

УДК 539.1 + 628.5

## АНАЛИЗ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ И КИНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ УНИЧТОЖЕНИИ ХИМИЧЕСКИХ БОЕПРИПАСОВ

В. В. Кореньков, Ю. А. Кулагин, А. В. Токмаков, Б. Г. Трусов,  
Л. А. Шелепин, В. Н. Ярыгина

*Описывается технология уничтожения субэлементов химических боеприпасов в расплаве алюминия внутри печи-броннекамеры. Проведен анализ термохимических и кинетических процессов, протекающих при уничтожении химических боеприпасов. Рассчитан выход вторичных вредных веществ, образующихся при утилизации субэлементов внутри печи-броннекамеры.*

Для сохранения экологической безопасности при уничтожении химических боеприпасов разработана последовательность технологических операций [1 – 3], общая на всех объектах уничтожения химического оружия (ХО). Она включает в себя разборку снаряда, удаление взрывчатого вещества (ВВ) и его уничтожение, вскрытие корпуса снаряда, слив отравляющего вещества (ОВ) и его последующее сжигание, дегазацию корпуса снаряда посредством обжига и уничтожение отходов. Однако каждая из этих стадий опасна с точки зрения возможных утечек ОВ и заражения воздуха и оборудования. Поскольку химические боеприпасы долгое время хранились на складах, часть из них может находиться в аварийном состоянии. Это создает дополнительный риск заражения зданий и оборудования при их переработке. Часть химических боеприпасов содержит окончательно снаряженные субэлементы, уничтожение которых требует специального подхода.

Наибольший риск создают операции по перемещению вскрытых боеприпасов. Поэтому активно разрабатываются методы, позволяющие совместить в одной операции удаление ОВ, детоксикацию и сжигание ОВ, и обеззараживание корпусов. К таким работам относятся: сжигание боеприпасов без разрывных зарядов в расплаве солей, удаление ОВ из корпуса снаряда перегретым паром, выжигание ОВ внутри снаряда

кислородно-ацетиленовым пламенем, сжигание в печи после механической перфорации разрывного стакана [4]. Все эти методы требуют разборки боеприпаса и удаления взрывателя и ВВ, что создает высокую степень риска для персонала и окружающей среды.

Метод криодеструкции [5] позволяет перерабатывать боеприпасы без удаления взрывателя. Они охлаждаются жидким азотом и разрушаются прессом, осколки сжигаются в печи. Однако при этом нельзя исключить возможность детонации ВВ.

Для уничтожения аварийных боеприпасов целесообразно проводить их подрыв во взрывозащищенной камере и обезвредить ОВ в этой же камере путем удерживания его необходимое время при высокой температуре, обеспечивающей его полное разложение.

В настоящей статье предлагается технология уничтожения субэлементов аварийных химических боеприпасов в ходе одной технологической процедуры. Субэлементы помещаются в печь-броннекамеру, где происходит их разрушение или подрыв при нагреве в слое расплавленного алюминия. Температура в печи-броннекамере поддерживается на уровне  $500 - 700^\circ \text{C}$  и обезвреживание ОВ осуществляется путем его термического разложения. Стальные фрагменты боеприпаса собираются на дне алюминиевой ванны и удаляются после слива алюминия. Высокая температура и химическая активность расплава алюминия полностью гарантируют обеззараживание осколков и отсутствие ОВ в сливаемом металле. Реализация этой технологии позволяет проводить переработку химического боеприпаса в процессе одной технологической процедуры: в печи-броннекамере происходит разрушение боеприпаса, обезвреживание ОВ и ВВ и дегазация осколков корпуса.

При выборе любой технологии основными показателями являются эффективность уничтожения ОВ и вероятность возникновения аварийной ситуации. В рамках общего подхода необходим конкретный выбор конструкции взрывной камеры и режимов ее безопасного функционирования, определение основных параметров технологических процессов уничтожения аварийных элементов, разработка основных требований к системе очистки газов, определение основных параметров и состава оборудования для очистки.

