

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ НЕОРГАНИЧЕСКИХ КИСЛОТ

© 2024 г. А. М. Бессарабов^{1,*}, В. Е. Трохин¹, А. А. Казаков¹

¹ АО Научный центр «Малотоннажная химия», Москва, 107564 Россия
*e-mail: bessarabov@nc-mtc.ru

Поступило в редакцию 3 июля 2024 г.

После доработки 21 ноября 2024 г.

Принято к печати 23 ноября 2024 г.

Разработана гибкая технология получения неорганических кислот особой чистоты, включающая стадии химической очистки, ректификации, десорбции, адсорбции, абсорбции, коррекции состава и микрофльтрации. Показано, что одной из важнейших стадий технологии является ректификационная очистка. Созданы кварцевый и фторопластовый экспериментальные модули, на которых проведены исследования коэффициентов разделения. С помощью созданной ректификационной установки получены экспериментальные данные по факторам разделения. На основе проведенных исследований показана перспективность ректификационной очистки в гибкой технологии азотной, хлорной, соляной и плавиковой кислоты особой чистоты.

Ключевые слова: особо чистые вещества, неорганические кислоты, ректификационная очистка, анализ примесей, коэффициент разделения, фактор разделения

DOI: 10.31857/S0044460X24080075, **EDN:** SBKFNJ

ВВЕДЕНИЕ

Среди веществ особой чистоты немаловажную роль играют высокочистые неорганические кислоты, применяемые в высокотехнологических областях народного хозяйства [1]. Например, плавиковая кислота особой чистоты используется при производстве жидкокристаллической и полупроводниковой продукции (для очистки поверхности кремниевых пластин) [2], а также для очистки и травления в процессе получения интегральных микросхем [3]. Также она применяется в промышленности при растворении силикатов [4] и лабораторной практике, где необходима высокая степень чистоты [5]. Кроме того, она может быть аналитическим реагентом и промышленным химическим реагентом в атомной энергетике [6] и производстве материалов высокой чистоты, содержащих фтор [7].

Потребности современной промышленности связаны с совершенствованием существующих и разработкой новых методов получения особо чистых неорганических кислот. Качество особо чистой кислоты определяется содержанием в ней лимитируемых микропримесей. При выборе способов очистки предпочтение отдается методам и оборудованию, в которых ограничена возможность внесения дополнительных загрязнений [8].

Для глубокой очистки неорганических кислот в основном применяются такие процессы как ректификация, адсорбция, микрофльтрация и др. В этих процессах обеспечивается очистка особо чистых кислот до содержания отдельных примесей на уровне 10^{-6} – 10^{-8} мас% [8]. Целью данной работы является исследование и разработка процесса ректификационной очистки, являющегося одной из основных стадий гибкого модульного производства

неорганических кислот особой чистоты (соляная, плавиковая, хлорная и азотная) [9].

Разработка технологии неорганических кислот особой чистоты осуществлялась путем такого сочетания отдельных технологических процессов, которое дает возможность использования максимального разнообразия исходного сырья. В качестве примера такого синтеза нами ранее проводилась разработка технологий высокочистых азотной и хлорной кислот на одной технологической линии, и галогеноводородных кислот (плавиковой и соляной) – на другой [10]. При этом во втором случае имеет место возможность использования практически всех возможных видов исходного сырья (газ, концентрированные и разбавленные кислоты), представленного на рынке химических продуктов.

Созданная нами новая малотоннажная технология получения ассортимента неорганических кислот особой чистоты [11] базируется на 7 типовых аппаратных модулях: химической обработки (ХО), ректификации (РК), десорбции (ДС), адсорбции (АД), абсорбции (АБ), коррекции состава (КС) и фильтрации (ФЛ).

На приведенной блок-схеме (рис. 1) последовательно указаны все технологические стадии процессов по получению указанных кислот особой чистоты.

