравнения баланса ёмкости, допустимые отклонения материальных потоков, диапазоны нагрузок) определяют область ограничений для целевой функции.

**Ключевые слова:** объект уничтожения химического оружия; математическая модель; отравляющие химические вещества; линейная функция; процесс детоксикации; технологическая операция; оптимальное управление; область допустимых значений.

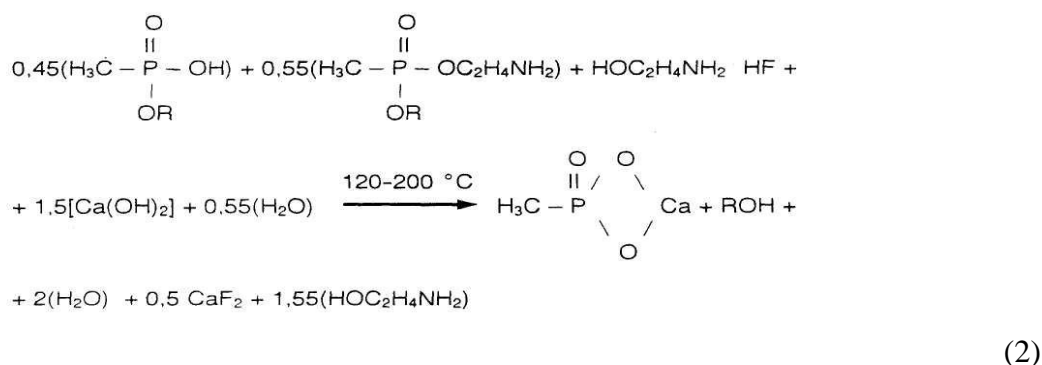
Идентификационный номер статьи в журнале 54TVN414

Выполнение международных обязательств Российской Федерации в области химического разоружения является одной из важнейших геополитических задач страны. Для успешного решения этой задачи разработана Федеральная целевая программа «Уничтожение запасов химического оружия в Российской Федерации».

В Российской Федерации в промышленных масштабах реализуется двухстадийная технология уничтожения химического оружия, в которой на первой стадии осуществляется преобразование высокотоксичного отравляющего вещества (ОВ) путем обработки его специальными реагентами в менее токсичные реакционные массы (РМ). На второй стадии предусмотрено преобразование РМ в малотоксичные вещества. Например, детоксикация зарина и зомана осуществляется смесью моноэтаноламина (МЭА) и воды (80% МЭА, 20% вода) при температуре 100-105 °С и атмосферном давлении. Детоксикация осуществляется по следующему уравнению реакции (1):



Битумизация получаемой реакционной массы протекает при температуре 120-200 °С, в водной среде щелочного агента ГОК (гидроксида кальция) по уравнению реакции (2):



Для оперативного управления процессом уничтожения химического оружия (УХО) на предприятиях необходимо создать автоматизированные системы управления технологическими процессами и интегрированную систему связи [2,3]. Качество работы АСУТП обеспечивается наличием адекватных математических моделей управляемых объектов [1,4,5,8].

Целью создания автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) является повышение эффективности комплексов уничтожения химического оружия для уровня опасности, порождаемого объектом уничтожения в штатном режиме функционирования и не превышающего нормативного для объекта значения. Разработанная автоматизированная система управления технологическими процессами предназначена:

- для обеспечения контроля состояния технологических процессов и состояния технологического оборудования;

- для обеспечения заданных параметров и показателей технологического процесса;
- для защиты и блокировки основного технологического оборудования;
- для учета материальных и энергетических потоков.

Структура разрабатываемой системы управления является двухуровневой [7].

Нижний уровень системы управления предназначен для контроля и управления отдельными узлами с помощью программируемых контроллеров и реализует следующие функции:

- сбор и предварительную обработку информации о ходе и параметрах технологических процессов;
- контроль отклонения параметров от технологических норм;
- автоматическое регулирование технологических параметров;
- логическое управление узлами и агрегатами;
- противоаварийную автоматическую защиту и технологические блокировки;
- тревожную сигнализацию при возникновении аварийных ситуаций;
- передачу информации на верхний уровень.