В ходе разработки предлагаемой технологии были проведены расчеты состава и термодинамических свойств газовой смеси в печи-броннекамере после разрушения различных субэлементов и термического разложения их компонентов.

Таблица 1

Элемент	Резиновые смеси	Неметаллические материалы	Покрyтия	Взрывчатые вещества	Отравляющие вещества
9-А-3109	Смесь резиновая на основе метилстирольного каучука C <sub>13</sub> H <sub>14</sub> 14 г	Полиэтилен C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 40 г Прессматериал на основе фенолформальдегидной смолы 29 г Фенолформальдегидная смола C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> 10,7 г Бумага патронная и картон C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> 3 г	Эмаль ЭП-525 на основе эпихлоргидрина C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> OCl 4,1 г	Тротил C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub> O <sub>6</sub> 82 г Тетрил C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub> O <sub>8</sub> 8 г Гексоген C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> N <sub>6</sub> O <sub>6</sub> 1 г ДРП-3* 8,6 г (KNO <sub>3</sub> 6,45 г S 0,86 г C 1,3 г)	Зоман C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> FO <sub>2</sub> P 484 г
9-Б-3052	Смесь резиновая на основе бутадиинитрильного каучука C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> 7,6 г	Полиэтилен C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 40 г Прессматериал на основе фенолформальдегидной смолы 12,5 г Фенолформальдегидная смола C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> 3,4 г Бумага патронная и картон C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> 32 г	Эмаль ЭП-525 на основе эпихлоргидрина C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> OCl 4,1 г	Тротил C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub> O <sub>6</sub> 230 г Тетрил C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub> O <sub>8</sub> 14 г Гексоген C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> N <sub>6</sub> O <sub>6</sub> 1 г ДРП-3 8,6 г (KNO <sub>3</sub> 6,45 г S 0,86 г C 1,3 г)	Vx C <sub>11</sub> H <sub>26</sub> NO <sub>2</sub> PS 160 г
9-Б-3420		Картон, бумага и подпергамент C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> 3,7 г	Эмаль ЭП-525 на основе эпихлоргидрина C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> OCl 8,7 г	Тротил C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub> O <sub>6</sub> 348 г Тетрил C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub> O <sub>8</sub> 55 г К-991 C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> N <sub>6</sub> O <sub>6</sub> 2,5 г	Vx C <sub>11</sub> H <sub>26</sub> NO <sub>2</sub> PS 430 г
9Н227	Смесь резиновая на основе метилстирольного каучука C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> 1,6 г	Картон, бумага и подпергамент C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> 9 г Фенопласт на основе анилинформальдегидной смолы C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> No 4,7 г	Эмаль ЭПП-525 на основе эпихлоргидрина C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> OCl 11,2 г	Тротил C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub> O <sub>6</sub> 189 г Тетрил C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub> O <sub>8</sub> 21 г ДРП-3 12,5 г (KNO <sub>3</sub> 9,4 г S 1/25 г, C 1,9 г)	Vx C <sub>11</sub> H <sub>26</sub> NO <sub>2</sub> PS 912 г
9Н230		Полиамид N <sub>2</sub> C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub> 200,3 г Пенопласт 30 г Стеклотекстолит 11,3 г Клей ВК 10 г Компаунд 8 г Всего эпоксидной смолы C <sub>10</sub> H <sub>26</sub> O <sub>7</sub> 46,5 г Картон, бумага и подпергамент C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> 15 г	Эмаль ЭП-525 на основе эпихлоргидрина C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> OCl 10,2 г	Гексоген C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> N <sub>6</sub> O <sub>6</sub> 594 г Тетрил C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub> O <sub>8</sub> 4 г	Зоман C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> FO <sub>2</sub> P 777 г

\* дымный ружейный порох

Целью проведенных расчетов помимо определения концентраций вторичных вредных веществ, образующихся в результате термической обработки, было также определение давления в печи-бронеканере, оценка безопасного объема камеры и режимов ее эксплуатации. В качестве первого приближения использовалась модель локального термодинамического равновесия. Для расчетов использовалась программа TERRA [6, 7]. В качестве исходных данных рассматривался химический элементный состав веществ, которые предполагается подвергнуть термической обработке в камере. Помимо ОВ и ВВ в список рассматриваемых веществ включались конструктивные материалы, в том числе металл, резиновые смеси, неметаллические материалы и покрытия. Перечень неметаллических материалов, применяемых в конструкции субэлементов, подлежащих уничтожению, а также их суммарная масса в одном изделии и химический состав приведены в табл. 1. При задании начального химического состава учитывалось также начальное содержание воздуха в камере.