Для получения ассортимента особо чистых неорганических кислот (соляная, плавиковая, хлорная и азотная) нами используются следующие 7 видов исходных продуктов: фтористый водород (газ), плавиковая кислота (40–70 мас%), хлористый водород (газ), соляная кислота (38–45 мас%), хлорная кислота (50 мас%), азотная кислота (65 мас%), азотная кислота (98 мас%). Матрица структуры потоков, как совокупность маршрутов из исходных в целевые продукты через аппаратные модули гибкой схемы, приведена в табл. 1.

Как видно из схемы (рис. 1) и табл. 1, наиболее технологически трудоемким является процесс получения и очистки галогеноводородных кислот, требующих химической обработки, ад-, аб- и десорбции. При очистке плавиковой и соляной кислот неочищенное сырье поступает в модуль химической обработки (ХО), где некоторые примеси переводятся

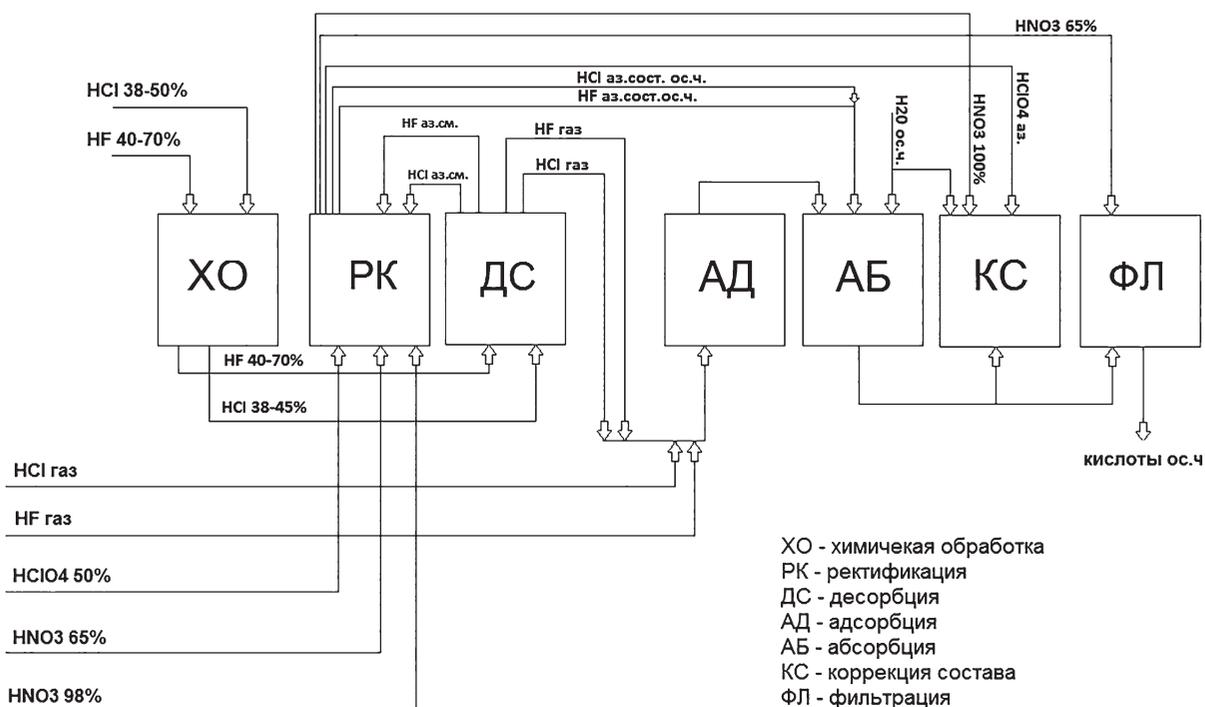


Рис. 1. Модульная блок-схема гибкой технологии получения ассортимента неорганических кислот особой чистоты.

Таблица 1. Матрица структуры потоков для получения неорганических кислот особой чистоты в зависимости от исходного сырья.

