

# МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 623.459.454:542.983 © В.Н. БОРДАКОВ, А.Ф. ЕРМОЛОВ, А.Н. СИНИЦИН, 2008

## ЭЖЕКТОРНАЯ СИСТЕМА ГАЗООЧИСТКИ

Валерий Николаевич БОРДАКОВ родился в 1954 г. в городе Игналине Литовской ССР. Главный конструктор «Федеральной Ассоциации двойные технологии». Кандидат технических наук. Основные научные интересы — в области создания ракетных двигателей твёрдого топлива, химической технологии. Автор более 50 научных работ.

Valery N. BORDAKOV, Ph.D., was born in 1954, in Ignalina, Lithuania. He is the Chief Designer at the Federal Association of Twofold Purpose Technologies. His research interests are in solid-propellant rocket engines and chemical technologies. He has published over 50 technical papers.

Александр Фридрихович ЕРМОЛОВ родился в 1953 г. в городе Москве. Начальник научно-исследовательской группы Военной академии радиационной, химической и биологической защиты. Кандидат химических наук, старший научный сотрудник. Основные научные интересы — в области органической химии, синтеза серосодержащих соединений. Автор более 40 научных работ.

Alexander F. ERMOLOV, Ph.D., was born in 1953, in Moscow. He is the Head of a Research Team at the Military Academy of Radiological, Chemical and Biological Defense. His research interests are in biochemistry and synthesis of sulfur-containing compounds. He has published over 40 technical papers.

Алексей Николаевич СИНИЦИН родился в 1947 г. в городе Москве. Старший научный сотрудник Военной академии радиационной, химической и биологической защиты. Кандидат химических наук. Основные научные интересы — в области аналитической химии, биохимии, токсикологии. Автор более 40 научных работ.

Alexey N. SINITSYN, Ph.D., was born in 1947, in Moscow. He is a Senior Research Associate at the Military Academy of Radiological, Chemical and Biological Defense. His research interests are in analytical chemistry, biochemistry, toxicology. He has published over 40 technical papers.

*В статье представлены результаты экспериментального исследования очистки газофазной смеси от ядовитых компонентов в жидкостно-газовом эжекторе.*

### Сокращения и обозначения

ОВ — отравляющие вещества;  
N-МП — N-метилпирроллидон;  
МЭА — моноэтаноламин;  
ЭДА — этилендиамин;  
 $p_{\text{нас}}^t$  — давление насыщенных паров реагента при температуре  $t$ ;  
 $C_{\text{max}}^t$  — максимальная концентрация паров реагента при температуре  $t$ ;  
 $d_4^{20}$  — относительная плотность компонента;  
 $\eta$  — динамическая вязкость реагента;

ОБУВ — ориентировочно безопасный уровень воздействия;

ПДК — предельно допустимая концентрация.

В настоящее время на объектах уничтожения химического оружия очистка газофазных потоков от ядовитых веществ осуществляется с помощью адсорбционных фильтров на основе специальных марок активированного угля. Эффективность адсорбционных фильтров зависит от длительности эксплуатации, состава и содержания токсичных веществ в потоке, поступающем на очистку. Недостаток таких фильтров заключается в необходимости последующей утилизации больших объёмов акти-

вированного угля, в существенном аэродинамическом сопротивлении и проницаемости для ультрадисперсных частиц конденсированной фазы токсичных соединений, например двуокиси мышьяка.

На наш взгляд, одним из методов решения проблемы улучшения технической эффективности и повышения экологической безопасности на объектах уничтожения химического оружия является разработка и реализация двухстадийного процесса газоочистки. Предлагается дополнить существующий адсорбционный фильтр ступенью предварительной очистки: удалить из газового потока более 97—98 % опасных соединений, а затем предварительно очищенный поток направить в адсорбционный фильтр.

Анализ литературы показал, что в нефтехимической промышленности для газоочистки применяются различные типы струйных аппаратов — эжекторов. В основе использования эжекторной технологии лежит известный эффект абсорбции струями жидкости. Например, водяная струя диаметром всего 4 мм длиной 6 см абсорбирует  $(1 \div 2) \cdot 10^{-4}$  г/с углекислого газа [1]. Интенсификация процессов гидродинамического взаимодействия в системе струя жидкости — газ существенно активизирует абсорбцию. Очевидно, что использование в качестве основного потока химически активного реагента увеличивает эффективность очистки газового балласта в несколько раз, вследствие хемосорбции.

Интерес к струйным аппаратам определяется ещё и тем фактором, что традиционно для обеспечения безопасных условий уничтожения химического оружия перекачка компонентов и удаление газообразных продуктов детоксикации осуществляются под вакуумом. Использование механических вакуумных насосов для откачки газового балласта чревато накоплением в затворной жидкости значительных количеств токсичных веществ, быстрым насыщением и очевидными дополнительными затратами при проведении регламентных работ.

В то же время эжектор как элемент вакуумной системы лишен недостатков, присущих механическим насосам, поскольку позволяет использовать в качестве рабочей среды химически активные нейтрализующие растворы. В жидкостно-газовом эжекторе в результате интенсивного смешения основного (подаваемого в сопло эжектора) и спутного (всасываемого) потоков происходит не только активная адсорбция паров летучих реагентов из газового потока, но и химическое взаимодействие реагентов в условиях интенсивного турбулентного смешения. Кроме того, сжатие газового балласта на выходе диффузора эжектора позволяет парировать аэроди-

намическое сопротивление, возникающее на выходном адсорбционном фильтре.