Таблица 2

Вещество	Концентрация при $t = 500^{\circ}\text{C}$ , $\text{г}/\text{м}^3$					Название	ПДК ( $\text{мг}/\text{м}^3$ )	Класс опасности
	9-Б-3109	9-Б-3052	9-Б-3420	9Н227	9Н230			
$\text{HF}$	6.2	–	–	–	10	Водород фтористый (г)*	0.5/0.1	I
$\text{HCl}$	0.2	0.12	0.27	0.34	0.3	Водорода хлорид (г)	5	II
$\text{H}_2\text{S}$	0.2	3.5	9	20	–	Сероводород (г)	10	II
$\text{P}_2\text{O}_5$	28	6	19	39	45	Ангидрид фосфорный (а)	I	II
$\text{PF}_3$	0.2	–	–	–	0.4	Фосфора трифторид (г)	0.3	II
$\text{POF}_3$	4.2	–	–	–	7.8	Фторокись фосфора (г)	0.15	I
$\text{C}(c)$	28	6	31	65	72	Сажа черная (а)	4	III
$\text{CO}$	8	11	10	6	7	Углерода оксид (г)	20	IV
$\text{COS}$	–	0.13	0.2	0.13	–	Углерода сероокись (г)	10	IV

\* (г) – газ; (а) – аэрозоль.

Основными продуктами термического разложения элементов боеприпасов сложной конструкции при температуре  $500 - 700^{\circ}\text{C}$  являются оксиды фосфора и элементарный



фосфор, фтористый водород, трифторид фосфора, фтороокись фосфора, оксид и диоксид углерода, сажа, сероводород, сероокись углерода, хлорид водорода, водород, вода, метан. Для каждого субэлемента был рассчитан выход продуктов термического разложения для камеры объемом  $6 \text{ м}^3$  и при температуре нагрева в камере  $500^\circ\text{C}$ . Для разработки системы газоочистки важно знать концентрации вредных веществ в абгазах на выходе реакционной камеры. Результаты расчета равновесных концентраций этих веществ сведены в табл. 2. Там же приведены класс опасности и предельно допустимые концентрации этих вредных веществ в воздухе рабочей зоны согласно ГОСТ 12.1.005-88\* [8]. Проведен расчет расхода кислорода воздуха, необходимого для полного окисления продуктов разложения.

На основании расчета состава продуктов термического разложения субэлементов в расплаве алюминия определены следующие условия обеспечения безопасной работы установки и системы газоочистки:

Максимальные концентрации токсичных веществ, которые будет поступать на систему очистки газов из печи-бронекмеры после термического разложения элементов, следующие:

Вещество	$\text{HF}$	$\text{HCl}$	$\text{H}_2\text{S}$	$\text{P}_4\text{O}_{10}$	$\text{PF}_3$	$\text{POF}_3$	$\text{C(c)}$	$\text{CO}$	$\text{COS}$
Максимальная концентрация, $\text{г/м}^3$	10	0.34	20	45	0.4	7.8	72	42	0.25

После дожигания (первый этап очистки) в результате полного окисления продуктов термического разложения субэлементов образуются максимальные количества токсичных веществ, которые должны быть задержаны системой газоочистки:

Вредное вещество	$\text{HF}$	$\text{HCl}$	$\text{SO}_2$	$\text{SO}_3$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{POF}_3$
Максимальная концентрация, $\text{г/см}^3$	13.8	0.33	36.8	14.3	50	0.77

В целом проведенное исследование позволяет провести оценку рабочих параметров установки и показывает возможности повышения экологической безопасности процесса уничтожения химических боеприпасов. Однако рассмотренная выше модель предельно равновесных превращений ОВ дает лишь первое приближение. Необходимо развитие неравновесной теории, которая могла бы предсказать газовый состав на различных стадиях процесса.

