

УДК 66.074.43;661.879;661.487

ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ ДЛЯ УЗЛОВ ЗАЩИТЫ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ КОЛЛЕКТОРОВ КОНДЕНСАЦИОННО-ИСПАРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО ЗАВОДА

*Громов О.Б., Корниенко М.Ю., Утробин Д.В. (АО «ВНИИНМ», г. Москва),**Травин С.О. (ФИЦ ХФ РАН, НИУ МФТИ, г. Москва)*

olbgromov@bochvar.ru

В производстве изотопов урана образуются газовые смеси, например, газы штатных операций с емкостями, содержащими UF_6 , откачные газовые смеси коллекторов конденсационно-испарительной установки, аварийные выбросы, вентиляционные и сбросные газы и др. Газовые смеси коллекторов завода разделения изотопов состоят из фторсодержащих соединений и компонентов воздуха, % по объему: HF до 45, F_2 до 15, UF_6 до 0,5, фториды фосфора до 7,5, фториды W , Si , Cr и Mo до 6, Ar до 1, воздух 20—90. Таким образом, основным фторидным компонентом газов коллекторов является HF . Кроме того, в газах содержатся другие химически активные соединения — F_2 , Cl_2 , UF_6 , PF_5 , SiF_4 , CrO_2F_2 и др., а также компоненты воздуха — N_2 , O_2 , CO_2 , Ar , которые попадают во внутренние полости технологического оборудования при промывке и прокачке емкостей воздухом или инертными газами, установке и снятии емкостей с коллекторов конденсации и испарения, ремонте оборудования и др. Состав газовых смесей разных коллекторов существенно различается. Например, газы коллектора очистки питания, как правило, содержат больше летучих фторидов рудных примесей, в газах коллектора очистки отбора одним из основных компонентов является HF . В коллекторах конденсационно-испарительной установки, эксплуатирующихся в штатных режимах, газы находятся под существенным разрежением 0,4—4 кПа.

В процессе работы вакуумных насосов, с помощью которых откачивают коллекторы, необходимо контролировать их работоспособность путем периодического отбора проб вакуумного масла. При откачке фторсодержащих газовых смесей в них накапливаются соединения фтора. Фториды, взаимодействуя с компонентами вакуумного масла, осмоляют его, увеличивая вязкость и плотность, что существенно сказывается на работоспособности насоса. Вакуумное масло в насосах заменяют при снижении глубины откачки, затрудненном пуске,

нагреве выше 80 °С. Таким образом, состав вакуумного масла может являться контрольным критерием работоспособности коллектора конденсационно-испарительной установки.

Изучаемый процесс. В конденсационно-испарительных установках разделительных заводов основную массу UF_6 из газовых потоков извлекают конденсацией при температуре –10—12 °С, достигаемой с помощью раствора CaCl_2 . Газы от прочих фторсодержащих компонентов, в первую очередь, HF , а также следового количества UF_6 часто очищают конденсацией при охлаждении до температуры жидкого азота (–196 °С). В некоторых случаях для существенного уменьшения затрат при использовании жидкого азота конденсацию проводят охлажденным в турбодетандере до 140 К воздухом [1, 2].

Газовые смеси поступают в коллекторы конденсационно-испарительной установки при давлении 3,3—4 кПа. Первая и вторая ступени очистки заключаются в пропускании газа через две последовательно размещенные осадительные емкости, охлаждаемые жидким азотом. На этой стадии давление газа снижается до 0,4—1,3 кПа, содержание летучих — как правило, до 2—5% по объему. Фторидная составляющая после осадительных емкостей представлена преимущественно HF и F_2 . Последующая очистка откачных газов с применением жидкого азота при давлении 0,7—1,3 кПа становится неэффективной и поэтому экономически неоправданной. Кроме того, молекулярный фтор при температуре жидкого азота не является конденсирующимся веществом. Применение в качестве хладагента других ожиженных газов, например, гелия является дорогостоящей операцией, хотя в определенной степени может оказаться эффективной. Как показал опыт эксплуатации откачных групп конденсационно-испарительных установок разделительных заводов, низкотемпературная конденсация при температуре жидкого азота не полностью выделяет фторсодержащие

компоненты из газов, откачиваемых вакуумными насосами после осадительных емкостей. По этой причине насосы некоторых коллекторов работают в жестких режимах, что приводит к быстрой потере кондиционных параметров масла и сокращению периода эксплуатации [3].