Кислота исходная	Кислота особой чистоты	Модуль						
		ХО	РК	ДС	АД	АБ	ФЛ	КС
Фтористый водород (газ)	HF	–	–	+	+	+	+	+
Плавиковая кислота (40–70 мас%)		+	+	+	+	+	+	+
Хлористый водород (газ)	HCl	–	–	–	+	+	+	+
Соляная кислота (38–45%)		–	+	+	+	+	+	+
Хлорная кислота (50%)	HClO ₄	–	+	–	–	–	+	+
Азотная кислота (65%)	HNO ₃	–	+	–	–	–	+	+
Азотная кислота (98%)		–	+	–	–	–	+	+

в более легкоотделимые формы (As³⁺ в As⁵⁺). Так как сырье и товарный продукт представляет собой раствор газа в жидкой фазе, необходимо произвести деление потоков, осуществляемое в модуле десорбции (ДС). В результате этого получаем поток сверхазеотропного газа (HCl и HF) и соответствующую кислоту азеотропного состава. Для отделения от аэрозолей, содержащих примеси, избыточный газ пропускается через фильтр, после которого направляется в адсорбционную колонну (АД), а кислота – в ректификационный модуль (РК). Ректификационная кислота и отфильтрованный газ объединяются в модуле абсорбции (АБ). Для коррекции концентрации получаемых кислот в технологической схеме предусмотрен дополнительный подвод высокочистой воды в модуль коррекции состава (КС). Применяется вода марки Е-1.1, в которой лимитирующие примеси (хлориды, нитраты, фосфаты, сульфаты) с концентрацией не выше 0.05 мкг/л не вносят загрязнение в целевые продукты. В дальнейшем мы более подробно рассмотрим важнейшую стадию технологии – ректификационную очистку, которая очень широко применяется в технологии особо чистых веществ [12, 13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведены экспериментальные исследования коэффициентов разделения (K) и факторов разделения (F) по лимитируемым примесям для каждой из 4 рассматриваемых неорганических кислот особой чистоты (азотная, хлорная, плавиковая, соляная). Коэффициент разделения (K) по соответствующей

примеси определяли как отношение концентрации примеси в жидкости ($c_{ж}$) к ее концентрации в паре ($c_{п}$) и представляет собой техническую характеристику, показывающую, насколько может быть очищено данное вещество при данных условиях на установке эффективностью в одну ступень разделения дистилляционным методом (1):

$$K = c_{ж}/c_{п} \quad (1)$$

Для оценки эффективности метода ректификации для очистки хлорной кислоты азеотропного состава определены факторы разделения (F) ректифицирующей части установки, как отношение концентраций примесей в верхней части колонны ($c_{в}$) к их концентрации в кубовой жидкости ($c_{к}$):

$$F = c_{в}/c_{к} \quad (2)$$

Определение данного параметра проводили при нескольких нагрузках по жидкости в безотборном режиме при условиях проведения процесса ректификации. Фактор разделения определяет разделятельную способность колонны.

Рассматриваемые нами микропримеси можно разделить на две группы: катионы металлов (железо, свинец, барий и др.) и анионы (хлориды, сульфаты, фосфаты и др.). Для определения концентрации микропримесей анионных форм веществ (свободных гидратированных ионов, диссоциирующих молекулярных и ионных ассоциатов, комплексных частиц

и т.п.) в кислотах используют метод высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) [14].

Для исследования содержания в рассматриваемых неорганических кислотах этого типа примесей в аналитической лаборатории Научного центра «Малотоннажная химия» [15] установлен оптический эмиссионный спектрометр с индуктивно-связанной плазмой (Thermo Scientific, США) модели iCAP 6300 Duo и жидкостной хроматограф (Shimadzu, Япония) модели LC-20 Prominence [16]. Перспективным является виртуальное моделирование этих исследований и создание цифровых двойников [17]. Цифровые двойники, созданные в приложении Blender [18] и экспортированные в среду разработки Unreal Engine [19], обладают значительным потенциалом для повышения качества аналитических исследований. Моделируя реальные условия, они дают полное представление о поведении системы и позволяют принимать обоснованные решения, оптимизирующие работу аналитической лаборатории.

В табл. 2–4 приведены экспериментальные коэффициенты разделения по регламентируемым примесям в плавиковой кислоте азеотропного состава, соляной, хлорной и азотной кислотах. Из анализа коэффициентов разделения можно сделать вывод

Таблица 2. Коэффициенты разделения по регламентируемым примесям в плавиковой кислоте азеотропного состава и соляной кислоте.