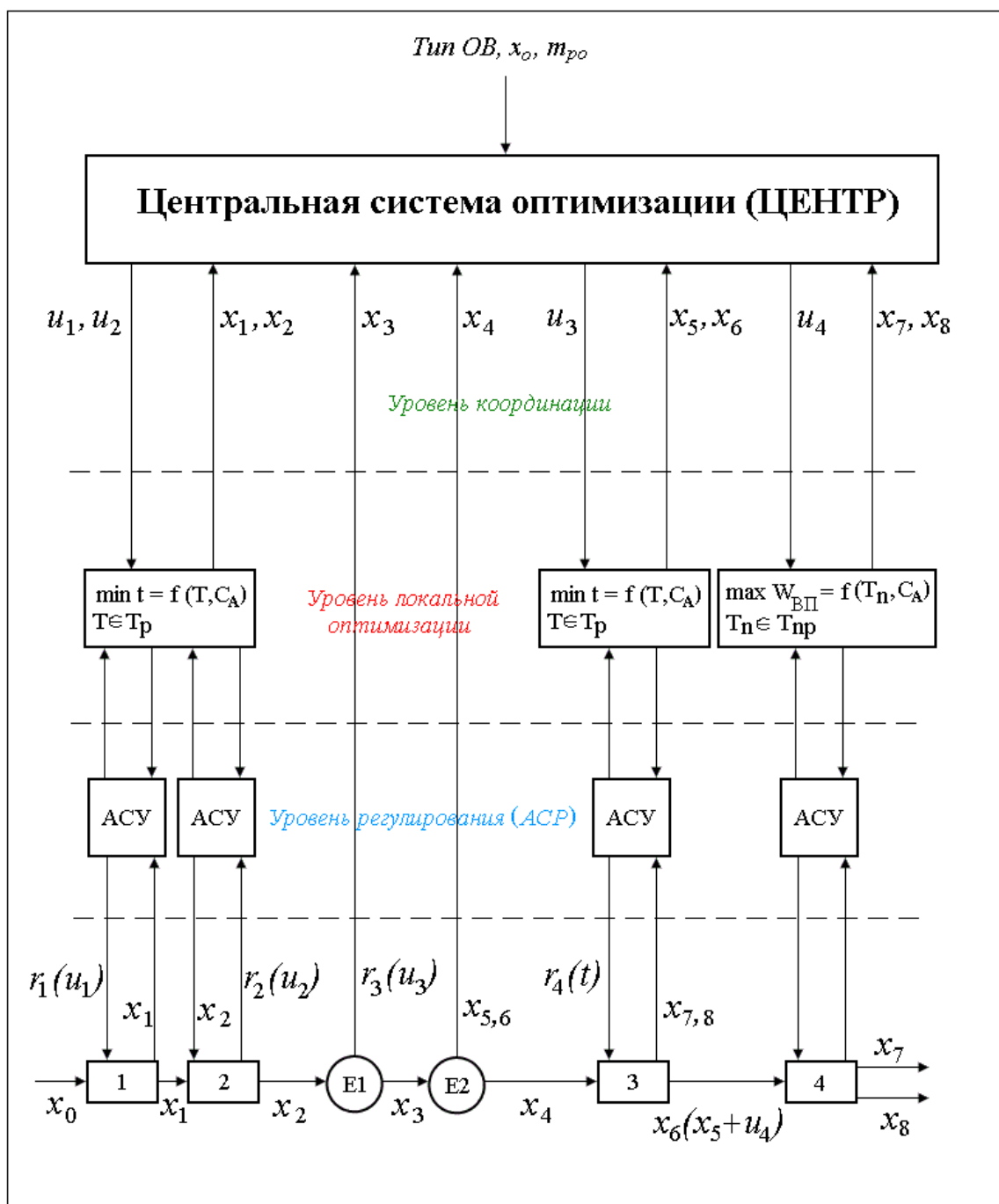
Верхний уровень обеспечивает:

- сбор и обработку полученной с нижних уровней информации;
- координацию работы узлов и агрегатов технологических стадий;
- управление работой программируемых контроллеров;
- анализ аварийных ситуаций и нарушений в ходе технологических процессов с выдачей оператору-технологу рекомендаций по их устранению;
- представление оператору полной информации о ходе технологических процессов;
- регистрацию технологических параметров и их отклонений от регламентных норм;
- учет технологического и вентиляционного оборудования;
- архивирование данных по технологическому процессу и работе комплекса технических средств;
- выдачу технологических рапортов;
- контроль работоспособности и диагностику состояния технических средств управления.

Центральная система оптимизации (ЦЕНТР) функционирует следующим образом.