Вследствие невозможности использования для указанных целей физических способов необходимо в дальнейшем применять физико-химические способы очистки откачных газов от летучих фторидов, в частности, от F_2 и HF. Таких способов при высоком разрежении два: химическое поглощение и хемосорбционное взаимодействие. Эффективность того или иного как сорбента, так и химического поглотителя в значительной степени зависит от химической природы и физико-химического состояния.

Попадание фторидов во внутренние полости вакуумных насосов на разделительных заводах исключается разными способами. В большинстве случаев после осадительных емкостей, охлаждаемых жидким азотом, используют оксиды, карбонаты и гидроксиды металлов I—III групп Периодической таблицы Д.И. Менделеева, например, в АО «УЭХК» первоначально применяли алюмогель (активированный оксид алюминия), в АО «СХК» — мраморную крошку и алюмогель. В некоторых случаях использовали гранулированный сорбент NaF. Например, на одном из заводов АО «УЭХК» в схемах защиты вакуумных насосов на четырех откачных группах применяется алюмогель, на других пяти — с дополнением гранулированного сорбента NaF. В АО «ПО ЭХЗ» для аналогичных целей на пяти откачных группах используют также алюмогель, на трех других — гранулированную соду (содовый поглотитель).

В конденсационно-испарительной установке разделительного завода АО «СХК» действуют пять коллекторов конденсации и четыре откачные группы, оснащенные преимущественно алюмогелем. Редко применяют гранулированный сорбент NaF, известковый химический поглотитель и химический поглотитель модернизированную мерсеризованную древесину. Вакуумные насосы коллекторов ранее в 1980—начале 1990 гг. защищали путем размещения после осадительных емкостей, охлаждаемых жидким азотом, поглотительных колонн с алюмогелем или мраморной крошкой. В это время вакуумные насосы выходили из строя с

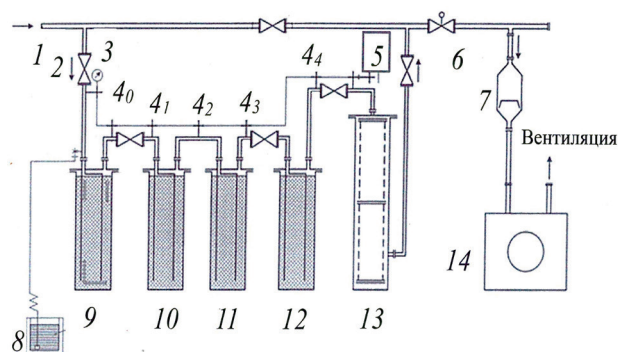
периодичностью 12—25 агрегатов в год, что объяснялось малой эффективностью алюмогеля и особенно мраморной крошки. Степень обезвреживания фторсодержащих газовых компонентов, в основном, HF на алюмогеле едва достигала 60%, на мраморе составляла лишь 4% [4]. В результате попадания фтор-иона во внутренние полости насосов масло типа ВМ-4 и ВМ-6 фторировалось и осмолялось, резко увеличивая вязкость. Кроме того, в результате коррозии внутренних поверхностей рабочих полостей в насосах часто обнаруживали твердые частицы. Коррозия вызывалась образованием сильной агрессивной среды из HF и воды, проникающих в насосы вследствие неэффективности поглотителей.

Целью настоящей работы является исследование эффективности опытной схемы узла защиты вакуумных насосов коллектора конденсационно-испарительной установки и штатной.

