

УДК 658.28:665.63:338

Быканов С.Н., к.техн.н., доцент, Данилов Ю.Б., д.техн.н., профессор, Горбунов К.А., к.техн.н., профессор, Симоненко К.О., студент

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ ЧЕТЫРЕХКОРПУСНОЙ ВЫПАРНОЙ УСТАНОВКИ ПО ВЫПАРИВАНИЮ СУЛЬФАТА НАТРИЯ

Ключевые слова: выпаривание, пинч-анализ, теплоноситель, энергосбережение, сульфат натрия.

Введение. В химической и других отраслях промышленности приходится решать проблемы получения кристаллической соли и утилизации соленых растворов. Одним из методов решения проблемы является выпаривание растворов с получением продукционной кристаллической соли и достаточно чистого конденсата, который можно использовать обратно в технологических процессах производства. Процесс выпаривания является очень энергозатратным, поэтому анализ и разработка оптимального энергосберегающего процесса выпаривания, нагрева исходного раствора и утилизация тепла горячих конечных потоков (вторичного пара, упаренного раствора, конденсата вторичного пара) является весьма актуальной задачей.

Важнейшими инструментами снижения расхода теплоносителя (греющего пара) выпарной установки является кратность использования тепла греющего пара, подогрев исходного раствора, конструктивное исполнение выпарных аппаратов, выбор режимов концентрирования, обеспечивающих требуемое качество конечных продуктов (упаренного раствора, соли, конденсата).

Существуют литературные источники и методики выбора и расчетов многокорпусных выпарных установок, которые позволяют разработать выпарную установку. Однако они громоздки, основаны на итерационном методе (методе последовательных приближений) [1,2]. Авторами предложен метод анализа и выбора энергосберегающей технологии с использованием методов пинч-анализа.

Основная часть. Как правило, разработка и расчеты выпарных установок проводят, зная расход исходного раствора, подлежащего выпариванию, его начальную и конечную концентрацию, его температуру, и соответственно, физико-химические свойства раствора. Исходя из имеющихся данных по агрессивности растворов и коррозионной стойкости материалов, выбирают конструктивное исполнение оборудования. Как правило, коррозионная стойкость определяет верхний предел температур процесса. Так, для растворов сульфата натрия, а это достаточно агрессивный раствор, для изготовления оборудования применяются титановые сплавы ВТ1-0, но и его температура не может превышать 125 °С. Соответственно, ограничивается верхняя температура – температура пара. Процесс выпаривания необходимо проводить при температуре ниже указанной под вакуумом. Нижнюю температуру процесса определяет величина технически целесообразного вакуума в последнем корпусе выпарной установки, определяемого температурой охлаждающей воды, а также возможностью промышленных вакуумных систем (водокольцевых насосов, парожеткторных блоков). Это температура не ниже 50 °С.

Оптимальная кратность использования тепла определяется экономическими методами. Сначала ею задаются, исходя из максимально возможной полезной разности температур на выпарную установку, потом определяют максимально возможную кратность, исходя из оптимальных полезных разностей температур на принятые типы выпарных аппаратов путём деления общей полезной разности температур на полезные разности выпарных аппаратов. Затем, изменяя её значение, определяют минимальные затраты на стадии выпаривания с учетом энергозатрат и стоимости оборудования.

Определяют расходы выпаренной воды, исходного и упаренного раствора, охлаждающей воды, которая подаётся в конденсатор, концентрация раствора, кристаллизующихся и некристаллизующихся компонентов в многокомпонентных растворах, содержащих соли. Рассчитывают тепловые нагрузки, коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи, коэффициенты испарения и самоиспарения. Рассчитывают температуры греющего и вторичного паров, температуры кипения раствора, полезные разности температур и температуры исходного нагрева в подогревателях. Исходный раствор необходимо нагревать до температуры кипения в аппарате, в который он поступает. Определяют поверхность нагрева выпарных аппаратов. Как правило, в основном принимаются равные поверхности греющих камер в выпарных аппаратах. Определяются тип и размеры вспомогательного оборудования (подогреватели, конденсатоотводчики, водокольцевые или пароэжекторные вакуум-насосы) [1,2,4,5].

