

АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРОДУКТОВ РАЗЛОЖЕНИЯ РОССИЙСКОГО ВЕЩЕСТВА VX В УСЛОВИЯХ КАТАЛИТИЧЕСКОГО МЕТАНОЛИЗА

Л.К. Густылева, Н.С. Хлебникова, Е.И. Савельева, А.С. Радилев

ФГУП «Научно-исследовательский институт гигиены, профпатологии и экологии
человека» ФМБА России
188663, Ленинградская область, Всеволожский район, г.п. Кузьмоловский,
ст. Капитолово, корп. 93
gustyleva@mail.ru

Поступила в редакцию 23 января 2013 г.,
после исправлений – 19 марта 2013 г.

Разработана химико-аналитическая платформа для оценки эффективности новых дегазирующих рецептур, включающая идентификацию продуктов превращения токсичных агентов и контроль степени их разложения в условиях, имитирующих реальные сценарии дегазации. Исследована эффективность каталитического метанолиза для разложения высокотоксичного соединения *O*-изобутил-*S*-[2-(*N,N*-диэтиламино)этил]метилтио-фосфоната, называемого российским веществом VX (далее RVX), в гомогенной и гетерогенной реакционных средах, а также на пластмассовых поверхностях. Подобраны и оптимизированы условия извлечения остаточных количеств RVX из реакционной смеси и определения его методом газовой хромато-масс-спектрометрии. Идентифицированы продукты разложения RVX, образующиеся при его деструкции в спиртовой среде в присутствии La-содержащего катализатора. Полученные данные позволяют сделать вывод о высокой эффективности предложенной рецептуры для химической нейтрализации RVX и рекомендовать ее использование для деконтаминации высокотехнологичного оборудования.

Ключевые слова: фосфорорганические отравляющие вещества, соединения группы VX, каталитический метанолиз, газовая хромато-масс-спектрометрия, деконтаминация.

Густылева Людмила Константиновна – старший научный сотрудник лаборатории аналитической токсикологии ФГУП «НИИГПЭЧ» ФМБА России.

Область научных интересов: хромато-масс-спектрометрия, аналитическая химия высокотоксичных соединений, анализ природных и технологических образцов.

Автор/соавтор четырех публикаций.

Хлебникова Наталья Семеновна - старший научный сотрудник лаборатории общей токсикологии и гигиенического нормирования ФГУП «НИИГПЭЧ» ФМБА России.

Область научных интересов: хромато-масс-спектрометрия, аналитическая химия высокотоксичных соединений, анализ природных, биологических и технологических образцов.

Автор/соавтор более 50 публикаций

Савельева Елена Игоревна – д.х.н., зав. лабораторией аналитической токсикологии ФГУП «НИИГПЭЧ» ФМБА России.

Область научных интересов: хромато-масс-спектрометрия, аналитическая химия высокотоксичных соединений, природных, биологических и технологических образцов, фармакокинетические исследования

Автор/соавтор более 50 публикаций

Радилев Андрей Станиславович – профессор, д.м.н., заместитель директора института по научной работе ФГУП «НИИГПЭЧ» ФМБА России.

Область научных интересов: токсикология, гигиена, профпатология и фармакология, нанотоксикология, оценка токсичности и опасности высокотоксичных соединений

Автор/соавтор более 350 публикаций

Введение

Фосфорорганические отравляющие вещества (ФОВ) группы VX являются сильнейшими нервно-паралитическими ядами. Соединения этой группы легко сорбируются поверхностями различных материалов, способны проникать вглубь природных и технологических матриц и прочно ими удерживаться, что затрудняет детоксикацию V-агентов на поверхностях различной химической природы. Разработка рецептур для деконтаминации поверхностей, загрязненных высокотоксичными веществами, актуальна не только в рамках мер по обеспечению безопасного уничтожения химического оружия, но и в связи с сохраняющейся угрозой химического терроризма. При этом многокомпонентные реакционные смеси, образующиеся при химической нейтрализации ФОВ, относятся к разряду сложных матриц для химического анализа.