Оборудование и методы измерения параметров процесса. Опытный узел защиты вакуумных насосов (О-УЗВН) коллектора К-09-01 оснащен насосами типа НВЗ-75 и АВЗ-20, содержит четыре поглотительные колонны вместимостью по 150 л, последовательно загруженные по ходу газа мраморной крошкой, известковым поглотителем, модернизированной мерсеризованной древесиной, цеолитом марки NaA, а также металлокерамический фильтр. В свою очередь, штатная схема защиты (Ш-УЗВН) коллектора К-09-01-04 оснащена насосом типа НВЗ-75 и также состоит из четырех поглотительных колонн, в первую из которых загружали мраморную крошку, в остальные — алюмогель. Необходимо отметить, что химически активная основа известкового поглотителя и мерсеризованной древесины представляет собой сильно основную (щелочную) природу, химически активная основа алюмогеля является амфотерной.

Опытная схема приведена на рис. 1. Штатная схема не приводится, так как идентична опытной, кроме загрузки колонн.

Корпус фильтра выполнен из никелевой трубы диаметром 422 мм. Фильтрующими элементами являются 158 насадок проницаемостью 0,0065 м² каждая, смонтированные в две катушки обойм по аналогии с креплением делителей диффузионных машин Т-56М1. Фильтрующая поверхность составляет 2,05 м². Схема оснащена



Р и с. 1. Опытная схема узла защиты вакуумного насоса: 1 — поток газа из коллектора К-09-01; 2 — ручные вентили Ду100; 3 — вакуумметр; 40—44 — точка измерения давления; 5 — оптический микроманометр ОМ-6; 6 — моторный вентиль Ду100; 7 — масляная ловушка; 8 — испаритель жидкого азота; 9—12 — колонны с мраморной крошкой, известковым поглотителем, мерсеризованной древесиной, цеолитом соответственно; 13 — металлокерамический фильтр; 14 — вакуумный насос НВЗ-75 (параллельный насос АВЗ-25 не показан)

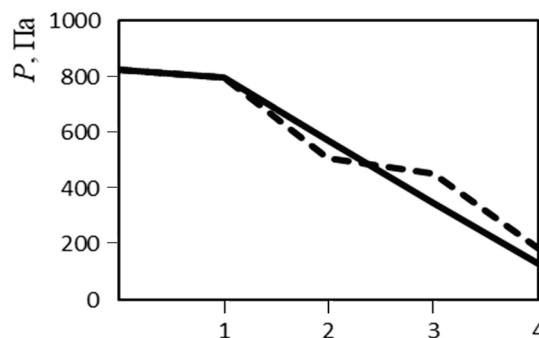
запорными вентилями разного проходного сечения в зависимости от назначения. Для продувки схемы использовали пар жидкого азота. Давление в системе контролировали с помощью оптических манометров типа ОВ-6 со шкалой 0—1,3 кПа.

Перед испытаниями поглотители сушили: мраморную крошку, алюмогель, известковый поглотитель и цеолит — при 250 °С до прекращения изменения массы, мерсеризованную древесину — при 115 °С до содержания воды 3% по массе. Фильтр сушили при 180 °С.

Схема О-УЗВН коллектора К-09-01 была включена в опытную эксплуатацию и работала с периодическим подключением штатной в течение шести месяцев. Подключение штатной схемы определялось производственной необходимостью при одновременной откачке избытка газа из нескольких баллонов с сырьевым гексафторидом урана. Среднее время подключения обеих схем составляло до 1 ч в сутки. Содержание компонентов газов опытного и штатного модулей контролировали аттестованными аналитическими методиками предприятия.

Результаты испытаний и их обсуждение.

Гидравлическое сопротивление каждой ступени О-УЗВН и Ш-УЗВН определяли по изменению давления азота при прокачке. Как следует из рис. 2, наибольшим гидравлическим сопротивлением обладают вещества с насыпной плотностью 0,75—0,8 г/см³, т.е. известковый поглотитель



Точка измерения по рис. 1

Р и с. 2. Изменение гидравлического сопротивления колонн по азоту: ---, — — — опытная и штатная схема соответственно

тель и цеолит. Насыпная плотность алюмогеля ненамного меньше. Эти вещества используют в виде цилиндрических гранул, при засыпке в колонны они имеют более плотную упаковку по сравнению с другими применяемыми веществами. Кроме того, их специально получают в виде пористой массы, что также создает дополнительное препятствие для прохождения газа через слой. Мраморная крошка обладает минимальным сопротивлением, так как является кристаллической горной породой почти с нулевой пористостью и представляет собой куски неопределенной формы с неплотной упаковкой [5]. Древесный поглотитель также не оказывает существенного влияния на гидравлику схемы, поскольку имеет рыхлую структуру слоя плотностью 0,35 г/см³.