К сожалению в настоящее время термехимия фосфорорганических отравляющих веществ изучена очень мало. Исключительная токсичность фосфорорганических ОВ и способность их паров сорбироваться различными материалами делает проведение экспериментальных исследований кинетики их разложения чрезвычайно сложными. Поэтому расчетные методы проведения исследования термехимических процессов с участием молекул ОВ в настоящее время очень актуальны и представляют практический интерес.

Так, например, в США были разработаны программы, моделирующие процессы в печах для переработки ХО. В состав этих программных комплексов наряду с трехмерным моделированием процессов газодинамики и теплопередачи включены кинетические модели окислительной деструкции ОВ в пламени углеводородных топлив [9]. Из-за отсутствия данных экспериментальных исследований для проведения расчетов использовалась кинетическая модель процессов окисления имитатора зарина – диметилметилфосфоната. Реакции термического разложения ОВ без участия кислорода учитывались этой моделью наряду с множеством других реакций.

Т а б л и ц а 3

Химическая реакция	А	Е
ДЭМФ $\leftrightarrow$ PO(OH)(OC <sub>3</sub> H <sub>5</sub> )(H <sub>3</sub> ) + C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1 × 10 <sup>13</sup>	45300
PO(OH)(OC <sub>3</sub> H <sub>5</sub> )(CH <sub>3</sub> ) $\leftrightarrow$ PO(OH) <sub>2</sub> (CH <sub>3</sub> ) + C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	5 × 10 <sup>12</sup>	45300
PO(OH)(OC <sub>3</sub> H <sub>5</sub> )(CH <sub>3</sub> ) $\leftrightarrow$ CH <sub>3</sub> PO <sub>2</sub> + C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	2.5 × 10 <sup>13</sup>	44000
PO(OH) <sub>2</sub> (CH <sub>3</sub> ) $\leftrightarrow$ CH <sub>3</sub> PO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	5 × 10 <sup>13</sup>	39000
ДИМФ $\leftrightarrow$ PO(OH)(OC <sub>3</sub> H <sub>7</sub> )(CH <sub>3</sub> ) + C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	2 × 10 <sup>13</sup>	41200
PO(OH)(OC <sub>3</sub> H <sub>7</sub> )(CH <sub>3</sub> ) $\leftrightarrow$ PO(OH) <sub>2</sub> (CH <sub>3</sub> ) + C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	1 × 10 <sup>13</sup>	41200
PO(OH)(OC <sub>3</sub> H <sub>7</sub> )(CH <sub>3</sub> ) $\leftrightarrow$ CH <sub>3</sub> PO <sub>2</sub> + C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> OH	3.5 × 10 <sup>13</sup>	43000
ТЭФ $\leftrightarrow$ PO(OH)(OC <sub>3</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> + C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2.8 × 10 <sup>13</sup>	45300
PO(OH)(OC <sub>3</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> $\leftrightarrow$ PO(OH) <sub>2</sub> (OC <sub>3</sub> H <sub>5</sub> ) + C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1.9 × 10 <sup>13</sup>	45300
PO(OH)(OC <sub>3</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> $\leftrightarrow$ C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OPO <sub>2</sub> + C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	2.5 × 10 <sup>13</sup>	44000
PO(OH) <sub>2</sub> (OC <sub>3</sub> H <sub>5</sub> ) $\leftrightarrow$ PO(OH) <sub>3</sub> + C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	9.6 × 10 <sup>12</sup>	45300
PO(OH) <sub>2</sub> (OC <sub>3</sub> H <sub>5</sub> ) $\leftrightarrow$ HOPO <sub>2</sub> + C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	2.5 × 10 <sup>13</sup>	44000
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OPO <sub>2</sub> $\leftrightarrow$ HOPO <sub>2</sub> + C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1.9 × 10 <sup>13</sup>	45300
PO(OH) <sub>2</sub> (OC <sub>3</sub> H <sub>5</sub> ) $\leftrightarrow$ C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OPO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	5 × 10 <sup>13</sup>	45000
PO(OH) <sub>3</sub> $\leftrightarrow$ HOPO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	1.5 × 10 <sup>14</sup>	46000