Известные в настоящее время составы, используемые для обработки загрязненных отравляющими веществами поверхностей, неприменимы для обработки измерительной аппаратуры, компьютерной техники и других объектов, так как вызывают коррозию металлических частей и разрушающе воздействуют на многие типы поверхностей. Метод каталитического метанолиза предложен канадскими исследователями [1] для эффективной и в то же время достаточно бережной обработки загрязненных поверхностей и позволяет сохранить в рабочем состоянии электронные приборы, оптическую и измерительную аппаратуру. В работах [2-6] предложена технология деструкции фосфорорганических пестицидов и имитаторов ФОВ в спиртовой среде в присутствии катализаторов, содержащих ионы металлов. Авторы предлагают использовать эту технологию для химической нейтрализации фосфорсодержащих пестицидов и имитаторов ФОВ как альтернативу традиционным процессам гидролиза и сжигания. Предложенный метод может быть использован для деконтаминации различных типов поверхностей, загрязненных ФОВ, при этом каталитический состав не вызывает их разрушение и коррозию. Эффективность деконтаминации поверхностей дегазирующей рецептурой на основе La-содержащего катализатора связана с тем, что спирты глубоко проникают в материалы любой природы и способны образовывать гомогенные системы как с гидрофильными, так и с гидрофобными ингредиентами. Важно отметить, что определение остаточных количеств отравляющих веществ (ОВ) как в составе дегазирующих рецептур, так и на обработанных ими поверхностях является химико-аналитической задачей наивысшей категории сложности, поскольку определение ультраследовых количеств целевых веществ требуется проводить в агрессивных средах, содержащих продукты превращений как самих отравляющих веществ, так и

матричных компонентов, причем в концентрациях, зачастую в миллионы и более раз превышающих концентрации остаточных ОВ. В аналитической химии высокотоксичных веществ V-агенты без преувеличения можно рассматривать как вызов аналитику ввиду их сложного и не всегда предсказуемого поведения в различных средах, а также экстремальной токсичности, диктующей жесткие требования к чувствительности анализа.

В настоящей работе представлены результаты химико-аналитических исследований по оценке эффективности процесса каталитического метанолиза «российского» вещества типа VX (далее **RVX**) в гомогенных и гетерогенных системах. Работа выполнена при поддержке Агентства по охране окружающей среды Канады в рамках проекта CRTI-06-0170RD.

Экспериментальная часть

Приготовление дегазирующей рецептуры. Компоненты дегазирующей рецептуры и La-содержащий катализатор, привитый на твердый носитель, были любезно предоставлены Университетом Квинса (Канада), держателем патента. В качестве катализатора используется трифлат лантана в метанольном буферном растворе с *N*-этилморфолином, в качестве активатора – насыщенный метанольный раствор $Mg(OH)_2$.

La-содержащий катализатор на твердом носителе готовили следующим образом: силикагель с размером частиц 40-63 мкм и размером пор 6 нм с привитыми к поверхности функциональными бензильными группами модифицировали иминодиуксусной кислотой, а затем обрабатывали трифлатом лантана для образования комплексов с ионами лантана. Содержание ионов La^{3+} на твердом носителе составляет 0.36 мкмоль/г по данным [6].

В работе использовали стандартный образец *O*-изобутил-*S*-[2-*N,N*-(диэтиламино)этил] метилтиофосфоната (RVX) ГСО 8249-2004 с массовой долей основного вещества 91.0-95.0 % мас. с погрешностью аттестованного значения ± 1 % при $P = 0.95$.

Приготовление реакционной смеси. Из приготовленной дегазирующей рецептуры отбирали 100 мм³ и добавляли к ним 2 мм³ RVX. Смесь тщательно перемешивали в течение 30 с. Поскольку было отмечено разрушительное воздействие рецептуры на неподвижную фазу капиллярной колонки, определение остаточного содержания RVX после нейтрализации катализатором проводили в гексановых экстрактах.