За время работы О-УЗВН периодически измеряли давление прокачиваемых газов после каждой ступени (табл. 1).

По уменьшению давления рабочего газа при прохождении через схему О-УЗВН определяли эффективность каждой ступени схемы (рис. 3).

Как следует из табл. 1 и рис. 3, эффективность мраморной крошки на первой ступени очень малая. Как отмечалось, она представляет собой кристаллическое вещество, т.е. не пористое и с неразвитой поверхностью. Фактически в мраморе поглощающим является лишь поверхностный слой толщиной не более 0,5 мм [5, 6]. Кроме того, скорость взаимодействия мрамора с фторидами минимальная [3—5]. Таким образом, следует вывод о том, что этот поглотитель в данной схеме является лишней ступенью, так как существенной пользы по улавливанию фторсодержащих газов не приносит.

Таблица 1. Изменение давления газа в О-УЗВН, Па

Номер опыта	Давление перед О-УЗВН	Давление после химического поглотителя				Давление после О-УЗВН
		Мраморная крошка	Известковый поглотитель	Мерсеризованная древесина	Цеолит	
1	800	770	450	415	80	80
2	770	745	465	430	95	105
3	830	800	450	385	65	50
4	400	390	230	200	70	65



Р и с. 3. Снижение давления газов в О-УЗВН в опытах 1 (—), 2 (— · —), 3 (— · · —), 4 (· · ·)

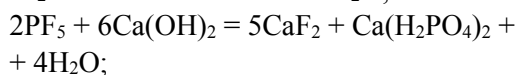
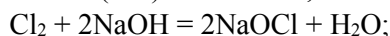
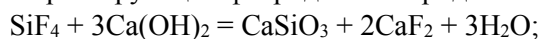
Включение мраморной крошки в качестве поглотителя в схему О-УЗВН при давлении газа не более 1,3 кПа по аналогии со схемой обезвреживания сбросных газов на газопылеулавливающей установке при давлении около 100 кПа не оправдано. Кроме того, из мраморной крошки выделяется эквивалентное количество кислого вторичного компонента CO_2 , который уменьшает рабочую емкость последующих ступеней.

Вторая ступень — известковый химический поглотитель. Уменьшение давления рабочего газа на этой ступени составляет около 40% первоначального. Но химически активная часть газовых смесей также равна не более 40% общего количества газообразных веществ. Следовательно, можно констатировать, что на второй ступени, оснащенной известковым поглотителем, улавливаются почти все галогенсодержащие и кислые компоненты откачного коллектора К-09-01.

За известковым поглотителем на третьей ступени обезвреживания размещен химический поглотитель модернизированная мерсеризованная древесина. Эти поглотители имеют почти одинаковые характеристики улавливания фторсодержащих соединений. Но эффективность импрегнированной древесины немного больше. Например, степень улавливания UF_6 равна 96,6 и 98%, HF — 98 и 99,8% соответственно [6]. По-

этому в О-УЗВН мерсеризованная древесина фактически дублирует известковый поглотитель. Так как на известковом поглотителе наблюдается почти полное улавливание фторсодержащих веществ, показатели мерсеризованной древесины в схеме скромные. Но на древесном поглотителе улавливаются следовое количество соединений, недостаточно хорошо взаимодействующих с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, например, SO_2F_2 , а также хлорсодержащие компоненты газа, например, Cl_2 при их содержании в откачных газах. Если эти поглотители поменять местами в опытной схеме, показатели известкового поглотителя были бы еще хуже.