Примесь	Содержание HF в жидкости, мас%	Содержание HF в паре, мас%	K_{HF}	K_{HCl}
Алюминий	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-7}$	20	15
Барий	$8 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-7}$	40	50
Бор	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$	10	10
Железо	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	50	45
Калий	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	5	10
Кальций	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	20	10
Кобальт	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$	100	80
Магний	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	10	15
Марганец	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-7}$	100	90
Натрий	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	10	10
Свинец	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-7}$	40	50
Цинк	$6 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	60	45
Хлориды	$5 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-5}$	6.25	–

Таблица 3. Коэффициенты и факторы разделения по регламентируемым примесям в хлорной кислоте азеотропного состава (72 мас%) и коэффициенты разделения для кислоты концентрации 60 мас%.

Примесь	K (HClO ₄ 60 мас%)			K (HClO ₄ 72 мас%)			F (HClO ₄ 72 мас%)		
	ω , мл/мин			ω , мл/мин			нагрузка, кг/ч		
	10	30	50	10	30	50	20	30	40
Сульфаты	2	1.5	1.5	1.5	1.25	1.2	120	135	150
Фосфаты	2	1.5	1.5	1.5	1.3	1.3	140	155	170
Железо	30	20	20	25	18	18	1750	1800	2000
Свинец	50	30	30	20	20	20	2500	2600	3000

о том, что дистилляционные методы эффективны для получения этих высокочистых неорганических кислот. Результаты, приведенные в табл. 3, показывают, что при получении высокочистой хлорной кислоты коэффициенты разделения по всем примесям незначительно снижаются с увеличением скорости испарения и имеют большие значения в разбавленной кислоте, чем в концентрированной.

Рассматриваемые в табл. 4 данные говорят о том, что для получения высокочистой азотной кислоты коэффициенты разделения по всем примесям значительно снижаются с увеличением скорости испарения. Также по этим данным можно сделать вывод о том, что эффективность очистки возрастает с увеличением нагрузки на колонну, что согласуется с общими правилами процессов ректификации.

В нашей технологической схеме (рис. 1) предусмотрено 2 варианта реализации модуля ректификации.

Таблица 4. Коэффициенты и факторы разделения по регламентируемым примесям в азотной кислоте азеотропного состава.

Примесь	K			F		
	Скорость испарения, мл/мин			Нагрузка, кг/ч		
	10	30	50	20	30	40
Железо	65	60	50	1050	1100	1200
Свинец	100	88	80	1700	1800	2000
Хлориды	2.2	2	1.4	180	180	200
Сульфаты	8	7	6.8	280	300	350

кации, принципиально отличающихся материалом, из которого они изготавливаются. Этим обуславливаются конструкционные особенности исполнения. Модуль ректификации задействован только в том случае, когда исходным сырьем является жидкая кислота. Использование того или иного модуля определяется физической возможностью осуществления процесса разделения в аппарате данного исполнения: фторопластовая установка позволяет работать с соляной и плавиковыми кислотами, установка из кварцевого стекла – со всеми кислотами, кроме плавиковой.

При очистке хлорной, азотной и соляной кислот используется периодическая ректификация на установке, выполненной из кварцевого стекла. При этом ректификация хлорной кислоты ведется в вакууме (12–15 тор) во избежание разложения последней с образованием хлора и кислорода. В случае получения плавиковой кислоты, в силу химической ее агрессивности, модуль ректификации выполнен из фторопласта-4, а процесс ведется в полунепрерывном режиме с постоянным уровнем сырья в кубе. При этом восходящие потоки пара HF делятся: одна часть, конденсируясь в дефлегматоре, возвращается на орошение колонны, а другая часть азеотропного состава конденсируется в двухуровневом блочном холодильнике и направляется в модуль абсорбции, где происходит объединение соответствующих газовых и жидких фаз и/или воды особой чистоты.