Приготовление гексановых экстрактов из реакционной смеси. Для приготовления гексановых экстрактов через 1, 2, 5 и 10 минут после начала реакции отбирали по 10 мм³ реакционной смеси и вносили их в виалу, содержащую 100 мм³ гексана. Полученную смесь тщательно перемешивали

вали в течение 20 с. Отбирали и анализировали 1 мм³ экстракта.

Определение интервала рабочих концентраций дегазирующей рецептуры. Для определения влияния разбавления рецептуры метанолом на эффективность разложения RVX были приготовлены растворы, с концентрацией 15, 25 и 50 %. Затем в виалу вносили по 100 мм³ растворов и добавляли к ним 2 мм³ RVX. Полученные растворы перемешивали и отбирали по 10 мм³ через 1, 2, 5, 10, 15 и 20 минут после начала реакции, из отобранных проб готовили гексановые экстракты, в которых затем определялось остаточное количество RVX.

Приготовление буферного раствора для тестирования эффективности разложения RVX в гетерогенной каталитической системе. Для приготовления метанольного буферного раствора в виалу объемом 4 см³ вносили 2.4 см³ метанола, добавляли 0.1 см³ 0.2 М раствора метилморфолина в метаноле, предварительно нейтрализованного 0.2 М раствором хлорной кислоты. Конечная концентрация метилморфолина в буферном растворе составляла 4·10⁻³ М. Для приготовления гетерогенной каталитической системы взвешивали 50 мг La³⁺-содержащего катализатора, промывали его тремя порциями метанола по 2.5 см³. Промытый катализатор добавляли в 2.5 см³ приготовленного метанольного буферного раствора. Гетерогенную каталитическую систему готовили перед каждым добавлением RVX. Так как метанольный буферный раствор не оказывал значительного разрушающего влияния на капиллярную хроматографическую колонку, остаточное количество RVX определяли непосредственно в пробах реакционной смеси. В инжектор хроматографа вводили 1 мм³ реакционной смеси.

Получение летучих триметилсилильных эфиров продуктов деструкции RVX. Идентификацию нелетучих продуктов нейтрализации RVX, образующихся в условиях каталитического метанолиза, проводили после дериватизации этих соединений силилирующим агентом N,O-бис-триметилсилилтрифторацетамидом (BSTFA). В 100 мм³ каталитической рецептуры добавляли 2 мм³ RVX, тщательно перемешивали, полученный раствор выдерживали в течение трех часов, затем подкисляли его до pH = 3 0.1N раствором HCl в метаноле. Затем отбирали 20 мм³ полученного раствора, добавляли 100 мм³ гексана и проводили экстракцию. Экстракт помещали в коническую виалу, упаривали досуха и перерастворяли в 20 мм³ ацетонитрила, добавляли 10 мм³ раствора m-фторбензойной кислоты с концентрацией 200 нг/мм³ в качестве внутреннего стандарта и 50 мм³ BSTFA. Пробу выдерживали 30 минут при 70 °С. В испаритель хроматографа вводили 1 мм³ смеси.

Для определения нелетучих продуктов деструкции RVX в гетерогенной каталитической си-

стеме из реакционной массы отбирали 100 мм³ и упаривали досуха в токе азота. Затем к сухому остатку добавляли 50 мм³ BSTFA и 50 мм³ ацетонитрила. Пробу термостатировали при 70 °С в течение 30 минут и отбирали 1 мм³ и вводили в инжектор хроматографа.

