

ПИНЧ-ИНТЕГРАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ В ПРОЦЕСС ОЧИСТКИ ТЕТРАХЛОРИДА ТИТАНА

Введение. Титан – это сравнительно молодой конструкционный металл. Об этом говорит тот факт, что ни в одном событии Второй Мировой войны титан не сыграл какой-нибудь роли [1]. Поэтому его производство совершенствуется до сих пор, но все еще остается достаточно дорогим [2]. Производственные мощности для изготовления титана в Украине практически не изменились со времен Советского Союза и являются энергозатратными [3].

Большая сложность и затратность производства титана определяют экономическую специфику титановой металлургии. Добывающие активы играют здесь мизерную роль, почти вся добавленная стоимость формируется на заводах [4]. В некоторых исследованиях, проводимых в индустриально развитых странах, предлагается значительное упрощение технологии титана, но пока это только проекты будущего [5].

Снижение себестоимости производства титана возможно за счет уменьшения энергетических издержек. Это требует проведение теплоэнергетической интеграции процессов, происходящих на всех стадиях производства титана. Одной из самых затратных стадий производства металлического титана являются процессы получения и очистки тетрахлорида титана $TiCl_4$ [2].

В работе [6] авторами был сделан краткий обзор методов очистки тетрахлорида титана, а в работе [7] определены технологические потоки, которые могут быть использованы в пинч-анализе процесса. В работах [8, 9] был определен потенциал энергосбережения, доступный для классических методов пинч-анализа. В работах [10, 11] была выполнена теплоэнергетическая интеграция процесса очистки тетрахлорида титана методом ректификации с помощью классического пинч-проектирования. В указанных работах также приведена и детально описана технологическая схема очистки тетрахлорида титана с одновременным получением триокситрихлорида ванадия методом ректификации.

Здесь же приведена интегрированная схема очистки $TiCl_4$ (рис. 1) (описание схемы в [10, 11]) и с помощью составных кривых показано, что в данной схеме достигаются целевые энергетические значения, полученные с помощью методов пинч-анализа.

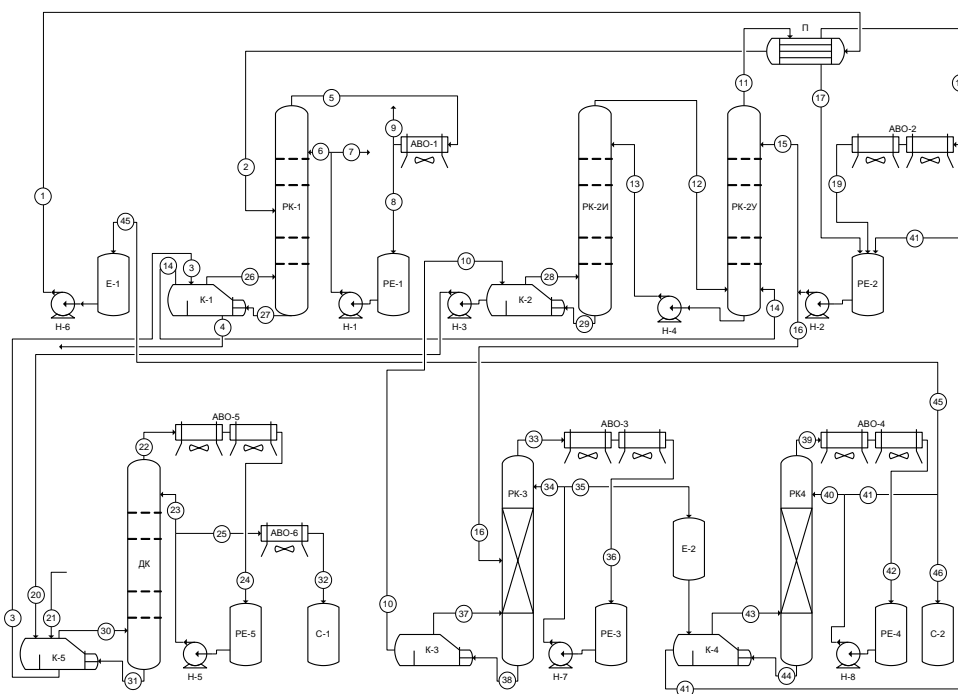


Рисунок 1 – Существующая принципиальная энерготехнологическая схема процесса очистки тетрахлорида титана. E-1,2 – емкость; C-1,2 – сборник; H-1-8 – насос; K-1-5 – электрический подогреватель куба; РК-1,3,4 – ректификационная колонна; ДК – дистилляционная колонна; РК-2И, РК-2У – ректификационные колонны – исчерпывающая и укрепляющая (разрезная колонна); П – теплообменник; АВО-1-5 – аппарат воздушного охлаждения; РЕ-1-5 – рефлюксная емкость

Основное энергопотребление в процессе происходит в кубах ректификационных колонн, которые обогриваются омическим теплом.