Четвертая ступень — цеолит марки NaA. При взаимодействии фторсодержащих компонентов откачных газов с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и NaOH образуется вода, увлекаемая потоком газа. Для ее улавливания, в первую очередь, и предназначен цеолит. Однако необходимо отметить, что часть выделяющейся воды насыщает древесную основу мерсеризованного поглотителя до естественно сухой древесины, т.е. до 10–12% по массе [7]. В результате взаимодействия летучих фторидов с основными веществами химических поглотителей мольное количество выделяющейся воды, как правило, превышает мольное количество реагирующих фторидов и хлоридов:



Вследствие глубокого разрежения выделяющаяся вода находится в газовой фазе, создавая тем самым давление в системе. В экспериментах увеличение давления паров воды не определяли, но значительное изменение давления на цеолите в отсутствие фторсодержащих компонентов, которые были поглощены на второй и третьей

ступенях, указывает на существенный вклад в давление газового потока именно водной составляющей. Небольшое уменьшение давления газов после мерсеризованной древесины также обусловлено повышением давления вследствие выделения влаги при поглощении фторидов на известковом поглотителе.

В испытаниях периодически отбирали пробы масла из вакуумных насосов на содержание урана, фтор-иона и воды, а также механических примесей, которые могли образовываться вследствие коррозии внутренних поверхностей. Динамика накопления указанных веществ в масле вакуумных насосов приведена в табл. 2. Ее данные требуют пояснения. Насос 8 (НВЗ-75) использовали в случае необходимости быстрого сброса избыточного давления из нескольких емкостей с сырьевым UF_6 ($V = 2,5 \text{ м}^3$). В эти периоды насосом откачивали газовые смеси параллельно как через опытную, так и через штатную систему защиты. Именно совместной прокачкой газов через две системы объясняется существенно высокое содержание в вакуумном масле фтор-иона, урана и влаги, а также, как следствие, механических частиц. Основной проток фторидов происходит при прохождении газа через Ш-УЗВН, оснащенную только алюмогелем.

При откачке газов только через О-УЗВН с помощью насосов 1 (АВЗ-20) и 7 (НВЗ-75) содержание урана в масле составляло 0,001—0,013% по массе с динамикой накопления урана 0,001—0,007 г/сут. Содержание фтор-иона со-

ставляло 0,11—0,49% по массе, при этом скорость накопления фтор-иона в масле ВМ-4 насоса АВЗ-20 0,06—0,25 г/сут и до 0,61 г/сут в более производительном насосе НВЗ-75. Необходимо отметить отсутствие воды в масле обоих агрегатов.

По данным табл. 2 можно оценить эффективность опытного и штатного узлов защиты вакуумных насосов.

Как следует из табл. 3, критерием отработки вакуумного масла может служить содержание фтор-иона, поскольку коэффициент эффективной скорости его накопления наибольший.

Таблица 3. Эффективность штатной и опытной схемы узлов защиты насосов

Компонент	Средняя скорость накопления, г/сут		Коэффициент скорости накопления
	Насос 8 (Ш-УЗВН)	Насос 7 (О-УЗВН)	
Уран	2,62	0,004	0,0015
Фтор-ион	28,62	0,61	0,02
Вода	45,96	<0,01	0,0002

Во время замены вакуумного масла насосов, которыми откачивали газовые смеси через опытную схему коллектора К-09-01, была отмечена заметно меньшая вязкость сливаемого масла, чем из насосов коллектора К-09-01-04, оснащенных системой защиты только с алюмогелем.