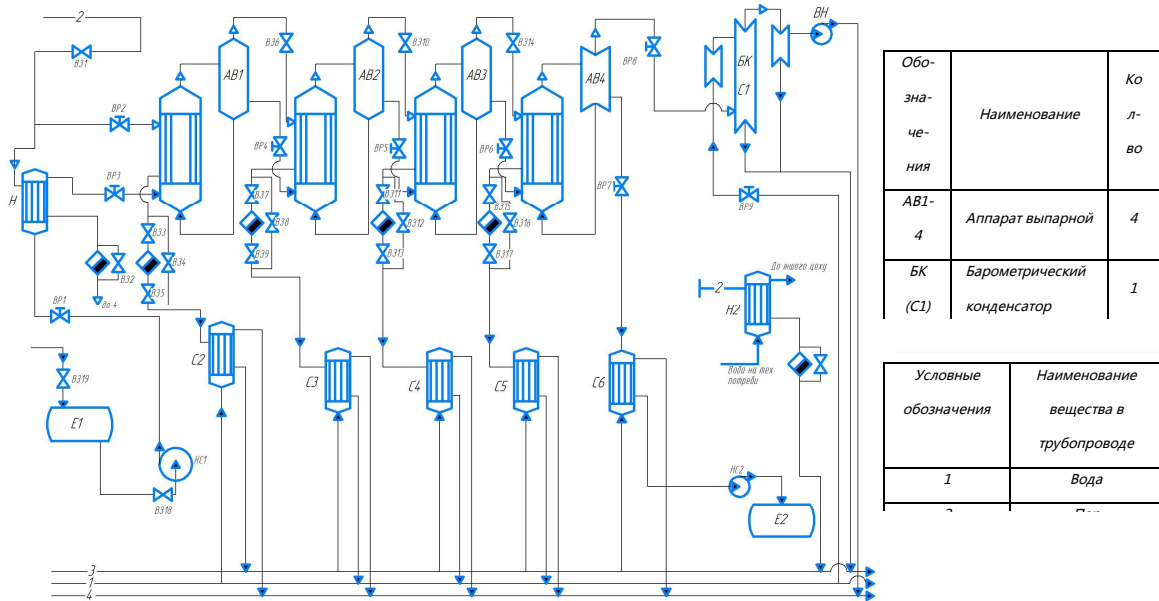
Перед проведением расчетов выпарной установки по литературным данным подбирают физико-химические свойства растворов, солей, конденсата в диапазоне температур и концентраций процесса выпаривания, схему установки (прямоток, противоток, смешанный ток), кратность использования тепла греющего пара, систему подогрева раствора. При составлении алгоритма расчета необходимо учитывать, что все параметры выпарной установки взаимосвязаны и изменение одного параметра приводит к изменению других.

Из сказанного очевидно, что расчет оптимальной выпарной установки достаточно сложный и громоздкий. Учитывая высокую стоимость оборудования и большие энергетические затраты, расчеты должны быть достаточно точными и достоверными.

Одним из путей снижения энергозатрат является рекуперация тепла горячих и холодных технологических потоков. Максимальная эффективность рекуперации тепла достигается при использовании метода пинч-анализа [3].

Покажем использование метода пинч-анализа для снижения энергозатрат при выпаривании раствора сульфата натрия (Na_2SO_4). Число корпусов выпарной установки – четыре, схема выпаривания прямоточная, циркуляция раствора естественная (рис. 1).

За основу возьмем принципиальную технологическую схему четырехкорпусного выпаривания по прямоточной схеме. Производительность установки по исходному раствору Na_2SO_4 составляет 10000 кг/час. Исходный раствор подогревается греющим паром в наружном теплообменнике Н до температуры кипения, подается в первый корпус установки АВ1, который обогревается греющим паром. Далее раствор самотеком перетекает во второй корпус АВ2, который обогревается греющим паром из первого корпуса. Из второго корпуса раствор перетекает в третий корпус АВ3, который обогревается вторичным паром из второго и т.д. Из четвертого корпуса АВ4 вторичный пар отводится в барометрический конденсатор БК, а упаренный раствор охлаждается в теплообменнике С6 и направляется в емкость Е2.



Обозначения	Наименование	Количество
AB1-4	Аппарат выпарной	4
БК (С1)	Барометрический конденсатор	1

Условные обозначения	Наименование вещества в трубопроводе
1	Вода

Рисунок 1 – Принципиальная технологическая схема процесса выпаривания Na₂SO₄ (до реконструкции)

Для реализации задачи рекуперации тепла в выбранной четырехкорпусной выпарной установке, выберем горячие и холодные потоки, подлежащие рекуперации. Горячими потоками будут: конденсаты и вторичные пары всех четырех корпусов установки, а также упаренный раствор. Холодными потоками будут: раствор Na₂SO₄, выпаривающийся в каждом корпусе установки, исходный раствор, а также вода на технические нужды. На основе материального и теплового баланса выпарной установки рассчитывается расход, температура, теплоемкость потоков.