Таким образом, применение эжектора объединяет в одном агрегате две стадии технологического процесса: вакуумирование и хемосорбцию ядовитых веществ. Кроме того, при использовании жидкостно-газового эжектора решается проблема фиксации ультрадисперсных конденсированных частиц опасных соединений, имеющих большую длительность витания, например двуокиси мышьяка. Эффективность жидкостно-газовой эжекторной системы вакуумирования и газоочистки напрямую зависит от физико-химических свойств компонентов основного потока.

Основная цель работы — экспериментальное исследование и обоснование эффективности использования эжекторной системы для вакуумирования и очистки газообразных потоков от паров ОВ.

В технологических процессах химической детоксикации компонентов боевых отравляющих веществ используются водные растворы едкого натра, азотнокислого калия, амины, дополнительные растворители, например N-МП.

Большинство отравляющих веществ, особенно иприт, характеризуются низкой растворимостью в воде. Иприт и его аналоги,  $\alpha$ - и  $\beta$ -люизит, треххлористый мышьяк обладают электрофильными свойствами. Поэтому для нейтрализации паров ОВ и опасных соединений, содержащихся в газах, поступающих на очистку, применяется широкий ряд нуклеофильных реагентов: водные растворы щелочей и органических соединений, аммиачная вода, спирты, спиртовые растворы алколюлятов, первичные и вторичные амины, сульфиды щелочных металлов [2].

Полярные органические вещества средней летучести (например, моноэтаноламин), проявляющие нуклеофильную реакционную способность, перспективны как растворители-абсорбенты и химически активные компоненты дегазирующих рецептур. Преимущества органических реагентов по сравнению с водно-щелочными и алколюлятными рецептурами определяются следующими факторами:

- высокой эффективностью хемосорбции паров ОВ;
- химическим взаимодействием с парами ОВ в газовой фазе;
- возможностью нейтрализации смесей ОВ;
- относительной безопасностью использования.

Эффективность химического взаимодействия в паровой фазе будет наиболее высока, когда давление паров нейтрализующего компонента превышает

парциальное давление отравляющего вещества. Технический люизит довольно быстро реагирует с едким натром в водном растворе [2]. Однако, рассматривая возможность использования эжектора для очистки газового балласта, необходимо учитывать более медленные реакции, присущие взаимодействию паров иприта или  $\beta$ -люизита с детокси-кантом. Это связано с тем, что основными компонентами, лимитирующими скорость процесса дегазации смеси иприта и люизита, являются иприт и его аналоги, например сексвииприт, отличающийся наименьшей подвижностью  $\beta$ -атомов хлора.

Среди неионогенных и нуклеофильных соединений для использования в качестве основного потока эжектора наилучшими являются органические аминокислоты, обладающие наибольшей реакционной способностью по отношению к  $\beta$ -галогенсульфидам, например моноэтаноламин (МЭА), который к тому же активно взаимодействует как с ипритом, так и с люизитом. Для очистки газового балласта от паров люизита можно использовать также более дешёвый водный раствор едкого натра.

С учётом экономичности технологического процесса технический 2-аминоэтанол (МЭА) представляется вполне пригодным для применения в эжекторной установке как для вакуумирования, так и для очистки газового балласта от паров иприта, люизита. МЭА близок по полярности к ОВ и обладает достаточно высоким давлением насыщенного пара (1,35 мм рт. ст. при 20 °С). Совокупность физико-химических свойств МЭА обеспечивает его высокую поглощающую и реакционную способность и по отношению к смеси паров иприта и люизита. К числу преимуществ МЭА следует отнести неограниченную растворимость в воде. Это позволяет использовать для газоочистки пожаробезопасные двухкомпонентные водные смеси, содержащие едкий натр. Отметим, что в качестве нейт-

рализующей жидкости можно применить водный раствор моно- и этанолдиамина (ЭДА) с этиленгликолем. По стоимости ЭДА и МЭА различаются несущественно. Зато как детоксикант ЭДА имеет даже некоторые преимущества:

- наличие в структуре двух свободных аминогрупп, одна из которых может выступать в качестве нуклеофильного центра по отношению к компонентам ОВ, а вторая — акцептором HCl, что позволяет снизить суммарные затраты реагента на нейтрализацию эквивалентных количеств иприта и люизита;

- высокое парциальное давление насыщенных паров, которое в 10 раз превосходит давление паров МЭА и потому обеспечивает большую скорость газофазных реакций;

- меньшая динамическая вязкость;

- возможность фиксации конденсированных частиц двуокиси мышьяки в водном растворе (до 20 г/л) за счёт растворимости.