Оператором-технологом вводится в систему значения коэффициентов ( $a_1 - a_6$ ) и значение массы ОБ  $x_0$ , поступившего на операцию детоксикации. Система производит расчёт управляющего воздействия –  $u_1$  (массы реагента для детоксикации ОБ) и выдаёт её величину на монитор оператора-технолога. По окончании операции детоксикации оператором-технологом в систему вводятся данные о результатах проведённой операции детоксикации  $x_1$

– масса реакционной массы (РМ). Система по значению  $x_1$  производит расчёт управляющего воздействия –  $u_2$  (массы реагента для дозревания) и выдаёт её величину на монитор оператора-технолога. По окончании операции дозревания оператором-технологом в систему вводятся данные о результатах проведённой операции дозревания (масса РМ в сборнике Е2) –  $x_4$ . Система по величине массы РМ в сборнике Е2 –  $x_4$  производит расчёт управляющего воздействия  $u_3$  – массы ГОК для нейтрализации РМ – и выдаёт её величину на монитор оператора-технолога. По окончании операции нейтрализации РМ оператором-технологом в систему вводятся данные о результатах проведённой операции нейтрализации  $x_5$  – масса нейтрализованной РМ. Система производит расчёт управляющего воздействия –  $u_4$  (массы битума для битумирования РМ) и выдаёт её величину на монитор оператора-технолога. По окончании операции битумирования оператором-технологом в систему вводятся данные о результатах проведённой операции –  $x_6$  (суммарная масса нейтрализованной РМ и битума, поступающая в роторно-пленочный испаритель (РПИ)). Системой также учитывается  $x_7$  – масса дистиллята (выпаренных растворителей и инертгов) и  $x_8$  – масса БСМ (битумно-солевой массы) [8,9]. Функциональная схема АСУТП представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Функциональная схема АСУТП комплекса УХО для зари́на (зомана)

На рисунке цифрами показаны: 1 – операция детоксикации ОВ, 2 – операция дозревания РМ, 3 – операция нейтрализации РМ, 4 – операция получения битумно-солевой массы (БСМ). Переменные функциональной схемы:

$x_0$  – масса ОВ, загружаемого в реактор детоксикации;

$m_{po}$  – масса реагента, поступающего в реактор детоксикации с ОВ;

$u_1$  – масса реагента для детоксикации ОВ;

$x_1$  – реакционная масса (РМ) после детоксикации ОВ;

$x_A^{(0)}$  – начальная концентрация ОВ в реакторе;

$\tilde{\delta}_A^{(1)}$  – конечная концентрация ОВ в реакторе;

$x_{1max}$  – предельная масса реагентов в реакторе детоксикации ( $x_{1max} = 0,6$ );

$u_2$  – масса реагента для дозревания;

$x_2$  – масса РМ в дозревателе;

$\tilde{\delta}_A^{(2)}$  – концентрация ОВ в реакционной массе после дозревания;

$x_{2max}$  – предельная масса реагентов в дозревателе ( $x_{2max} = 0,6$ );

$x_3$  – масса РМ в сборнике E1;

$x_4$  – масса РМ в сборнике E2;

$u_3$  – масса ГОК для нейтрализации зарина и зомана;

$x_{5max}$  – предельная масса реагентов в реакторе нейтрализации;

$x_5$  – масса нейтрализованной РМ зарина (зомана);

$u_4$  – масса битума;

$x_6$  – суммарная масса нейтрализованной РМ и битума, поступающая в роторно-пленочный испаритель (РПИ);

$x_7$  – масса дистиллята (выпаренных растворителей и инертв);

$x_8$  – масса БСМ.

$a_1$  – весовое соотношение реагирующих компонентов детоксикации ( $a_1 = 1,1$ );

$a_2$  – весовое соотношение реагирующих компонентов дозревания ( $a_2 = 0,05$ );

$a_3$  – весовое соотношение реагирующих компонентов нейтрализации ( $a_3 = 0,35$ );

$a_4$  – весовое соотношение массы нейтрализованной РМ и битума для получения БСМ ( $a_4 = 1,12$ );

$a_5$  – весовое соотношение массы дистиллята и суммарной массы нейтрализованной РМ и битума ( $a_5 = 0,2$ );

$a_6$  – весовое соотношение массы дистиллята и суммарной массы нейтрализованной РМ и битума ( $a_6 = 0,8$ ).