Определяем потоковые теплоемкости CP (кВт/К) и тепловые нагрузки потоков ΔH (кВт) по следующей формуле:

$$\Delta H = G \cdot C \cdot (T_H - T_K) = CP \cdot (T_H - T_K),$$

где G – массовый расход потока, кг/с; C – теплоемкость потока, кДж/(кг·К); T_H и T_K – начальная и конечная температура потока.

Расчитанные данные технологических потоков приведены в потоковой таблице 1.

Для существующей схемы выпаривания строим составные кривые процесса и определяем, что минимальная разница температур существующего процесса составляет примерно 20 °С, целевые значения горячих утилит составляют $Q_{H\ min} = 2359$ кВт, холодных $Q_{C\ min} = 1988,2$ кВт. Количество рекуперированного тепла существующей схемы $Q_{рек} = 3001,5$ кВт. По расчетам, расход греющего пара на обогрев всей установки составляет около 1,16 кг/с. Расход охлаждающей воды для всей установки составляет 18,3 кг/с. Сеточная диаграмма для принципиальной технологической схемы выпаривания показывает, что тепло передается через пинч. Это свидетельствует о неполной рекуперации тепла в существующей схеме выпарки.

На основе технико-экономических расчетов задаемся новой минимальной разницей температур $\Delta T_{min} = 10$ °С. Сдвигаем составные кривые вдоль температурно-энтальпийной оси и определяем новые целевые значения горячих и холодных утилит для новой минимальной разницы температур в 10 °С. На основе этого строим сеточную

диаграмму и размещаем теплообменники для новой технологической схемы. Опираясь на данные сеточной диаграммы, получим новую технологическую схему процесса выпаривания с максимально полной рекуперацией тепла. Она представлена на рис. 2.

Таблица 1 – Поточковая таблица интеграции процесса выпаривания

№	Название потока	Тип потока	G , кг/с	T_H , °С	T_K , °С	C , кДж/(кг·К)	CP , кВт/К	ΔH , кВт
1	Конденсат 1 корпуса	гор.	0,48	140	35	4,21	2,02	212,2
2	Конденсат 2 корпуса	гор.	0,42	130	35	4,2	1,764	167,58
3	Конденсат 3 корпуса	гор.	0,442	118	35	4,196	1,86	154,38
4	Конденсат 4 корпуса	гор.	0,463	102	35	4,19	1,94	129,98
5	Вторичный пар из 1 корпуса	гор.	0,42	134	134	–	–	986,35
6	Вторичный пар из 2 корпуса	гор.	0,442	121	121	–	–	974,34
7	Вторичный пар из 3 корпуса	гор.	0,463	105	105	–	–	1040,82
8а	Вторичный пар из 4 корпуса	гор.	0,527	60	60	–	–	1178,5
8б	Охлаждение вторичного пара из 4 корпуса	гор.	0,527	60	55	4,19	2,208	11,04
9	Упаренный раствор	гор.	0,926	85	35	2,905	2,69	134,5
10	Исх. раствор	хол.	2,778	25	136	3,771	10,476	1162,8
11	Раствор Na ₂ SO ₄ в 1 корпусе	хол.	2,778	133	133	–	–	1026,72
12	Раствор Na ₂ SO ₄ во 2 корпусе	хол.	2,323	122	122	–	–	986,35
13	Раствор Na ₂ SO ₄ в 3 корпусе	хол.	1,883	107	107	–	–	974,34
14	Раствор Na ₂ SO ₄ в 4 корпусе	хол.	1,42	85	85	–	–	1040,82
15	Вода на техн.	хол.	1,35	20	50	4,19	5,65	169,5

Рекуперация тепла в предложенной новой схеме достигается тем, что теплота конденсатов 1,2,3,4 корпусов и тепло упаренного раствора идет на подогрев исходного раствора и воды на технологические нужды (см. рис. 2).