Возможность использования в жидкостно-газовом эжекторе компонента определяется, при всём прочем, парциальным давлением насыщенных паров, которое должно быть выше, чем у отравляющих веществ, и обеспечивать необходимый для работы технологического оборудования уровень разрежения. На рис. 1 приведены графики зависимостей давления насыщенных паров различных компонентов от температуры. Анализ представленных графиков показывает, что давление насыщенных паров иприта и люизита в рассматриваемом диапазоне температур, характерных для технологического процесса, не превышает 5—7 мм рт. ст. Давление же насыщенных паров перспективных детоксикантов для использования в эжекторе в аналогичном интервале температур существенно выше. Например, даже при 60 °С в эжекторе, работающем на МЭА, можно достичь предельного остаточного давления около 20 мм рт. ст., а при использовании вод-

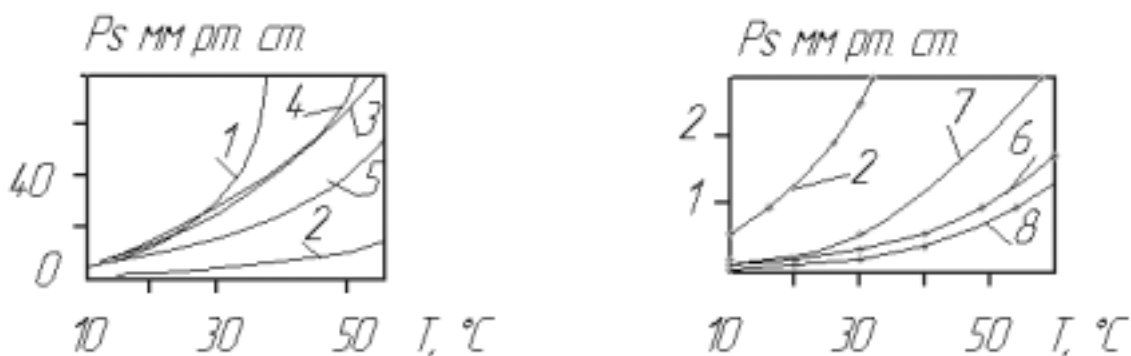


Рис. 1. Зависимость давления насыщенных паров различных реагентов от температуры: 1 — вода; 2 — МЭА; 3 — этилендиамин; 4 — водный раствор едкого натра; 5 — трехлористый мышьяк; 6 — N-МП; 7 — люизит; 8 — иприт

ного раствора едкого натра примерно 80 мм рт. ст. [3]. В интересующем нас интервале эксплуатационных температур, характерном для условий детоксикации, такого разрежения в откачиваемом объёме вполне достаточно. Поэтому в качестве основного потока в эжекторе для вакуумирования и очистки газового балласта от паров иприта или люизита можно использовать МЭА и ДЭА, водный раствор щёлочи. Эффективность эжектора как химического реактора для детоксикации люизита была подтверждена экспериментально [3]. Причём, вследствие низкой растворимости в МЭА в водных растворах щелочей ацетилен, менее 0,7–1,2 г/л, нет опасности его накопления в агрегатах системы газоочистки. Физически высокая эффективность очистки газового потока в эжекторе от паров отравляющих веществ объясняется следующими факторами:

- однородностью газо-жидкостной эмульсионной смеси в диффузоре эжектора;
- химическим разложением ядовитых соединений в процессе хемосорбции;
- относительно высокой концентрацией паров нейтрализующей жидкости в структуре парогазовой смеси.

Для создания системы вакуумирования и газоочистки был разработан специальный эжектор, геометрия которого выбиралась на основе результатов работ [3–6].

Расчёты показали, что для рассматриваемого случая, когда массовая доля паров ОВ во всасываемом газовом потоке не превышает 0,3–0,5%, эффектами дополнительного газообразования и тепловыделения от химических реакций можно пренебречь. Поэтому расчет геометрии конструкции эжектора проводился на основе разработанной методики, без учёта влияния химических реакций на динамику течения.

Расчёт адсорбции в эжекторе проводился в предположении однородности двухфазного потока. В литературе не удалось найти данные по хемосорбции паров иприта, люизита МЭА или водным раствором едкого натра. Поэтому расчёт ожидаемых параметров физико-химического процесса газоочистки проводился с учётом только эффектов абсорбции в идеальном газе на основе законов Дальтона и Рауля. Коэффициент турбулентной диффузии паров ОВ в камере смешения и диффузоре жидкостно-газового эжектора принимался бесконечно большим. Основанием для этого послужили результаты испытаний по уничтожению люизита в Шиханах, подтвердившие высокую эффективность разработанной конструкции эжектора. При детоксикации люизита с помощью специально сконструиро-

ванного эжектора экспериментально было установлено, что коэффициент турбулентной диффузии на 2–3 порядка превосходит общепринятую величину.