Задача оптимального управления для центральной системы оптимизации (ЦЕНТРА) при нейтрализации зарина (зомана) имеет вид:

$$\sum_0^8 x_i \rightarrow \min \quad (3)$$

при ограничениях:

$$(x_0 + u_1 + m_{po}) \leq x_{1max}; \quad (4)$$

$$(x_1 + u_2) \leq x_{2max}; \quad (5)$$

$$(x_3 - x_2) \geq 0; \quad (6)$$

$$(x_4 - x_3) \geq 0; \quad (7)$$

$$(x_4 + u_3) \leq x_{5max}; \quad (8)$$

И СВЯЗЯХ:

$$x_1 = x_0 + u_1; \quad (9)$$

$$u_1 = a_1 x_0 - m_{po}; \quad (10)$$

$$x_2 = x_1 + u_2; \quad (11)$$

$$u_2 = a_2 x_1; \quad (12)$$

$$x_3 = x_2; \quad (13)$$

$$x_4 = x_3; \quad (14)$$

$$x_5 = x_4 + u_3; \quad (15)$$

$$u_3 = a_3 x_4; \quad (16)$$

$$x_6 = x_5 + u_4; \quad (17)$$

$$u_4 = a_4 x_5; \quad (18)$$

$$x_7 = a_5 x_6; \quad (19)$$

$$x_8 = a_6 x_6; \quad (20)$$

Это задача линейного программирования, которая имеет следующую содержательную формулировку: определить такие численные значения  $x_0 - x_8$ , чтобы целевая функция (3) достигла минимума при выполнении условий (4) – (20) [6]. Поскольку каждая из последовательных технологических стадий локально оптимизирована, необходимо сформировать алгоритм координации работы стадий с учетом того обстоятельства, что процесс уничтожения химического оружия – циклический [10].

Алгоритм координации реализует следующую последовательность шагов:

1. Ввод данных о типе и массе ОВ –  $x_0$  и начальной массе реагента –  $m_{po}$ , поступившего с ОВ от станка расщепления и технологической линии детоксикации ОВ.

2. Расчёт массы загрузки реагента в реактор детоксикации  $u_1$  по формуле  $u_1 = a_1 x_0 - m_{po}$  ( $a_1 = 1,1$  для зарина;  $a_1 = 2,5$  для вязкого зомана).

3. Проверка ограничения  $x_1 = (x_0 + u_1 + m_{po}) \leq x_{1max}$ .

4. Выдача на уровень регулирования и уровень оптимизации значения  $u_1$ , если выполняется ограничение  $x_1 = (x_0 + u_1 + m_{po}) \leq x_{1max}$ . Если это ограничение не выполняется, то сообщение оператору: «Заполнение реактора более допустимого. Продолжать?».

5. Расчёт начальной концентрации ОВ:  $x_A^{(0)} = \frac{x_0}{x_0 + u_1 + m_{po}}$ .

6. Выдача на уровень оптимизации значения рассчитанной начальной концентрации ОВ  $x_A^{(0)}$ .

7. Выдача на уровень регулирования значения температуры в реакторе  $T_p = T_{pmax}$  (максимальное значение по регламенту).

8. Расчёт минимального времени пребывания реагентов в реакторе для регламентного значения конечной концентрации ОВ –  $x_A^{(1)}$  в реакторе:



$$t_{\min} = \frac{1}{k_0 e^{\frac{E}{RT_p \max}}} \ln \frac{x_A^{(1)}}{x_A^{(0)}}.$$

9. Сравнение конечной концентрации ОБ  $x_A^{(1)}$  в реакторе с регламентным значением  $x_{AP}^{(1)}$ :

- а) если  $x_A^{(1)} > x_{AP}^{(1)}$ , то проводится операция дозревания;
- б) если  $x_A^{(1)} \leq x_{AP}^{(1)}$ , то операция дозревания не проводится.

10. Расчёт массы загрузки реагента в дозреватель –  $u_2$  по формуле  $u_2 = a_2 x_1$  ( $a_2 = 0,05$ ).

11. Проверка ограничения  $x_2 = (x_1 + u_2) \leq x_{2max}$ ;

12. Выдача на уровень регулирования и уровень оптимизации значение  $u_2$ , если выполняется ограничение  $x_2 = (x_1 + u_2) \leq x_{2max}$ . Если это ограничение не выполняется, то сообщение оператору: «Заполнение дозревателя более допустимого. Продолжать?».

13. Выдача на уровень регулирования и уровень оптимизации значение  $u_1$ , если выполняется ограничение  $x_1 = (x_0 + u_1 + m_{po}) \leq x_{1max}$ . Если это ограничение не выполняется, то сообщение оператору: «Заполнение реактора более допустимого. Продолжать?».