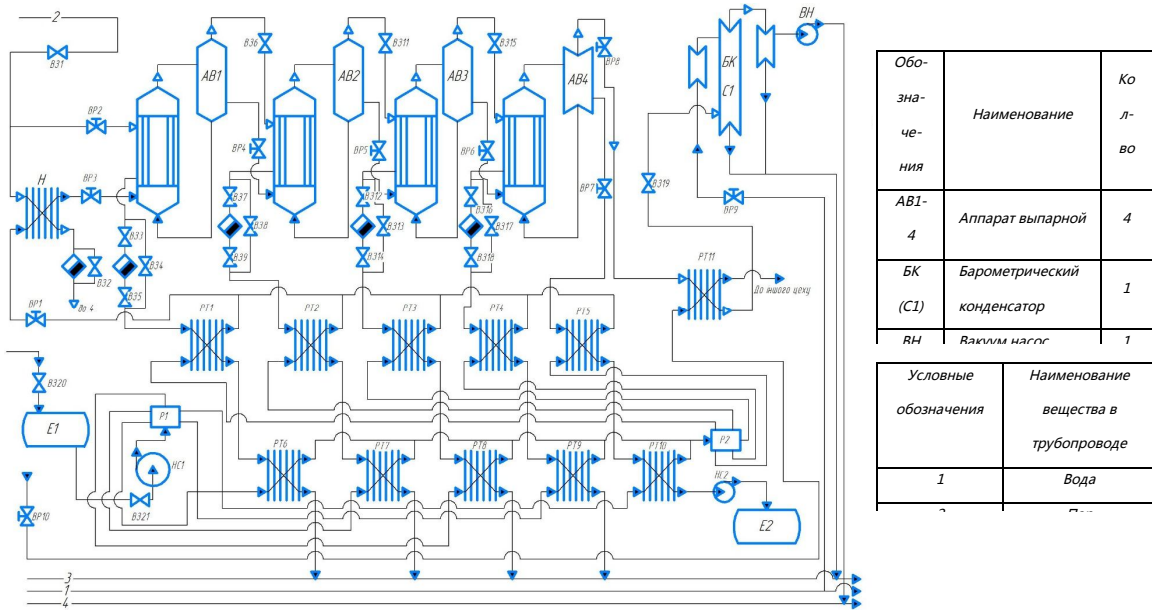


Рисунок 2 – Технологическая схема процесса выпаривания Na_2SO_4 после реконструкции

Для максимально полной рекуперации тепла необходимо расщепить поток исходного раствора Na_2SO_4 на пять потоков, пропустить их через рекуперативные теплообменники PT6, PT7, PT8, PT9, PT10, которые обогриваются конденсатами всех корпусов установки и упаренным раствором. Затем для выравнивания температуры поток соединяется, а затем опять расщепляется на пять потоков, которые снова нагреваются конденсатами всех корпусов установки и упаренным раствором в рекуперативных теплообменниках PT1, PT2, PT3, PT4, PT5. После этого поток исходного раствора Na_2SO_4 объединяется в один поток, который окончательно нагревается в утилитном теплообменнике – подогревателе Н до целевой температуры 136 °С и поступает на выпаривание в первый корпус установки. Поток воды на технологические нужды нагревается до целевой температуры 50 °С вторичным паром четвертого корпуса установки в рекуперативном теплообменнике PT11. Окончательная конденсация вторичного пара четвертого корпуса установки происходит в барометрическом конденсаторе БК. Анализ сечной диаграммы показывает, что тепло вторичного пара каждого корпуса установки целесообразно использовать для обогрева последующих корпусов установки, а не затрачивать его для подогрева исходного раствора. Это полностью согласуется с традиционной схемой многокорпусного выпаривания.

Новая схема предусматривает установку 11 рекуперативных теплообменников (PT1-PT11) и одного утилитного – подогревателя Н (рис. 2). После реконструкции количество горячих утилит, т.е. тепла, необходимого для подогрева исходного раствора и воды на технологические нужды, снизится на 987,7 кВт и составит $Q_{H\ min} = 1371,3$ кВт. Количество холодных утилит, т.е. тепла, которое необходимо отнимать для охлаждения конденсатов, упаренного раствора и вторичного пара, снизится на 926,8 кВт и составит $Q_{C\ min} = 1061,4$ кВт. Согласно расчетам, после реконструкции расход греющего пара на обогрев всей установки уменьшится на 0,48 кг/с и составит около 0,68 кг/с (по сравне-

нию с принципиальной схемой выпарной установки). Расход охлаждающей воды уменьшится на 9,8 кг/с и составит около 8,5 кг/с.