Ректификационный модуль, выполненный из кварцевого стекла, используется в получении других особо чистых неорганических кислот (кроме плавиковой) и принципиально имеет тот же конструкционный состав, что и модуль, выполненный из фторопласта. Отличием от фторопластового является отсутствие дефлегматора, так как деление потока здесь происходит с помощью вентиля прямым регулированием. При необходимости оба модуля могут работать в двух режимах: при переработке относительно небольших количеств веществ возможно использование их в качестве установок периодического действия с отбором предгона основной фракции и кубовым остатком; при переработке значительных количеств установки могут эксплуатироваться в режиме дистилляции с постоянным отбором предгона и периодическим

сливом кубового остатка, в котором концентрируются труднолетучие примеси.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований показано, что для получения ассортимента неорганических кислот особой чистоты перспективно применение гибких производственных систем на основе типовых аппаратных модулей. Показано, что одной из важнейших стадий технологии является ректификационная очистка. Созданы кварцевый и фторопластовый экспериментальные модули, на которых проведены исследования коэффициентов разделения в плавиковой кислоте азеотропного состава, соляной, хлорной и азотной кислотах. Анализ коэффициентов разделения показал эффективность дистилляционных методов для получения рассматриваемых неорганических кислот особой чистоты.

Показано, что при получении высокочистой хлорной кислоты коэффициенты разделения по всем примесям незначительно снижаются с увеличением скорости испарения и имеют большие значения в разбавленной кислоте, чем в концентрированной. При получении высокочистой азотной кислоты коэффициенты разделения по всем примесям снижаются значительно с увеличением скорости испарения. Также по этим данным можно сделать вывод о том, что эффективность очистки возрастает с увеличением нагрузки на колонну, что согласуется с общими правилами процессов ректификации.

С помощью созданной ректификационной установки получены экспериментальные данные по факторам разделения. На основе проведенных исследований показана перспективность ректификационной очистки в гибкой технологии азотной, хлорной, соляной и плавиковой неорганических кислот особой чистоты.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для определения эффективности и возможности получения высокочистых неорганических кислот были проведены исследования равновесия жидкость–пар с целью определения коэффициентов разделения по регламентируемым примесям. Исследования проводили с использованием прибора типа Бушмакина [20], представляющего собой прибор циркуляционного типа. Циркуляционный метод за-

ключается в постоянном возвращении в нагреватель (кипятильник) конденсата паровой фазы вплоть до достижения равновесия, по установлению которого пробы жидкой фазы и конденсата отбираются и анализируются. Классический вид этого прибора приведен на рис. 2а (1 – вертикальный сосуд; 2 – колокол; 3 – стерженек, 4, 8, 9, 13, 15 – трубки; 5, 10, 14 – краны; 6, 11 – обратные конденсаторы; 7 – приемник конденсата; 12 – счетчик капель; 16 – электрический нагреватель).

В прибор направляется такой объем жидкости, чтобы ее уровень, с учетом заполнения переточных трубок (4, 6) и сборника конденсата, был примерно на 2 см выше окаймления колокола (9). Загрузка жидкости осуществляется через конденсаторы (1, 14), в которые впоследствии подается вода и начинается обогрев куба. При появлении первого конденсата в приемнике (2) производят нагрев парового пространства, увеличивая интенсивность нагрева до максимального увеличения числа капель в правой капельнице. После чего обогрев снижают до уменьшения числа капель примерно на 10%, и фиксируют показания вмонтированного в изоляцию термометра. В следующих измерениях нагрев парового пространства подбирают таким образом, чтобы установилась рабочая температура, найденная по

методу, описанному выше. При этом варьирование интенсивности кипения жидкости должно обеспечивать образование примерно 125 капель в минуту в левой капельнице. В течение 1.5–3 ч, в зависимости от интенсивности кипения и количества жидкости, устанавливается равновесие жидкость–пар.

Для определения эффективности и возможности получения высокочистой плавиковой кислоты азетропного состава были проведены исследования равновесия жидкость–пар с использованием прибора типа Бушмакина, изготовленного из фторопласта-4 (рис. 2б), с использованием стандартных деталей, которые применялись и для изготовления пилотной установки (блочный теплообменник, переходники, штуцера, арматура).