Величины парциального давления над поверхностью реагентов ( $p_{\text{нас}}^t$ ) и максимальное содержание в паровой фазе ( $C_{\text{max}}^t$ ) для иприта,  $\alpha$ -люизита и  $\text{AsCl}_3$  приняты по данным [5], для остальных компонентов рассчитывались приближенные значения на основании данных по температурам кипения. Величина максимальной концентрации реагентов вычислялась в приближении идеального газа по общепринятой форме записи уравнения Клапейрона:  $C_{\text{max}}^t = 16Mp/T$ , (мг/л), где  $M$  — молекулярная масса;  $p$  — давление насыщенного пара (мм рт. ст.) при температуре  $T$  (К). Парциальное давление паров каждого отдельного компонента в газовой фазе рассчитывалось в соответствии с законом Рауля, по

формуле:  $p_n^t = p_{n(\text{нас})}^t N_n$ , мм рт. ст., где  $p_{n(\text{нас})}^t$  — давление насыщенных паров (мм рт. ст.)  $n$ -го компонента при температуре  $t$  °С;  $N_n$  — мольная доля  $n$ -го компонента в жидкой фазе. Предполагалось, что суммарное давление насыщенных паров смеси компонентов определяется законом Дальтона:

$p_{\text{смеси}}^t = \sum p_i^t N_i^t$ , мм рт. ст. Вопрос отклонения равновесного давления от закона Дальтона для наших исследований практического значения не имеет, поскольку для оценки параметров системы газоочистки можно допустить вариант расчёта, в котором начальное содержание паров ОВ в потоке будет существенно завышено. По оценкам ошибка в расчётах начальной концентрации паров не превысит 10–15 %. Для снижения вязкости длительно хранящихся технических отравляющих веществ в качестве растворителя используется N-МП, влияние паров которого на режим работы системы газоочистки учитывалось в расчётах. При расчете были приняты следующие исходные ограничения:

— температура парогазовой смеси на входе в эжектор 40 °С;

— для «кислых примесей» обезличенного состава для упрощения средняя молекулярная масса и давление насыщенных паров принимались равными  $M = 150$ ,  $p_{\text{нас}}^{20} = 0,5$  мм рт. ст. соответственно;

— для смеси паров иприта и люизита усредненная молекулярная масса  $M = 168$  рассчитана с учетом мольной доли каждого компонента;

— состав паров ОВ над раствором N-МП ограничивался концентрацией 10%;

— максимальная производительность по всасываемой в эжектор газовой смеси принималась равной 3 л/с;

— объёмный расход основного потока моноэтаноламина в эжекторе — 1,0 л/с.

Расчеты ожидаемого состава газовой фазы показали, что суммарное содержание паров всех компонентов, имеющих в составе технических иприта и люизита (включая малотоксичные «кислые примеси»), при 40 °С может достигать 35 мг/л. Результаты расчёта исходной концентрации паров ОБ на входе в эжектор приведены в табл. 1. Представленные в табл. 1 данные соответствуют условиям максимального насыщения газовой смеси парами иприта и люизита. В реальных условиях насыщение газового балласта парами ОБ будет существенно ниже.

В связи с отсутствием данных по кинетике реакций МЭА с компонентами технического иприта и люизита в газожидкостной смеси для предварительной оценки авторы ограничились расчетом абсорбции для условий идеального гомогенного смешивания, без учета химического взаимодействия. При характерном для жидкостно-газового струйного аппарата объёмном коэффициенте эжекции, равном 3—4, мольное отношение между раствором МЭА и парами ОБ было принято равным  $1,0 \cdot 10^4$ . Мольные доли МЭА  $N_{\text{МЭА}} = 0,9999$  и ОБ  $N_{\text{ОБ}} = 0,0001$ , а расчётное парциальное давление паров в газовой фазе  $p_{\text{МЭА}}^{40} = p_{\text{МЭА(нас)}}^{40} \cdot N_{\text{МЭА}} = 5,099$  мм рт. ст. В соответствии с результатами расчётов, парциальное давление смеси и максимальные концентрации паров в газовой фазе на выходе из диффузора эжектора составляют:  $p_{\text{ОБ}}^{40} = p_{\text{ОБ(нас)}}^{40} \cdot N_{\text{ОБ}} = 3,5 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст.,  $C_{\text{МЭА}}^{40} = 0,051 \cdot p_{\text{МЭА}}^{40} \cdot M = 0,051 \cdot 5,099 \cdot 99 = 25,74$  мг/л,

$$C_{\text{ОБ}}^{40} = 0,051 \cdot p_{\text{ОБ}}^{40} \cdot M = 0,051 \cdot 3,5 \cdot 10^{-4} \cdot 168 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ мг/л.}$$

Расчётный анализ абсорбционного процесса газоочистки, даже без учёта эффектов хемосорбции, подтвердил высокую эффективность процесса. Расчётное остаточное содержание паров ОБ за эжектором не превысило  $3 \cdot 10^{-3}$  мг/л. При последовательном включении двух эжекторов, работающих в режиме абсорбции, максимальная остаточная концентрация паров ОБ не превышает  $2 \cdot 10^{-7}$  мг/л. Для сравнения: ПДК иприта и люизита в воздухе рабочей зоны составляют  $2 \cdot 10^{-6}$  мг/л, а ОБУВ в атмосферном воздухе населенных пунктов —  $2 \cdot 10^{-9}$  мг/л и  $4 \cdot 10^{-9}$  мг/л соответственно. Результаты расчёта (без учета хемосорбции) подтвердили возможность создания эжекторной системы газоочистки на МЭА. Таким образом, предлагаемая эжекторная система газоочистки способна обеспечить существенное снижение концентрации токсичных веществ на входе в фильтр с активированным углём.