Условия хромато-масс-спектрометрического анализа. Все определения остаточного содержания RVX в экстрактах и растворах проводили на газовом квадрупольном хромато-масс-спектрометре GCMS QP-2010 Plus производства фирмы Шимадзу (Япония) при одновременной регистрации сигнала в режимах сканирования полного ионного тока в диапазоне m/z от 40 до 450 у.е. и мониторинга избранных ионов: 86, 99 m/z. Режим ионизации электронами, 70 эВ. Температура ионного источника - 200 °С, температура интерфейса - 280 °С. Хроматографическое разделение проводили на WCOT-колонке DB-5MS длиной 25 м × 0.2 мм × 0.33 мкм в режиме программирования температуры от 50 °С (5 мин) до 150 °С со скоростью 10 °С/мин, далее подъем температуры до 250 °С со скоростью 15 °С/мин. Скорость газа-носителя гелия 1.5 см³/мин. Температура инжектора 250 °С. Режим ввода пробы без деления потока. Градуировку проводили с использованием градуировочных растворов RVX. Предел обнаружения RVX составляет 0.5 мкг/см³.

При анализе продуктов разложения RVX в гетерогенной системе пробу вводили в хроматограф в режиме деления потока 1 к 50. Температурную программу варьировали в зависимости от решаемой задачи.

Результаты и их обсуждение

Комплексное исследование по оценке перспективности новой дегазирующей рецептуры должно включать оценку скорости и полноты нейтрализации высокотоксичных веществ в условиях, максимально приближенных к реальным. В то же время на первом этапе исследований кинетику разложения токсичных веществ с помощью новых рецептур удобнее оценить с использованием самой простой модели – в растворе.

Исследование эффективности разложения RVX в гомогенной системе. На первом этапе работы в серии параллельных опытов было подтверждено количественное разрушение RVX в течение первой минуты после начала взаимодействия с дегазирующей рецептурой в соотношении 1 : 50 (v/v). В реакционной смеси идентифицированы 2-диэтиламиноэтантол, метиловый эфир O-изобутилметилфосфоновой кислоты, диизобутиловый эфир метилфосфоновой кислоты, 2,2'-дитио-бис(N,N-диэтил-)этанамин. Также установлено, что при выдержке реакционной смеси в течение 4-5 часов 2-диэтиламиноэтантол практически полностью переходит в 2,2'-дитио-бис(N,N-диэтил-)этанамин.

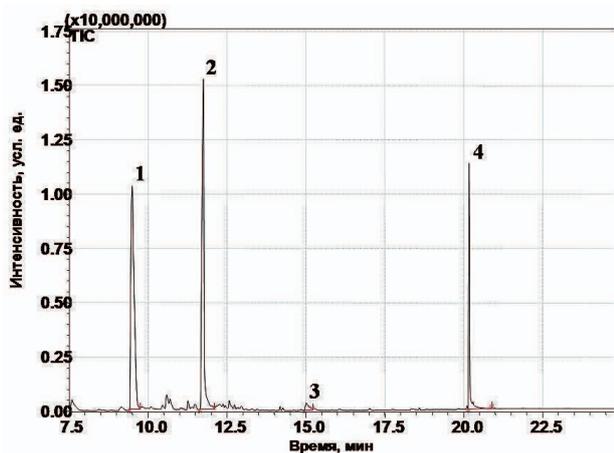


Рис. 1. Хроматограмма гексанового экстракта, отобранного через одну минуту из реакционной смеси RVX и дегазирующей рецептуры. Цифрами на хроматограмме обозначены: 1 - 2-диэтиламиноэтантол, 2 – метиловый эфир О-изобутилметилфосфоновой кислоты 2-диизобутиловый эфир метилфосфоновой кислоты, 4 - 2,2'-дитио-бис(N,N'-диэтил-)этанамин

На рис. 1 приведена типичная хроматограмма гексанового экстракта пробы, отобранной из реакционной смеси через одну минуту после начала реакции. В виде триметилсилиловых эфиров в качестве основного и минорного нелетучих продуктов реакции идентифицированы О-изобутилметилфосфоновая и метилфосфоновая кислоты.

Образовавшиеся нетоксичные летучие и нелетучие продукты разложения в дальнейшем могут быть утилизированы в обычном порядке.