Очевидно, что установка новых теплообменников, которые предусмотрены в новой технологической схеме (рис. 2) потребует капитальных затрат. Также необходимо предусмотреть средства автоматизации и контроля. Это также скажется на увеличении стоимости предложенной реконструкции. Однако, на наш взгляд, подобные затраты могут быть оправданы, поскольку они, в конце концов, приводят к снижению энергоёмкости выпарной установки. Как показывают расчёты, если за основу взять принципиальную схему выпарки (рис. 1), то срок окупаемости подобного проекта (рис. 2) составляет около трех лет.

Таким образом, в работе было рассмотрено применение метода пинч-анализа для снижения энергозатрат в процессе выпаривания на примере тепловой интеграции четырехкорпусной выпарной установки по выпариванию сульфата натрия (Na_2SO_4).

Литература

1. Перцев Л.П., Ковалёв Е.М., Фокин В.С. Трубчатые выпарные аппараты для кристаллизующихся растворов.– М. Машиностроение, 1982.–135 с.
2. РДРТМ 26-01-95-83. Установки выпарные многокорпусные для растворов, содержащих твердую фазу. Метод теплового расчёта. – Харьков-УКРНИИХИММАШ, 1983.– 47 с.
3. Смит Р., Клемеш Й., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М. Основы интеграции тепловых процессов.– Харьков: НТУ «ХПИ». 2000.– 456 с.
4. Быканов С.Н., Горбунов К.А., Горбунова О.В., Ким А.Е. Тепловая интеграция процесса выпаривания едкого натра // Інтегровані технології та енергозбереження – 2016. – № 3. – С. 9–14.
5. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., ПЕРЕВЕРТАЙЛЕНКО О.Ю., ГАРЕВ А.О., ГОРБУНОВ К.О., БИКАНОВ С.М., ТОЛСТА Н.О. Покращення теплової інтеграції процесу концентрування квансного сула // Наукові праці.– Випуск 39, Т.2.– Одеса: Одеська національна академія харчових технологій.– 2011.– С. 146–151.

Bibliography (transliterated)

1. Pertsev L.P., Kovalyov E.M., Fokin V.S. Trubchatyie vyiparnyie apparaty dlya kristallizuyuschihsy rastvorov.– M. Mashinostroenie, 1982.–135 p.
2. RDRTM 26-01-95-83. Ustanovki vyiparnyie mnogokorpusnyie dlya rastvorov, so derzhaschih tverduyu fazu. Metod teplovogo raschyota. – Harkov-UKRNIHIMMASH, 1983.– 47 p.
3. Smit R., Klemesh Y., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A., Ulyev L.M. Osnovyi integratsii teplovyih protsessov.– Harkov: NTU «HPI». 2000.– 456 p.
4. Byikanov S.N., Gorbunov K.A., Gorbunova O.V., Kim A.E. Teplovaya integratsiya protsessa vyiparivaniya edkogo natra // Integrovanі tehnologiyi ta energozberezhennya – 2016. – # 3. – P. 9–14.

5. Tovazhnyanskyy L.L., Perevertaylenko O.Yu., Garev A.O., Gorbunov K.O., Bikanov S.M., Tolsta N.O. Pokraschennya teplovoyi Integratsiyi protsesu kontsentrivannya kvasnogo susla // Naukovi pratsi.– Vipusk 39, T.2.– Odesa: Odeska natsionalna akademiya harchovih tehnologiy.– 2011.– P. 146–151.

УДК 658.28:665.63:338

Биканов С.М., к.техн.н., доцент, Данилов Ю.Б., д.техн.н., професор, Горбунов К.О., к.техн.н., професор, Симоненко К.О., студент

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ ЧОТИРИКОРПУСНОЇ ВИПАРНОЇ УСТАНОВКИ З ВИПАРЮВАННЯ СУЛЬФАТУ НАТРІЮ

В роботі розглянуто застосування методу пинч-аналізу для зниження енерговитрат в процесі випарювання на прикладі теплової інтеграції чотирикорпусної випарної установки з випарювання сульфату натрію (Na_2SO_4).

Bykanov S.N., Danilov Yu.B., Gorbunov K.O., Simonenko K.O.

National Technical University "Kharkiv Politechnical Institute"

REDUCING OF THE POWER CONSUMPTION OF THE FOUR-FRAME EVAPORATOR FOR EVAPORATION OF SODIUM SULFATE

In the article, was considered using of the pinch-analysis method for reducing of the power consumption in the process of evaporation is considered using the example of thermal integration of a four-frame evaporator for evaporation of sodium sulfate (Na_2SO_4).