Для экспериментального обоснования эффективности эжектора для вакуумирования и газоочистки была разработана лабораторная установка, принципиальная схема которой приведена на рис. 2. Установка состоит из колбы 3, с навеской испаряемого ОБ, термостата 4, обратного холодильника 5, обеспечивающего стабилизацию температуры и состава исследуемого газового потока. В качестве элемента газоочистки использовался стеклянный жидкостно-газовый эжектор 13. Сопло эжектора соединялось с системой подачи нейтрализующего реагента 18. Для сбора и разделения обеззараженной газожидкостной смеси использовалась приёмная ёмкость 19. Отбор контрольных проб газовой смеси проводился с помощью стандартных адсор-

Таблица 1

Расчетные значения парциальных давлений и концентраций компонентов ОБ в газовой фазе на входе в эжектор

№ п/п	Компонент	$p_{\text{нас}}^{40}$ , мм рт. ст.	Состав иприт—люизит			
			Жидкая фаза		Газовая фаза	
			Масс. доля, %	Мольная доля	$p_{\text{нас}}^{20}$ , мм рт. ст.	$C_{\text{max}}^{40}$ , мг/л
1	Иприт, бис(2-хлорэтил)сульфид	0,45	17,56	0,1886	0,085	0,689
2	2-хлорэтил-2'-хлорпропилсульфид	0,33	9,71	0,0961	0,032	0,282
3	Бис(2-хлорпропил)сульфид	0,38	14,32	0,1321	0,050	0,477
4	1,2-бис(2-хлорэтилтио)этан (сексвииприт)	$3,0 \cdot 10^{-3}$	4,25	0,0395	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,001
5	α-люизит	1,42	18,85	0,1561	0,222	2,344
6	β-люизит	0,34	3,75	0,0274	0,009	0,107
7	Трёххлористый мышьяк	27,21	8,56	0,0978	2,661	24,554
8	Кислые примеси	≈1,8	23,0	0,2624	0,472	3,611
10	Общая осреднённая характеристика смеси		100	1	3,531	32,065

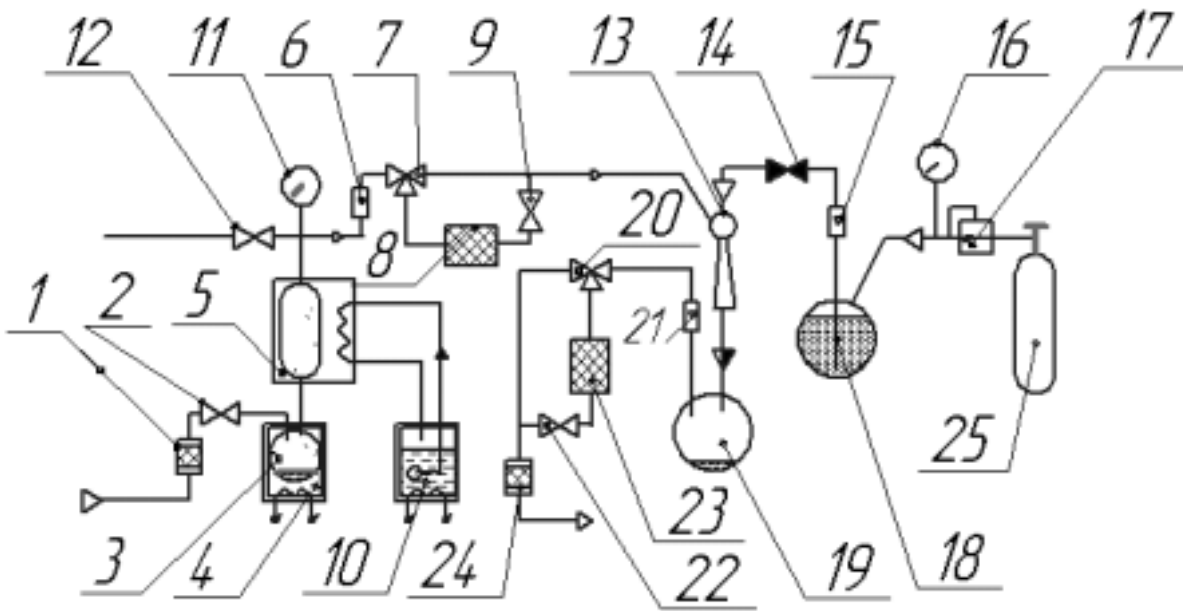


Рис. 2. Принципиальная схема лабораторной установки:

- 1 — осушительная колонка; 2 — регулируемый дроссельный вентиль; 3 — двугорлая колба с навеской образца  
 ОВ, оснащённая барботёром; 4 — термостат; 5 — обратный холодильник; 6, 15, 21 — ротаметр;  
 7, 20 — трёхходовой вентиль; 8, 23 — адсорбционные трубки; 9, 12, 22 — вентиль; 10 — водяной термостат;  
 11 — манометр; 13 — эжектор; 14 — вентиль; 16 — манометр; 17 — газовый редуктор;  
 18 — ёмкость с нейтрализующим реагентом; 19 — ёмкость-сборник; 24 — адсорбционный фильтр;  
 25 — баллон сжатого воздуха