Исследование эффективности деконтаминации при различном содержании катализатора в реакционной смеси. Для особо чувствительного оборудования или его частей деконтаминацию предполагается проводить без непосредственного воздействия химических реагентов на оборудование, а именно экстракцией ФОВ с поверхностей оборудования метанолом с последующим обезвреживанием экстракта. Поэтому важно установить, в какой мере разбавление каталитической системы приведет к снижению ее активности.

В табл. 1 приведены данные по остаточному содержанию RVX в экстрактах из реакционных смесей с различным содержанием дегазирующей рецептуры. Из таблицы видно, что полная нейтрализация RVX возможна только при разбавлении каталитической рецептуры не более чем вдвое, после чего необходимо готовить новый состав. В то же время преимуществом этого метода нейтрализации RVX является возможность повторного использования La-содержащего катализатора после выделения его из реакционной смеси и последующей регенерации.

Тестирование эффективности разложения RVX на пластмассовых поверхностях при их дегазации каталитической рецептурой. Для определения эффективности нейтрализации RVX на пластмассовых поверхностях каталитической рецептурой в качестве модели полимерной поверхности были выбраны клавиши компьютерной клавиатуры. В первоначальных экспериментах эффективность дегазации RVX на пластмассовых поверхностях (в отличие от дегазации в растворах) была низкой.

Возникло предположение, что неполное разложение RVX связано с быстрым испарением метанола с открытой поверхности. Для проверки этого предположения был проведен ряд опытов, во время которых после нанесения каталитической рецептуры на загрязненную RVX клавишу ее выдерживали в течение 30 мин в закрытом боксе объемом 50 см³ для предотвращения интенсивного испарения метанола. Через 30 мин бокс открывали и выдерживали клавишу еще 30 мин на воздухе. За это время весь раствор реакционной смеси полностью испарялся с поверхности клавиши. Эффективность разложения RVX в этих условиях достигала 99.995 %.

Таким образом, было установлено, что эффективность деконтаминации RVX каталитической рецептурой на пластиковой поверхности в значительной мере определяется скоростью испарения растворителя с поверхности. Если процесс нейтрализации проводить в условиях, обеспечивающих медленное испарение растворителя, то содержание RVX на поверхности снижается в

Таблица 1

Изменение остаточного содержания RVX в реакционной смеси с различным содержанием каталитической рецептуры

Содержание каталитической рецептуры в метаноле, %	Остаточное содержание RVX в реакционной смеси, % от исходного количества					
	1 мин	2 мин	5 мин	10 мин	15 мин	30 мин
100	<1	<1	<1	<1	<1	<1
50	1.4	<1	<1	<1	<1	<1
25	26	6	1	0.25	0.35	0.25
15	30	-	21	-	22	23

Примечание: «-» - определение RVX не проводилось.

10000 раз за 30 минут. Следовательно, снижение скорости испарения растворителя обеспечивает более полную деконтаминацию поверхностей.

Исследование эффективности разложения RVX в гетерогенной системе. Для обезвреживания жидких отходов ФОВ предполагается пропускать их через слой La-содержащего катализатора, нанесенного на твердый носитель. Катализатор в этом случае представляет собой силикагель с размером частиц 40-63 мкм с привитыми к его поверхности функциональными группами, содержащими ионы лантана.

На первом этапе эффективность твердофазного катализатора исследовали в статическом режиме. Буферный раствор и без катализатора достаточно эффективно разлагал RVX.

Чтобы определить, насколько ускоряет разложение RVX добавка La-содержащего катализатора, в равные объемы гетерогенной системы, содержащие по 50 мг катализатора, вносили различные количества RVX, как указано в табл. 2. Остаточное содержание агента в гетерогенных системах определяли через 30 с после начала реакции. Полученные результаты представлены в табл. 2. Добавка катализатора позволяет нейтрализовать примерно в 10 раз большее количество RVX за 30 с, чем в отсутствие катализатора. В пробах были идентифицированы те же продукты деструкции RVX, что и в гомогенной системе.