Из табл. 2 следует, что почти весь UF_6 улавливается на щелочных химических поглотите-

Таблица 2. Состав вакуумного масла ВМ-4

Насос*	Объем масла, л	Время работы, сут	Компонент							
			Уран		Фтор-ион		Вода		Твердое	
			% по массе	г/сут	% по массе	г/сут	% по массе	г/сут	% по массе	г/сут
8	12	5	0,071	1,525	1,89	41,19	Не определяли	Не определяли	Не определяли	Не определяли
8	12	3	0,179	6,538	1,49	54,12	3,1	109,1	0,239	8,717
8	12	4	0,019	0,518	0,24	6,54	Не определяли	Не определяли	0,141	0,111
8	12	15	0,019	0,138	1,45	10,53	5,3	144,4	0,131	0,161
1	2,5	44	0,013	0,007	0,11	0,06	<0,01	<0,01	0**	0
1	2,5	29	0,001	0,001	0,33	0,26	<0,01	<0,01	0	0
7	12	88	0,003	0,004	0,49	0,61	<0,01	<0,01	0,003	0,002

*Насос 8 Ш-УЗВН, насосы 1, 7 О-УЗВН.

**Не обнаружено.

лях. Более высокая скорость накопления фтора в некоторых случаях объясняется наличием в откачиваемых газах инертных по отношению к активным веществам поглотителей фторсодержащих компонентов, например, CF_4 , SO_2F_2 и др., но фторирующих олефины вакуумных масел типа ВМ-1,4,6, так как именно фториды являются причиной фторирования углеводородов масел. Известно, что фторированные углеводороды, содержащие в своем составе углеродные цепочки с числом атомов углерода от 6 и выше, как правило, имеют более вязкую консистенцию и более высокую температуру кипения.

В табл. 4 приведен период работы вакуумных насосов между заменой в них вакуумного масла, исходя из опыта эксплуатации конденсационно-испарительной установки разделительного предприятия. Коэффициент эффективности рассчитывали по формуле $k = \tau_0/\tau_{\text{ш}}$, где τ_0 , $\tau_{\text{ш}}$ — время работы насосов без замены масла опытного и штатного узла соответственно. Эффективность опытной схемы УЗВН, оснащенной известковым поглотителем, мерсеризованной древесиной и цеолитом, более чем в 5 раз превосходит эффективность штатной схемы защиты насосов, оснащенной только алюмогелем. Но необходимо отметить, что с учетом всех данных эффективность О-УЗВН в десятки раз превышает эффективность обезвреживания фторсодержащих газовых смесей Ш-УЗВН.

Испытаниями была показана эффективность опытной схемы узла защиты вакуумных насосов в целом. Однако технология обезвреживания фторсодержащих газовых смесей, направляемых на газопылеулавливающую установку, не полностью применима к обезвреживанию газовых смесей откачных коллекторов конденсационно-испарительной установки (табл. 5).

Таблица 5. Параметры процессов обезвреживания

Параметр	Газопылеулавливающая установка	Коллектор конденсационно-испарительной установки
Давление, кПа	93—101	$\leq 1,3$
Расход, м ³ /ч	1,5—4,0	0,05
Основные компоненты	ClF_3 , F_2 , HF	HF , UF_6
Содержание галогенидов, % по объему	≤ 90	≤ 40
Относительная химическая активность	1	0,3—0,4

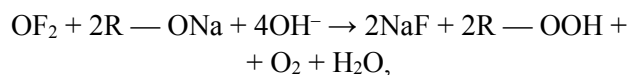
Применение в схеме газопылеулавливающей установки на первой ступени мраморной крошки оправдано вследствие ударных нагрузок чрезвычайно химически активных фторсодержащих компонентов газовых смесей, таких, как ClF_3 и продукты его разложения ClF , ClO_2F [3, 5, 6]. В схеме О-УЗВН коллектора К-09-01 подобных нагрузок нет. Степень реагирования HF и UF_6 с мраморной крошкой при комнатной температуре малая вследствие меньшей химической активности указанных соединений по сравнению с ClF_3 по отношению к кристаллическому CaCO_3 , составляющему основу мраморной крошки.