адсорбционных трубок 8, 23. В процессе эксперимента навеска соответствующего ОВ (иприт, люизит или их смесь) помещалась в двугорлую колбу 3. Температура нагрева колбы 3 регулировалась термостатом 4. Для эффективного насыщения газовой фазы парами ОВ колба 3 была снабжена капиллярным барботёром, воздух в который подавался через регулируемый вентиль 2 и осушительную колонку 1, заполненную прокалённым хлористым кальцием, для удаления паров воды. Пары ОВ всасывались в камеру эжектора 13 через теплообменник 5 и газовый ротаметр 6. Основной поток в сопло эжектора поступал из ёмкости 18. Остаточное давление в эжекторе визуально контролировалось вакуумметром 11. Давление наддува ёмкости 18 измерялось манометром 16 и регулировалось редуктором 17, установленным на баллоне сжатого воздуха 25. Объёмный расход жидкости из ёмкости 18 в сопло эжектора измерялся жидкостным ротаметром 15. Для регулирования остаточного давления в кольцевой камере эжектора на трубопроводе всасывания был установлен дроссельный вентиль 12. Газожидкостная смесь после эжектора поступала в ёмкость-сборник 19. Из ёмкости 19 парогазовый поток через ротаметр 21 и стеклянную поглотительную колонку с активированным углем 24 удалялся на дальнейшую очистку. Стеклоанная ловушка-конденса-

тор 8 охлаждалась смесью «сухой лед — ацетон». В процессе эксперимента переключение газового потока на отбор проб производилось с помощью трёхходовых 7, 20 и двухходовых кранов 23, 24, обеспечивающих подачу газовой смеси в пробоотборники 8 и 23 соответственно.

Эксперименты проводились при температурах парогазового потока 40 и 60 °С. Регулирование объёмного расхода МЭА (0,5 л/мин) осуществлялось с помощью вентилей 14 или выбором действующего перепада давления. Навеска ОВ (2,0—3,0 г) в течение 10—15 минут нагревалась в ёмкости 3. Объёмный расход газовой смеси через эжектор — 5,24—5,34 л/мин. Объём контрольной пробы, прокачиваемой через адсорбционные колонки, составлял 1 л.

Общая длительность одного эксперимента варьировалась в пределах 35—55 мин. Отбор проб парогазовой смеси проводился через 2—3 минуты после стабилизации рабочего режима в эжекторе. При этом последовательно отбирались пробы: отходящих газов в пробоотборник 23, а затем с интервалом 10—15 с в пробоотборник 8. Объёмный расход газа через пробоотборники контролировался по ротаметрам 6 и 21. Замена пробоотборников осуществлялась перед каждым опытом. В качестве исходных компонентов отравляющих веществ в опытах

использовался дистиллированный иприт с температурой кипения 64—65 °С при 1,5 мм рт. ст. и показателем преломления при 20 °С — 1,5293. Содержание основного вещества по данным хромато-масс-спектрометрии более 98%. Аналогично, после перегонки получали α-люизит с температурой кипения 63—81 °С при 15 мм рт. ст. с показателем преломления при 20 °С — 1,5988. Содержание основного вещества не менее 95%, соотношение цис-и трансизомеров 33:67 соответственно. В качестве рабочей среды в эжекторе использовались водные растворы технического МЭА (содержание основного вещества 82%), ЭДА (содержание основного вещества 91%), 5% сульфида натрия, едкого натра и калия. В процессе проведения экспериментов исходная концентрация компонентов ОВ в газовом потоке завывшалась. По нашему мнению, это обеспечило достоверность полученных результатов и позволило обоснованно спрогнозировать эффективность промышленной системы газоочистки.

Количественный анализ газового состава смеси проводился на основе методик [7, 8]. Остаточная концентрация иприта и люизита измерялась газохроматографическим методом с пламенно-фотометрическим и масс-селективным детектированием. Основная инструментальная погрешность метода измерения паров иприта и люизита не превышала  $1 \cdot 10^{-9}$  мг/л. Для подготовки препаратов использовались трубки с полимерным сорбентом «Тенакс-ТА». Осреднённые значения концентраций паров ОВ и МЭА в отобранных пробах газового потока на входе в эжектор и выходе из него при-

ведены в табл. 2—5. Экспериментальный коэффициент очистки газового потока оказался не хуже  $1,2 \cdot 10^8$ . С ростом температуры с 40 до 60 °С коэффициент газоочистки увеличивался на 6%. Ни в одной из контрольных проб, включая раствор МЭА, значимых количеств иприта и люизита не обнаружено. Анализ результатов, полученных в экспериментах с различными детоксикантами (см. табл. 5), подтвердил высокую эффективность ЭДА. Коэффициент очистки оказался практически таким же, как и для МЭА. Менее эффективны для использования в эжекторе для очистки газового потока от паров иприта и люизита водные растворы 5% едкого калия и сульфида натрия и этиленгликоль.

Полученные результаты позволяют констатировать следующее:

— коэффициент очистки газов от паров иприта и люизита при использовании МЭА составляет не менее  $10^8$ ;

— наблюдаемое в опытах остаточное содержание паров ОВ на выходе из эжекторной системы газоочистки ниже величин ПДК рабочей зоны и незначительно превышает ОБУВ для атмосферного воздуха населённых пунктов;

— содержание паров МЭА за эжектором превосходит остаточное содержание паров ОВ на  $10^7$ .