14. Расчёт начальной концентрации ОБ

$$x_A^{(0)} = \frac{x_0}{x_0 + u_1 + m_{po}}$$

15. Выдача на уровень оптимизации значения рассчитанной начальной концентрации ОБ  $x_A^{(0)}$ .

16. Выдача на уровень регулирования значения температуры в реакторе  $T_p = T_{pmax}$  (максимальное значение по регламенту).

17. Расчёт минимального времени пребывания реагентов в реакторе для регламентного значения конечной концентрации ОБ  $x_A^{(1)}$  в реакторе:

$$t_{\min} = \frac{1}{k_0 e^{\frac{E}{RT_p \max}}} \ln \frac{x_A^{(1)}}{x_A^{(0)}}.$$

18. Сравнение конечной концентрации ОБ  $x_A^{(1)}$  в реакторе с регламентным значением  $x_{AP}^{(1)}$ :

- а) если  $x_A^{(1)} > x_{AP}^{(1)}$ , то проводится операция дозревания;
- в) если  $x_A^{(1)} \leq x_{AP}^{(1)}$ , то операция дозревания не проводится.

19. Расчёт массы загрузки реагента в дозреватель  $u_2$  по формуле  $u_2 = a_2 x_1$  ( $a_2 = 0,05$ ).

20. Проверка ограничения  $x_2 = (x_1 + u_2) \leq x_{2max}$ .

21. Вывод  $u_3, x_5, x_6, x_7$ .

Предложенные в статье подходы были использованы для разработки АСУТП объекта хранения и уничтожения химического оружия «Щучье» Курганской области.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стукалова Н.А., Матвеев Ю.Н., Долженко А.Б. Имитационная модель технологического процесса уничтожения химического оружия (зарина и зомана) // Интернет-журнал «Наукоедение», 2013 № 6 (19) [Электронный ресурс] - М.: Наукоедение, 2013 -.- Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/sbornik6/19.pdf>, свободный. - Загл. с экрана. - Яз. рус., англ.
2. Иващук В. В. Построение эффективных алгоритмов идентификации технологических объектов управления / В.В. Иващук // Приборы и системы: управление, контроль, диагностика.– 2001.– №10.– С. 68-72.
3. Характеристики уровня опасности, порождаемой техногенным объектом / В.М. Колодкин, А.В. Мурин, А.К.Петров // Вестник Удмуртского университета.– 2000. – №4.– С. 92-107.
4. Бояринов А.И. Методы оптимизации в химической технологии / А.И. Бояринов, В.В. Кафаров.– М.: Химия, 1975.– 576 с.
5. Матвеев Ю.Н. Техническая реализация функций и задач АСУ ТП на объекте уничтожения химического оружия / Ю.Н. Матвеев, Н.А. Стукалова // Промышленные АСУ и контролеры.– 2011.– № 2.– С.1-4.
6. Ю.Н. Матвеев. Основы построения автоматизированных систем оперативного управления технической безопасностью химических производств. Матвеев Ю.Н. //Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук / Тверь, ТвГТУ, 2011.
7. Матвеев Ю.Н. Автоматизированная система управления технологическими процессами уничтожения химического оружия / Ю.Н. Матвеев, Н.А. Стукалова // Информационно-вычислительные технологии и их приложения: сб. статей XIV Международной научно-технической конференции.– Пенза: МНИЦ ГСХА, 2010.– С. 88–91.
8. Матвеев Ю.Н. Модели для построения АСУТП объекта уничтожения химического оружия/Ю.Н. Матвеев, О.Л.Ахремчик//Кибернетика и высокие технологии 21 века: сб. докладов 12 Международной научно-технической конференции «С&Т 2011».— Воронеж: НПФ «Саквое» ООО», 2011.– С. 283–289.
9. Качество, надежность и безопасность средств и систем автоматизации уничтожения химического оружия: монография / Ю.Н. Матвеев [и др.]– Тверь: Альфа-Пресс, 2009. – 180 с: ил.
10. Матвеев Ю.Н. Основные подходы к построению моделей сложных систем / Ю.Н. Матвеев, Д.О. Крутиков // Программные продукты и системы.– 2007.– №2.– С. 64–65.