Химические поглотители известковый и мерсеризованная древесина в О-УЗВН почти дублируют один другого с той лишь разницей, что в схеме газопылеулавливающей установки модернизированная мерсеризованная древесина необходима из-за наличия в газовых смесях хлорсодержащих соединений. Содержащаяся в этом поглотителе сера в степени окисления +4 восстанавливает хлор в степенях окисления +3, +1 и 0 до хлорид-иона (Cl^-), который затем связывается NaOH [6]. В откачных газах коллектора К-09-01 хлора, как правило, нет или он содержится в минимальном количестве. Для его обезвреживания достаточно влаги и щелочного агента поглотителя на древесной основе. Необ-

Таблица 4. Период эксплуатации вакуумных насосов, сут

Узел защиты вакуумных насосов	Марка насоса				Среднее значение
	AB3-20 ₁	AB3-20 ₂	HB3-75 ₁	HB3-75 ₂	
Штатный	6,7	7,3	7	7	7
Опытный	23,3	36,8	62,5	30	38,2
Коэффициент эффективности	3,5	5	8,9	4,3	5,5

ходимо отметить, что при поглощении фторидов гидроксидами могут образоваться опасные вторичные фторидные вещества, например, фторид кислорода. Однако образующиеся подобные соединения будут обезврежены активными компонентами поглотителя на древесной основе



чего нельзя сказать об известковом поглотителе.

Из этого следует, что в схеме О-УЗВН можно вместо модернизированной мерсеризованной древесины применять более дешевый, но не менее эффективный химический поглотитель мерсеризованную древесину (без добавки сульфита). Кроме того, это подтверждает предпочтительность применения щелочных химических поглотителей на древесной основе вместо известкового, тем более вместо алюмогеля и содового химического поглотителя.

Выводы. Таким образом, сравнение штатной и опытной схем защиты вакуумных насосов откатных коллекторов конденсационно-испарительной установки от фторсодержащих газов, оснащенных амфотерным и щелочным химическим поглотителем, показало:

эффективное применение разных химических поглотителей имеет прямую зависимость от условий проведения процессов поглощения фторсодержащих газов;

эффективность схемы с химическими поглотителями типа известкового или мерсеризованной древесины более чем в 5 раз превосходит эффективность штатной схемы с активированным оксидом алюминия.

Показано технологическое преимущество химического поглотителя типа модернизированной мерсеризованной древесины перед известковым химическим поглотителем при обезвреживании фтороводорода и фтора.

Кроме того, показан механизм выхода из строя вакуумных насосов в результате проникновения в них соединений фтора и воды, веду-

щих к увеличению вязкости вакуумного масла и коррозии конструкционных материалов. Содержание фтор-иона в масле насоса является критерием его работоспособности. Скорость накопления фтор-иона в масле насоса с применением сильнощелочных поглотителей составляет 0,61 г/сут, что почти в 50 раз меньше, чем при использовании амфотерного алюмогеля.

Авторы выражают признательность специалистам завода разделения изотопов АО «Сибирский химический комбинат» за помощь в проведении исследования и аналитического обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губанов С.М. Физическое и математическое моделирование процессов термостатирования в производстве по разделению изотопов урана. Дис. на соискание ученой степени д-ра физ.-мат. наук. Томск, НИ ТГУ, 2019.
2. Картавых А.А. Моделирование низкотемпературного охлаждения емкостей в процессе фракционного разделения газовых смесей. Дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук. Томск, НИ ТГУ, 2019.
3. Громов О.Б. Химические технологии в разделительном производстве изотопов урана АО «Сибирский химический комбинат». — Химпром сегодня, 2018, № 5, с. 35—47.
4. Щербаков В.И., Евдокимов А.Н., Стерхов М.И. и др. Химические поглотители для улавливания газообразных фторидов при низких давлениях. — Хим. технология, 2004, т. 5, № 10, с. 27—30.
5. Громов О.Б. Промышленное изучение взаимодействия трифторида хлора и кускового мрамора. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2022, вып. 5(116), с. 42—50.
6. Громов О.Б. Исследование и разработка технологии химических поглотителей на древесной основе для обезвреживания фторсодержащих газов разделительного производства. Дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. М., ОАО «ВНИИХТ», 2009.
7. Удальцов В.А. Разработка технологического процесса делигнификации древесины березы в системе гидроксид калия — гидразин — изобутанол — вода. Дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Екатеринбург, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический ун-т», 2022.

Поступила в Редакцию 3.06.24