Метод, как уже было описано выше, состоит в установлении равновесия между паром и жидкостью и аналитическим определением состава равновесных фаз. Коэффициент разделения вычисляется как отношение содержания летучего компонента в жидкой фазе к содержанию летучего компонента в паровой фазе, и представляет собой техническую характеристику, показывающую, насколько может быть очищено данное вещество при данных условиях на установке эффективностью в одну ступень разделения дистилляционным методом.

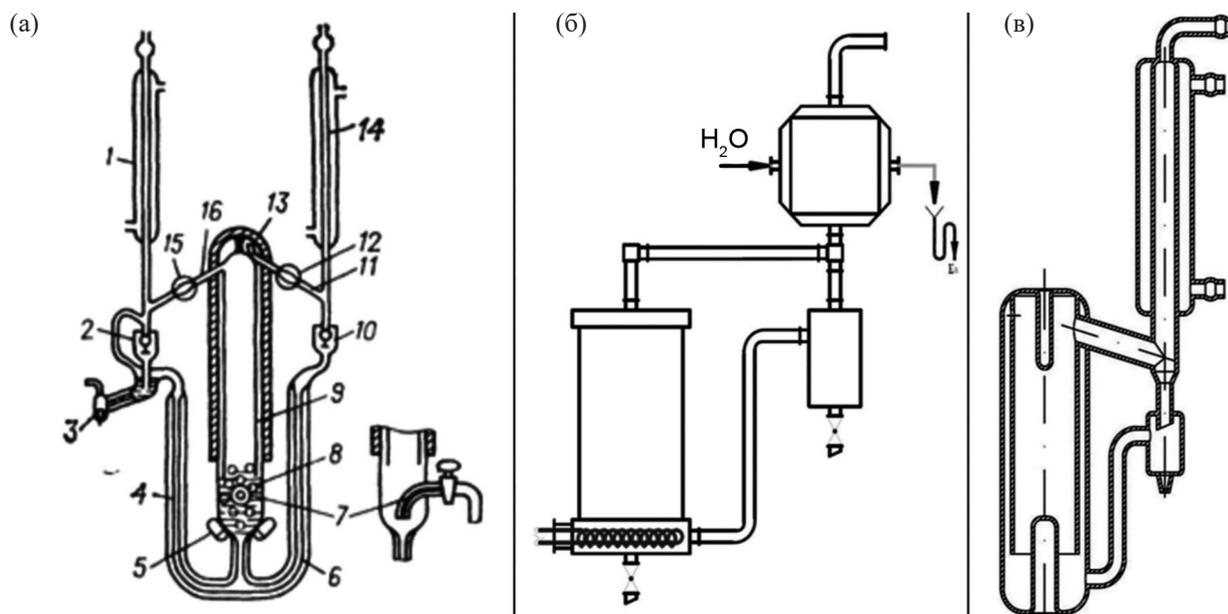


Рис. 2. Приборы Бушмакина (а – классический вид, б – прибор из фторопласта, в – кварцевый прибор).

Анализ образцов фаз проводили стандартными методами по ГОСТу на плавиковую кислоту и методом ISP-МС (на катионы металлов) [21]. Коэффициенты разделения по регламентирующим примесям приведены в табл. 2. Чтобы установить возможность получения хлорной кислоты квалификации ОСЧ указанным методом, исследовали фазовое равновесие жидкость–пар при давлении 15–20 мм рт. ст. и температуре $\approx 100^\circ\text{C}$ (в условиях проведения процесса). Исследования проводили на приборе типа Бушмакина, изготовленном из кварцевого стекла (рис. 2в).

В ходе исследований определены коэффициенты разделения между жидкостью и паром для всех регламентируемых примесей согласно требованиям к высокочистой хлорной кислоте. Коэффициент разделения определяли в хлорной кислоте азеотропного состава (~ 72 мас%, давление 15–20 мм рт. ст., т. кип. $\approx 100^\circ\text{C}$) и состава ниже азеотропного (~ 60 мас%, давление 15–20 мм рт. ст., т. кип. $\approx 85^\circ\text{C}$), в зависимости от скорости испарения жидкости (ω). Результаты исследований приведены в табл. 3.