Отдельная серия экспериментов по оценке эффективности вакуумирования была проведена на модельном эжекторе при расходе основного потока воды 0,1 л/с и объёме откачиваемого ресивера 36 л. Предельное остаточное давление в ресивере 30 мм рт. ст. наблюдалось примерно через 12 мин

Таблица 2

Результаты экспериментов по исследованию эффективности эжекторной газоочистки

Температура паров иприта 40 °С						
Концентрация паров, мг/л	№ пробы					Среднее значение
	1	2	3	4	5	
Иприта на входе в эжектор, $C_{исх}$	2,21	2,78	2,15	2,45	2,80	2,48
Иприта на выходе из емкости-сборника, $C_{кон}$	$<1 \cdot 10^{-8}$	$1,23 \cdot 10^{-8}$	$<1,0 \cdot 10^{-8}$	$<1 \cdot 10^{-8}$	$1,17 \cdot 10^{-8}$	$<1,1 \cdot 10^{-8}$
МЭА на выходе из емкости-сборника,	2,07	2,19	1,89	2,35	2,22	2,14
Коэффициент очистки газов ( $C_{исх}/C_{кон}$ )	$>2,2 \cdot 10^8$	$2,3 \cdot 10^8$	$>2,2 \cdot 10^8$	$>2,2 \cdot 10^8$	$2,4 \cdot 10^8$	$>2,3 \cdot 10^8$
Температура паров люизита 40 °С						
Концентрация паров, мг/л	№ пробы					Среднее значение
	1	2	3	4	5	
Люизита на входе в эжектор, $C_{исх}$	8,92	9,87	9,11	10,85	10,07	9,76
Люизита на выходе из емкости-сборника, $C_{кон}$	$1,37 \cdot 10^{-8}$	$2,18 \cdot 10^{-8}$	$2,06 \cdot 10^{-8}$	$1,83 \cdot 10^{-8}$	$1,70 \cdot 10^{-8}$	$1,83 \cdot 10^{-8}$
МЭА на выходе из емкости-сборника	2,08	2,21	2,09	2,45	2,33	2,23
Коэффициент отчистки газов ( $C_{исх}/C_{кон}$ )	$6,5 \cdot 10^8$	$4,5 \cdot 10^8$	$4,4 \cdot 10^8$	$5,9 \cdot 10^8$	$5,9 \cdot 10^8$	$5,4 \cdot 10^8$

Результаты экспериментов по исследованию эффективности эжекторной газоочистки от смеси паров иприт/люизит 1:1

Содержание паров ОБ и детоксиканта, мг/л	Реагент	№ пробы					Среднее значение
		1	2	3	4	5	
Начальная температура 40 °С							
На входе в эжектор, $C_{исх}$	Иприт	1,23	1,40	1,11	1,05	1,31	1,22
	Люизит	4,67	4,89	4,17	4,08	4,66	4,49
На выходе из емкости сборника, $C_{кон}$	Иприт	$<1 \cdot 10^{-8}$	$<1 \cdot 10^{-8}$	$<1 \cdot 10^{-8}$	$<1 \cdot 10^{-8}$	$<1 \cdot 10^{-8}$	$<1 \cdot 10^{-8}$
	Люизит	$4,02 \cdot 10^{-8}$	$4,37 \cdot 10^{-8}$	$3,60 \cdot 10^{-8}$	$3,94 \cdot 10^{-8}$	$4,15 \cdot 10^{-8}$	$5,4 \cdot 10^{-8}$
	МЭА	2,20	2,03	2,43	1,98	2,37	2,20
Коэффициент отчистки газов ( $C_{исх}/C_{кон}$ )	Иприт + Люизит	$>1,2 \cdot 10^8$	$>1,2 \cdot 10^8$	$>1,1 \cdot 10^8$	$>1,0 \cdot 10^8$	$>1,1 \cdot 10^8$	$>1,1 \cdot 10^8$
Начальная температура 60 °С							
На входе в эжектор, $C_{исх}$	Иприт	3,27	3,01	3,11	3,35	3,07	3,16
	Люизит	13,36	12,37	12,75	13,39	12,37	12,92
На выходе из емкости-сборника, $C_{кон}$	Иприт	$1,12 \cdot 10^{-8}$	$1,16 \cdot 10^{-8}$	$1,27 \cdot 10^{-8}$	$1,35 \cdot 10^{-8}$	$1,05 \cdot 10^{-8}$	$1,19 \cdot 10^{-8}$
	Люизит	$7,73 \cdot 10^{-8}$	$7,42 \cdot 10^{-8}$	$7,36 \cdot 10^{-8}$	$7,14 \cdot 10^{-8}$	$7,64 \cdot 10^{-8}$	$7,46 \cdot 10^{-8}$
	МЭА	2,22	2,13	2,37	1,99	2,18	2,18
Коэффициент отчистки газов ( $C_{исх}/C_{кон}$ )	Иприт + Люизит	$1,9 \cdot 10^8$	$1,8 \cdot 10^8$	$1,8 \cdot 10^8$	$2,0 \cdot 10^8$	$1,8 \cdot 10^8$	$1,9 \cdot 10^8$

Таблица 4

Осреднённые результаты экспериментов по исследованию эффективности эжекторной газоочистки от паров