Чтобы иметь возможность более подробно исследовать кинетику реакции, каталитическую систему разделили на аликвотные части равного объема, в аликвотные части последовательно добавляли по 2.5 мкмоль RVX с тем расчетом, чтобы начать ГХ-МС анализ через 2, 5, 8 и 12 минут после начала реакции. Изменение остаточного содержания RVX в реакционных смесях отражает рис. 2.

Установлено, что за 25 минут гетерогенная система способна полностью нейтрализовать 2.5 мкмоль RVX.

Для определения максимального количества RVX, которое может быть нейтрализовано гетерогенной каталитической системой с 50 мкг катализатора, в нее порциями добавляли RVX и измеряли его содержание через 30 с и 30 минут после добавки, затем добавляли следующую пор-

Остаточное содержание RVX в гетерогенной системе через 30 с и 30 минут в зависимости от массы внесенного RVX

Номер добавки	Масса внесенного RVX, мкг	Остаточное содержание RVX через 30 сек, мкг	Остаточное содержание RVX через 30 мин, мкг
1	267	-*	-*
2	534	21.5	-*
3	801	37.5	-*
4	1068	67.5	-*
5	1335	155	5

Примечание: -* - RVX не обнаружен.

Таблица 2

Зависимость эффективности разложения RVX гетерогенной системой от массы внесенного RVX.

Масса добавки RVX, мкг	Остаточное содержание RVX через 30 с, мкг
100	-*
200	3.25
400	37.5
540	212.5
667	260

Примечание: -* - RVX не обнаружен.

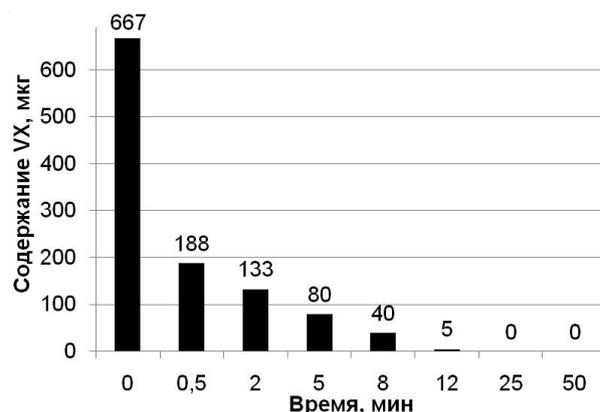


Рис. 2. Изменение остаточного содержания RVX в реакционной смеси при непрерывном перемешивании. Исходное содержание RVX - 667 мкг. Всего в реакционную смесь было сделано 4 добавки. Результаты определения остаточного содержания RVX в гетерогенной системе приведены в табл. 3.

После добавления в смесь 5 мкмоль агента через 16 часов остаточное содержание RVX в смеси было менее 0.02 мкмоль. Через 2 минуты после добавки в смесь еще 1 мкмоль RVX остаточное содержание RVX составило 1 мкмоль, а через 30 минут 0.34 мкмоль. На основании полученных данных можно сделать вывод, что максимальное количество RVX, которое может быть нейтрализовано гетерогенной системой, содержащей 50 мг La-содержащего катализатора, привитого на твердый носитель, за 30 минут составляет примерно 1 мг.

Таблица 3

Хорошие кинетические характеристики твердофазного катализатора позволяют рекомендовать его к применению для обезвреживания жидких отходов ФОВ в динамическом режиме. Дегазирующие рецептуры рассматриваются как наиболее сложные матрицы не только при решении задач определения остаточных концентраций токсичных агентов, но и при идентификации и количественном определении продуктов их трансформации. Исследование кинетических характеристик новых дегазирующих составов требует нестандартного подхода как в части дизайна эксперимента, так и в части непосредственно аналитических измерений.