Коэффициент разделения по соответствующей примеси определялся ее концентрациями в жидкости и паре. Анализ осуществляли методом ВЭЖХ [14] по примесям (SO_4^{2-} , PO_4^{3-}), по металлическим примесям (Pb, Fe) методом ISP-МС [21] осуществляли анализ на Pb и Fe.

Для оценки эффективности метода ректификации для очистки хлорной кислоты азеотропного состава определяли факторы разделения ректифицирующей части пилотной установки, как отношения концентраций примесей в верхней части колонны к их концентрации в кубовой жидкости. Определение данного параметра проводили при нескольких нагрузках по жидкости в безотборном режиме при условиях проведения процесса ректификации хлорной кислоты азеотропного состава (~ 72 мас%, 15–20 мм рт. ст., т. кип. $\approx 100^\circ\text{C}$). Результаты приведены в табл. 3.

Для определения возможности и эффективности получения высокочистой азотной кислоты методом ректификации проводили исследования равновесия жидкость–пар в условиях проведения процесса (400 мм рт. ст., 90°C). Исследования проводились на приборе типа Бушмакина, изготовленном из кварцевого стекла (рис. 2в). В ходе исследований определяли коэффициенты разделения между

жидкостью и паром для всех регламентируемых примесей согласно требованиям к азотной кислоте особой чистоты. Полученные результаты исследования приведены в табл. 4.

Коэффициент разделения (табл. 4) определялся как отношение концентрации примеси в жидкости к ее концентрации в паре. Анализ примесей в образцах жидкой и паровой фазы осуществляли методом ВЭЖХ [10], описанным в ТУ на высокочистую азотную кислоту (по примесям SO_4^{2-} , Cl⁻), а также методом ISP-МС [21] (по примесям металлов Fe, Pb). Коэффициенты разделения определяли на равновесном кубе при различных скоростях испарения жидкости.

Для оценки метода ректификации для очистки азотной кислоты азеотропного состава определяли факторы разделения ректификационной части установки, как отношения концентраций примесей в верхней части ректификационной колонны к их концентрациям в кубовой жидкости. Определение данного параметра проводили при нескольких нагрузках по жидкости в безотборном режиме при условиях проведения процесса ректификационной очистки азотной кислоты азеотропного состава (~ 67 – 68 мас%, 400 мм рт. ст., 90°C). Результаты приведены в табл. 4.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бадамишина Э.Р., Горнев Е.С. // Вестн. РАН. 2023. Т. 93. № 10. С. 917.
2. Волковский Ю.А., Серегин А.Ю., Фоломешкин М.С., Просеков П.А., Павлюк М.Д., Писаревский Ю.В., Благов А.Е., Ковальчук М.В. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2021. Т. 15. № 9. С. 40.
3. Аснис Н.А., Василенко О.А., Гаспарян М.Д., Спешилов И.О., Ваграмян Т.А., Алешина В.Х. // ЖПХ. 2020. Т. 93. № 10. С. 1446; Asnis N.A., Vasilenko O.A., Gasparyan M.D., Speshilov I.O., Vagramyan T.A., Aleshina V.K. // Russ. J. Appl. Chem. 2020. Vol. 93. N 10. P. 1518. doi 10.1134/S1070427220100055
4. Аухотов О.Г., Магкоев Т.Т., Аухотова И.Б. // Стекло и керамика. 2021. № 5. С. 40; Ashkhotov O.G., Ashkhotova I.B., Magkoev T.T. // Glass Ceram. 2021. Vol. 78. N 5–6. P. 204. doi 10.1007/s10717-021-00379-9