Среднее содержание паров ОБ и детоксиканта, мг/л	Исходные ОБ		
	Иприт	Люизит	Иприт + люизит
На входе в эжектор, $C_{исх}$	2,38	9,43	5,52
На выходе из емкости-сборника, $C_{кон}$	$<1,1 \cdot 10^{-8}$	$1,88 \cdot 10^{-8}$	$4,92 \cdot 10^{-8}$
МЭА на выходе из емкости-сборника, $C_{МЭА}$	2,15	2,37	2,29
Средний коэффициент очистки газов ( $C_{исх}/C_{кон}$ )	$2,2 \cdot 10^8$	$5,0 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^8$

Таблица 5

Результаты экспериментов по исследованию эффективности использования различных детоксикантов в модельном эжекторе. Начальная температура смеси паров ОБ 40 °С

Среднее содержание паров ОБ в эжекторе, мг/л	Рабочие жидкости основного потока эжектора							
	ЭДА		ЭГ		5%-ный раствор КОН		5%-ный раствор Na <sub>2</sub> S	
	Иприт	Люизит	Иприт	Люизит	Иприт	Люизит	Иприт	Люизит
На входе, $C_{исх}$	2,55	10,04	2,42	9,21	2,16	8,93	2,27	9,09
На выходе, $C_{кон}$	$<1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$8,3 \cdot 10^{-4}$
Средний коэффициент очистки газов, $C_{исх}/C_{кон}$	$>2,5 \cdot 10^8$	$8,4 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^5$	$4,8 \cdot 10^7$	$3,9 \cdot 10^2$	$4,5 \cdot 10^5$	$6,1 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^4$

после запуска эжектора. Эжектор выходил на рабочий режим в течение 5—8 с, что подтверждает высокую эффективность конструкции.

На основе полученных результатов была разработана конструкция эжекторного агрегата для си-

стемы вакуумирования и газоочистки установки уничтожения авиационных боеприпасов, основные проектные технические характеристики которой приведены в табл. 6.



Основные технические характеристики эжекторного агрегата вакуумирования и газоочистки

Предельное остаточное давление, мм рт. ст.	30
Рабочая среда	МЭА, водные растворы щелочей
Объёмный расход, л/с	
— реагента основного потока	1—2
— всасываемого газа	до 8
Степень очистки от паров иприта, люизита, не хуже	$10^8$
Масса нетто, кг	320
Габаритные размеры, мм	860 × 1400 × 2800
Установочная мощность насосной станции, кВт	2,2

## Выводы

Проведённые расчётно-экспериментальные исследования подтвердили высокую эффективность использования жидкостно-газового эжектора для вакуумирования и газоочистки. Экспериментально показано, что применение жидкостно-газового эжектора позволяет резко снизить остаточное содержание паров ОВ (более чем в  $10^8$  раз) и, соответственно, повысить техническое совершенство системы газоочистки. При этом резко снижается нагрузка на оконечные адсорбционные фильтры с активированным углём, что позволяет уменьшить массогабаритные размеры и снизить эксплуатационные расходы.

По оценкам, использование жидкостно-газового эжектора позволит существенно уменьшить, примерно в 100 раз, необходимый объём активированного угля и увеличить эффективность системы вакуумирования и газоочистки. Внедрение и промышленное использование предлагаемого эжекторного агрегата для вакуумирования и газоочистки решает комплекс проблем повышения экономичности, экологической безопасности и технологической эффективности оборудования, используемого на объектах уничтожения химического оружия.

## Summary

Experimental results are presented to evaluate a liquid-gas ejector system for gas purification. The

considered system is intended for gas-phase mixture decontamination of poisonous components.

## Библиографический список

1. Холланов Л.П., Запорожец Е.П., Зиберт Г.К., Кашицкий Ю.А. Математическое моделирование нелинейных термогидрогазодинамических процессов в многокомпонентных струйных течениях. — М.: Наука, 2002.
2. Александров В.Н., Емельянов В.И. Отравляющие вещества. — М.: Воениздат, 1990.
3. Бордаков В.Н., Пильченко В.А., Афанасьев В.В. Исследование процесса химической детоксикации люизита в эжекторном реакторе // 2-я Научно-практическая конференция «Научно-технические аспекты обеспечения безопасности при уничтожении, хранении и транспортировке химического оружия» (6-7 октября 2004): Сборник материалов / Федеральное управление по безопасному хранению и уничтожению химического оружия. М., 2004.
4. Бура А.Н., Бордаков В.Н., Баранов Ю.И., Казаков П.В. Способ химической детоксикации отравляющих веществ. Патент № 2239475. Бюл. № 31. 10.11.2004.
5. Бура А.Н., Бордаков В.Н. Эжекторная установка. Патент № 2239475. Бюл. № 29. 20.10.2005.
6. Цегельский В.Г. Двухфазные струйные аппараты. — М.: МГТУ, 2003.
7. Методика определения паров люизита в газовой фазе. Государственный стандарт РФ. Рег. № 031-03-090-03. ФГУП ГНПП «Инверсия».
8. Методика определения паров иприта в газовой фазе. Государственный стандарт РФ. Рег. № 031-03-091-03. ФГУП ГНПП «Инверсия».

ФАДТ

Статья поступила в редакцию 22.02.2007