Молекулы ОВ термически нестабильны и при относительно невысоких температурах распадаются в результате простых мономолекулярных реакций.

Детально кинетический механизм термического разложения ОВ изучался сотрудниками национальной лаборатории Лоренса Ливермора (США) на основании результатов исследований кинетики разложения специальных имитаторов фосфорорганических ОВ – триэтилфосфата (ТЭФ) диэтилметилфосфоната (ДЭМФ) и диизопропилметилфосфоната (ДИМФ) [10].

Реакции разложения перечисленных имитаторов ОВ и значения констант скоростей промежуточных реакций в зависимости от температуры для интервала температур 700 – 900 К даны в табл. 3 [10] (зависимость константы скорости от температуры задается формулой Аррениуса  $k = A \cdot e^{E/R \cdot T}$ ,  $R$  в кал/моль,  $T$  в К)

В РФ единственным используемым фосфорсодержащим имитатором фосфорорганических ОВ, является трибутилфосфат (ТБФ). По данным [11] значение константы скорости термического разложения ТБФ при 800°C  $k = 5.5 \text{ сек}^{-1}$ .

Проведенные в работе [12] исследования показали, что в термическом разложении зарина наиболее важной является реакция разложения зарина на пропилен и фторангидрид метилфосфоновой кислоты



В работе [9] дано значение константы скорости термического разложения зарина, рассчитанное на основании результатов экспериментальных исследований:

$$k = 2.03 \cdot 10^7 \cdot T^{1.62574} \cdot e^{40690/R \cdot T} \text{ сек}^{-1},$$

$R$  в кал/моль,  $T$  в К.

На основании приведенных значений констант скоростей разложения зарина и имитаторов ОВ можно оценить время разложения ОВ в печи-бронеканере. Результаты оценки времени разложения ОВ в камере от начальной концентрации 130 г/м<sup>3</sup> до значения ПДК рабочей зоны по зарину  $1 \cdot 10^{-5} \text{ мг/м}^3$  приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Температура в камере, °C	400	450	500	550	600	650
Время пребывания, сек	401	44	6.3	1.1	0.25	0.064

На основании проведенных оценок времени разложения ОВ в печи-бронеканере можно сделать вывод, что для полного разложения ОВ необходим нагрев до рабочей температуры не ниже  $500^{\circ}\text{C}$ .

Т а б л и ц а 5

Вещество	Название	Энтальпия образования, КДж/моль	Теплота плавления, $^{\circ}\text{C}$	Плотность $\text{г/см}^3$
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Оксид алюминия	-1675.7	2050	3.96
$\text{AlF}_3$	Фторид алюминия	-1210	1256 (возгонка)	3.1
$\text{Al}_2\text{S}_3$	Сульфид алюминия	-648.5	1100	2.02
$\text{AlN}$	Нитрид алюминия	-318	3000	3.26
$\text{Al}_4\text{C}_3$	Карбид алюминия	-206.9	> 2800	2.99

Т а б л и ц а 6

Вещество	Выход, г/изд	
	9Н227	9Н230
$\text{H}_2 \uparrow$	97	110
$\text{P}_2 \uparrow$	3	3.5
$\text{P}_4 \uparrow$	101	128
$\text{Al}_2\text{O}_3 \downarrow$	545	1025
$\text{AlF}_3 \downarrow$		119
$\text{Al}_2\text{S}_3 \downarrow$	171	
$\text{AlN} \downarrow$	778	1254
$\text{Al}_4\text{C}_3 \downarrow$	2179	2519