5. Собенин А.В., Антонинова Н.Ю., Усманов А.И., Шепель К.В. // Изв. вузов. Горный журнал. 2023. № 2. С. 32.
6. Громов О.Б., Утробин Д.В., Штуца М.Г., Копарулина Е.С., Сырцов С.Ю., Полянский А.И. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2021. № 1 (107). С. 68.
7. Давидович Р.Л. // Вестн. ДВО РАН. 2022. № 1 (221). С. 83.
8. Kazakov A.A., Bessarabov A.M., Trokhin V.E., Vendilo A.G. // Chem. Pet. Eng. 2015. Vol. 51. N 9. P. 597. doi 10.1007/s10556-016-0092-x
9. Bessarabov A., Trokhin V., Kazakov A., Zaremba G., Vendilo A. // Chem. Eng. Trans. 2015. Vol. 43. P. 1021. doi 10.3303/CET1543171
10. Бессарабов А.М., Вендило А.Г., Трохин В.Е., Попов А.К., Казаков А.А., Рябенко Е.А., Кочетыгов А.Л. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. № 2. С. 1.
11. Trokhin V.E., Bessarabov A.M., Kazakov A.A., Kirillova I.Yu. // Russ. J. Gen. Chem. 2024. Vol. 94. N 4. P. 872. doi 10.1134/S1070363224040145
12. Мастрюков М.В., Бреховских М.Н., Демина Л.И., Моисеева Л.В., Федоров В.А. // Неорг. матер. 2022. Т. 58. № 2. С. 186; Mastryukov M.V., Brekhovskikh M.N., Demina L.I., Moiseeva L.V., Fedorov V.A. // Inorg. Mater. 2022. Vol. 58. N 2. P. 177. doi 10.1134/S0020168522020108
13. Лазуткина Ю.С., Горелова О.М. // Ползуновский вестник. 2021. № 2. С. 194.
14. Яшин А.Я., Яшин Я.И. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2022. Т. 22. № 1. С. 6.
15. Родченкова В.В. // Аналитика. 2019. Т. 9. № 2. С. 116.
16. Трохин В.Е., Гришаева Д.А., Бессарабов А.М., Вишникина Е.Р. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2023. № 12. С. 8.
17. Тарануха Н.Л., Семёнова С.В., Панков С.Н. // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21. № 3. С. 11.
18. Хесс Ф. Практическое пособие Blender 3.0 для любителей и профессионалов. Моделинг, анимация, VFX, видеомонтаж. М.: СОЛОН-Пресс, 2022. 300 с.
19. Шеннон Т. Unreal Engine 4 для дизайнера и визуализации. М.: Бомбора, 2021. 368 с.
20. Кулов Н.Н., Полковниченко А.В., Лупачев Е.В., Вошкин А.А., Магомедбеков Э.П. // Теоретические основы химической технологии. 2020. Т. 54. № 1. С. 3; Kulov N.N., Polkovnichenko A.V., Lupachev E.V., Voshkin A.A., Magomedbekov E.P. // Theor. Found. Chem. Eng. 2020. Vol. 54. N 1. P. 132. doi 10.1134/S0040579520010108
21. Алексеев А.В., Якимович П.В., Проскурнина Е.В. // Вестн. Московск. унив. Сер. 2. Химия. 2020. Т. 61. № 1. С. 27; Alekseev A.V., Yakimovich P.V., Proskurnina E.V. // Moscow Univ. Chem. Bull. 2020. Vol. 75. N 1. P. 22. doi 10.3103/S0027131420010022

Study of the Rectification Purification Process of Inorganic Acids

A. M. Bessarabov^{1,*}, V. E. Trokhin¹, and A. A. Kazakov¹

¹ R&D Centre «Fine Chemicals», Moscow, 107564 Russia

*e-mail: bessarabov@nc-mtc.ru

Received July 3, 2024; revised November 21, 2024; accepted November 23, 2024

A flexible technology for the production of high purity inorganic acids was developed, including the stages of chemical purification, rectification, desorption, adsorption, absorption, composition correction and microfiltration. It was shown that one of the most important stages of the technology is rectification purification. Quartz and fluoroplastic experimental modules were created, on which studies of the separation coefficient were carried out. Experimental data on the separation factor were obtained using the created distillation unit. Based on the conducted research, the prospects of rectification purification in flexible technology of nitric, chloric, hydrochloric and hydrofluoric acid of high purity were shown.

Keywords: high pure substances, inorganic acids, rectification purification, impurity analysis, separation coefficient, separation factor