Заключение

Проведенное комплексное химико-аналитическое исследование может рассматриваться как экспериментальная модель для оценки эффективности новых рецептур, разрабатываемых для деkontаминации поверхностей, загрязненных высокотоксичными веществами. Показано, что наряду с контролем остаточного количества ОВ после дегазации, необходимо проводить идентификацию продуктов разложения ОВ и оценку их токсичности. Установлено, что в процессе каталитического метанолиза как в гомогенной, так и в гетерогенной системах, образуются малотоксичные летучие и нелетучие продукты деструкции, что позволяет провести эффективную дегазацию материалов и оборудования, контаминированного RVX. Основными летучими продуктами каталитического метанолиза RVX являются малотоксичные соединения: N,N-диэтиламинэтантол, изобутилметил

метилфосфонат и 2,2'-дитио-бис(N,N-диэтил)этанамин, нелетучими - метилфосфоновая и изобутилметилфосфоновые кислоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tsang J.S., Neverov A.A., Brown R.S. Billion-fold Acceleration of the Methanolysis of Paraoxon Promoted by La(OTf)₃ in Methanol // J. Am. Chem. Soc. 2003. V. 125. P. 7602-7607.
2. Brown R. S., Neverov A.A., Tsang J.S.W. Method of decomposing organophosphorus compounds // WIPO Patent Application WO/2004/080543.
3. Desioges W., Neverov A.A., Brown R.S. Zn²⁺-Catalyzed Methanolysis of Phosphate Triesters: A Process for Catalytic Degradation of the Organophosphorus Pesticides Paraoxon and Fenitriton // Inorg. Chem. 2004. V. 43. P. 6752-6781.
4. Lewis R.E., Neverov A.A., Brown R.S. Mechanistic studies of La³⁺ and Zn²⁺-catalyzed methanolysis of O-ethyl-O-aryl methylphosphonate esters. An effective solvolytic method for the catalytic destruction of phosphonate CW stimulants // Org. Biomol. Chem. 2005. V. 3. P. 4082-4088.
5. Basab B.D., Edwards D.R., Brown R.S. A study of the kinetics of La³⁺-promoted methanolysis of S-aryl methylphosphonothioates: possible methodology for decontamination of EA 2192, the toxic byproduct of VX hydrolysis // Inorg. Chem. 2011. V. 50, № 7. P. 3071-3077.
6. Tamer A., Neverov A.A., Brown R.S. Efficient Methanolysis Cleavage of Phosphate, Phosphonate, and Phosphonothioate Esters Promoted by Solis Supported Lanthanide Ions // Ind. Eng. Chem. Res. 2010. V. 49. P. 7027-7033

ANALYSIS OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE PRODUCTS OF La-CATALYZED METHANOLYSIS OF RUSSIAN VX

L.K. Gustyleva, E.I. Savel'eva, N.S. Khlebnikova, A.S. Radilov

*Research Institute of Hygiene, Occupational Pathology and Human Ecology
Federal State Unitary Enterprise Federal Medical Biological Agency
p/o Kus'molovsky, Leningrad Region, Russia, KapitoloVo, 93, 188663
gustyleva@mail.ru*

Analytical platform for the testing new decontaminating formulations, involving identification of toxic destruction products and determination of the depth of decontamination under conditions mimicking real decontamination scenarios, was developed. The possibility of application of catalytic methanolysis for destruction of a highly toxic compound O-isobutyl S-[2-(N,N-diethylamino)ethyl] methylphosphonothioate referred to Russian VX (hereinafter, RVX) in homogeneous and heterogeneous reaction media are studied. Conditions for extraction of residual RVX from the reaction mixture, as well as GC-MS analysis of RVX were found and optimized. Destruction products of RVX, formed by its La-catalyzed methanolysis were identified. Efficiency of the catalytic formulation for decontamination of RVX-contaminated plastic surfaces was studied. The obtained results provide evidence for a high efficiency of the catalytic methanolysis for chemical neutralization of RVX and allow this process to be recommended for decontamination of engineering equipment.

Key words: toxic organophosphorus compounds, VX-group compounds, catalytic methanolysis, gas chromatography-mass spectrometry, decontamination