Следует отметить, что для определения условий безопасной работы установки уничтожения субэлементов химических боеприпасов и требований для проектирования системы газоочистки для расчетов был выбран наименее благоприятный вариант, когда в газовую фазу попадает все ОВ, находящееся в изделии. Расплавленный алюминий является химически активной средой. После детонации ВВ в изделии, находящемся под слоем расплава алюминия, ОВ будет взаимодействовать с химически активным металлом и подвергаться каталитическому разложению. Расчет, проведенный при помощи программы "TERRA", показал, что при взаимодействии расплава алюминия с



наполнением химических боеприпасов (ХБ) и продуктами его термического разложения при избыточном количестве алюминия возможно образование следующих солей и оксидов:  $Al_2O_3$ ,  $AlF_3$ ,  $Al_2S_3$ ,  $AlN$ ,  $Al_4C_3$ . Свойства этих веществ указаны в табл. 5. Все эти вещества тугоплавкие, с плотностью немного большей, чем плотность расплава (за исключением сульфида алюминия). Результаты расчета выхода солей при условии полного реагирования наполнения элементов 9Н227 и 9Н230 с алюминием даны в табл. 6.

При достаточном времени взаимодействия расплава алюминия с наполнением ХБ и продуктами его разложения расплав металла будет связывать токсичные фторсодержащие и серосодержащие компоненты, окислы азота и углерода и сажу. Более детальное исследование процессов взаимодействия расплава алюминия с ОВ и продуктами его разложения позволит оптимизировать работу установки уничтожения аварийных боеприпасов и повысить ее эффективность.

В целом проведенные расчеты позволили обосновать конструкцию установки для уничтожения субэлементов химических боеприпасов, температурный режим и другие рабочие параметры и выдать рекомендации для проектирования системы обезвреживания абгазов, однако для дальнейшей ее отработки необходимо проведение дополнительных исследований. Требуется в дальнейшем детально исследовать процессы, происходящие при нагреве и детонации элементов в расплавленном металле, нагреве и диспергировании ОВ при детонации ВВ, процессы испарения ОВ и возможного его разложения под воздействием ударных волн.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] P e t e r s o n C. R. Dismantlement and Destruction of Chemical, Nuclear and Conventional Weapons. Kluwer Acad. Publ. Netherlands, 1997, p. 135.
- [2] S t a r r o c k V. Dismantlement and Destruction of Chemical, Nuclear and Conventional Weapons. Kluwer Acad. Publ. Netherlands, 1997, p. 65.
- [3] П и р с о н Г. Уничтожение химического оружия в Великобритании. РХЖ, 39, вып. 4, 113 (1995).
- [4] Disposal of Chemical weapons: Alternative Technologies-Background Paper, ОТА-ВР-0-95. U. S. Government Printing Office, Washington, 1992.
- [5] К о ш е л е в В. М. и др. Химическое оружие. Экологические проблемы уничтожения. М., ВИНТИ, 1998, с. 36.

- [6] Т р у с о в Б. Г. Метод и алгоритм расчета равновесного состава и свойств многокомпонентных гетерогенных систем. М., МВТУ им. Н. Э. Баумана, 2000.
- [7] Т р у с о в Б. Г. Описание программы термодинамического расчета состава произвольных гетерогенных систем, а также их термодинамических и транспортных свойств. М., МВТУ им. Н. Э. Баумана, 2000.
- [8] ГОСТ 12.1.005-88\*. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
- [9] D e n i s o n M. K., M o n t g o m e r y C. J., S a r o f i m A. F., et al. IT3.03 Conference, May 12 - 16, 2003, Orlando, USA.
- [10] G l a u d e P. A., C u r r a n H. J., P i t z W. J., and W e s t b r o o k C. K. 29<sup>th</sup> Int. Symp. on Combustion, Jap., 2002.
- [11] Патент РФ N 2113874, 1995.
- [12] А л е к с а н д р о в В. Н. Отравляющие вещества. М., Воениздат, 1969.

Поступила в редакцию 21 июня 2004 г.