**Рецензент:** Дмитриев Геннадий Андреевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов ТвГТУ.

**Natalija Stukalova**

Tver State Technical University  
Russia, Tver  
E-Mail: [nast77@mail.ru](mailto:nast77@mail.ru)

**Jurij Matveev**

Tver State Technical University  
Russian Federation, Tver  
E-Mail: [matveev4700@mail.ru](mailto:matveev4700@mail.ru)

**Aleksej Dolzhenko**

Tver State Technical University  
Russian Federation, Tver  
E-Mail: [dolzhenko\\_2010@mail.ru](mailto:dolzhenko_2010@mail.ru)

## **Automatic managerial system technological process deleting the chemical weapon**

**Abstract.** This article investigated the possibility of operational management process of the destruction of chemical weapons. The paper deals with an automated process control system, which can improve the efficiency of the chemical weapons destruction facilities in the normal mode of operation. Formation of management tasks performed. The problem of optimal control is that minimizes problem. Problem operational management industrial complex sowed the problem of linear programming. The objective function of this problem is a linear function, which determines the maximum possible mass of toxic substances. The allowed range of parameters of technological operations (balance equation capacity, tolerances material flows, load range) defines the restrictions on the objective function.

**Keywords:** objects of destruction of chemical weapons; mathematical model; toxic chemicals; linear function; detoxification process; manufacturing operation; optimal control; tolerance range of regime parameters.

Identification number of article 54TVN414

## REFERENCES

1. Stukalova N.A., Matveev Yu.N, Dolzhenko A.B. Imitating model of technological process of destruction of the chemical weapon (sarin and soman), // *Naukovedeniye* 2013 № 6 (19) [Elektronnyj resurs] - M.: Naukovedeniye 2013 -.- Rezhim dostupa: <http://naukovedenie.ru/sbornik6/19.pdf>, svobodnyj. – Zagl. s jekrana. - Jaz. rus., angl.
2. Ivashhuk V. V. Postroenie jeffektivnyh algoritmov identifikacii tehnologicheskikh ob'ektov upravlenija / V.V. Ivashhuk // *Pribory i sistemy: upravlenie, kontrol', diagnostika.*– 2001.– №10.– S. 68-72.
3. Harakteristiki urovnja opasnosti, porozhdaemoj tehnogennym ob'ektom / V.M. Kolodkin, A.V. Murin, A.K.Petrov // *Vestnik Udmurtskogo universiteta.*– 2000. – №4.– S. 92-107.
4. Bojarinov A.I. Metody optimizacii v himicheskoj tehnologii / A.I. Bojarinov, V.V. Kafarov.– M.: Himija, 1975.– 576 s.
5. Matveev Ju.N. Tehnicheskaja realizacija funkcij i zadach ASU TP na ob'ekte unichtozhenija himicheskogo oruzhija / Ju.N. Matveev, N.A. Stukalova // *Promyshlennye ASU i kontrolery.*– 2011.– № 2.– S.1-4.
6. Ju.N. Matveev. Osnovy postroenija avtomatizirovannyh sistem operativnogo upravlenija tehnicheskij bezopasnost'ju himicheskikh proizvodstv. Matveev Ju.N. // *Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchjonij stepeni doktora tehnicheskikh nauk / Tver, TvGTU, 2011.*
7. Matveev Ju.N. Avtomatizirovannaja sistema upravlenija tehnologicheskimi processami unichtozhenija himicheskogo oruzhija / Ju.N. Matveev, N.A. Stukalova // *Informacionno-vychislitel'nye tehnologii i ih prilozhenija: sb. statej XIV Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskij konferencii.*– Penza: MNIC GSHA, 2010.– S. 88–91.
8. Matveev Ju.N. Modeli dlja postroenija ASUTP ob'ekta unichtozhenija himicheskogo oruzhija/Ju.N. Matveev, O.L.Ahremchik//*Kibernetika i vysokie tehnologii 21 veka: sb. dokladov 12 Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskij konferencii «C&T 2011».*— Voronezh: NPF «Sakvoee» OOO», 2011.– S. 283–289.
9. Kachestvo, nadezhnost' i bezopasnost' sredstv i sistem avtomatizacii unichtozhenija himicheskogo oruzhija: monografija / Ju.N. Matveev [i dr.]– Tver: Al'fa-Press, 2009. – 180 s: il.
10. Matveev Ju.N. Osnovnye podhody k postroeniju modelej slozhnyh sistem / Ju.N. Matveev, D.O. Krutikov // *Programmnye produkty i sistemy.*– 2007.– №2.