Для снижения энергопотребления в процессах ректификации используются технологические схемы аналогичные схемам тепловых насосов (ТН). В работе [12] рассмотрено одностадийное и двухстадийное компремирование верхнего погона колонны, показана экономическая эффективность данных схем при разделении углеводородных газов.

В работах [13–17] авторами выполнено сравнение различных технологических схем интеграции ТН с ректификационной колонной. Рассмотрено компремирование рабочего тела в замкнутом цикле. Изучены схемы с компремированием верхнего погона и нижнего продукта колонны. Также определена эффективность интеграции абсорбционных ТН с ректификационной колонной. Проведено сравнение интеграции ТН различных типов. Исследуется также эксергетическая эффективность различных типов интеграции ТН и ректификационной колонны. Рассмотрена эффективность в зависимости от параметров процесса: давление в колонне, тепловая нагрузка и т.д. Все примеры рассмотрены для разделения углеводородных газов. Сделан вывод, что лучшая интеграция в каждом конкретном случае должна быть выбрана с помощью методов пинч-анализа.

В работе [18] исследуется энерго- и эксергоэффективность теплового насоса с компремированием паров верхнего погона колонны при отделении бензола от смеси углеводородов C_8 . В работе [19] рассмотрена пинч-интеграция ТН в промышленные процессы, не обязательно связанной с ректификационной колонной. В работах [20, 21] рассмотрена управляемость интегрированных систем ректификационная колонна – ТН.

В работе [22] проведен теоретический анализ экономической эффективности пинч-интеграции ТН с ректификационными колоннами. В работе [23] выполнен термодинамический анализ интеграции ТН и колонны для разделения системы этанол – вода.

В работе [24] показана эффективность интеграции двух компрессоров, расположенных на верхнем погоне, с ректификационной колонной. В работе [25] рассмотрена интеграция тепловых насосов при интеграции всего производственного комплекса (total site). Показано, что в этом случае оптимальная интеграция ТН может быть выполнена между пинчами отдельных процессов.

В работе [26] сравнивается эффективность классической пинч-интеграции и углубленная интеграция с применением ТН для нефтеперерабатывающего завода. Показано, что наибольшая экономическая эффективность достигается при выполнении интеграции ТН в пинч-интегрированный процесс. В работе [27] представлен алгоритм выбора интеграции ТН для многокомпонентных и бинарных смесей в зависимости от параметров процесса.

Для параметров процесса очистки тетраоксида титана в соответствии с [27] для интеграции необходимо выбирать схему ТН с рекомпрессией паров верхнего погона колонны. В [28] показано, что оптимальное размещение теплового насоса – это размещение ТН поперек пинча и используется для этого большая составная кривая процесса.

Успешная интеграция ТН в различные системы разделения с ректификационными колоннами позволяет нам рассмотреть пинч-интеграцию ТН в процесс очистки тетраоксида титана методом ректификации.

Анализ Большой составной кривой

Большая составная кривая показывает возможность размещения трех тепловых насосов поперек процессного пинча в технологической схеме очистки тетраоксида титана (рис. 2). Первый тепловой насос можно установить для отбора теплоты паров с верха колонны РК-1 (рис. 1). Теоретическая мощность, которую можно получить, компримируя пары колонны РК-1 приблизительно равна 350 кВт. Мощность, которую можно рекуперировать, компримируя пары ванадиевого дистиллята ректификационной укрепляющей колонны (рис. 1), равна 3488 кВт. Мощность, которую можно рекуперировать, компримируя пары дистилляционной колонны, равна 900 кВт. Также можно компримировать пары очищенного тетраоксида титана после дистилляционной колонны, но у них наименьшая из всех рассмотренных паровых потоков температура, что приведет к увеличению эксплуатационных затрат на компрессионном оборудовании, и на данном этапе модернизации теплоэнергетической схемы процесса мы этот поток рассматривать не будем.

Параметры компремированных потоков рассчитаем с помощью программного обеспечения UNISIM DESIGN.

Расчет параметров компремированных потоков

1. Концентрат легкокипящих примесей (КЛП)(5, 8) – пары колонны РК-1 поступают с температурой 136 °С в компрессор для сжатия. После компремирования температура паров повышается до 166 °С и

поток поступает в межтрубное пространство теплообменника. Далее происходит конденсация и охлаждение КЛП до температуры 152 °С, с которой поток поступает в емкость РЕ-1.

2. Ванадиевый дистиллят (11–19). Пары колонны РК-2У с температурой 138 °С поступают компрессор для сжатия. После компримирования температура паров повышается до 172 °С. Далее происходит конденсация и охлаждение КЛП до температуры 158 °С, с которой поток поступает в емкость РЕ-2.

3. Очищенный тетрахлорид титана (22–24). Пары колонны ДК с температурой 136 °С поступают в компрессор для сжатия. После компримирования температура паров повышается до 167 °С. Далее происходит конденсация и охлаждение КЛП до температуры 154 °С, с которой поток поступает в емкость РЕ-5.

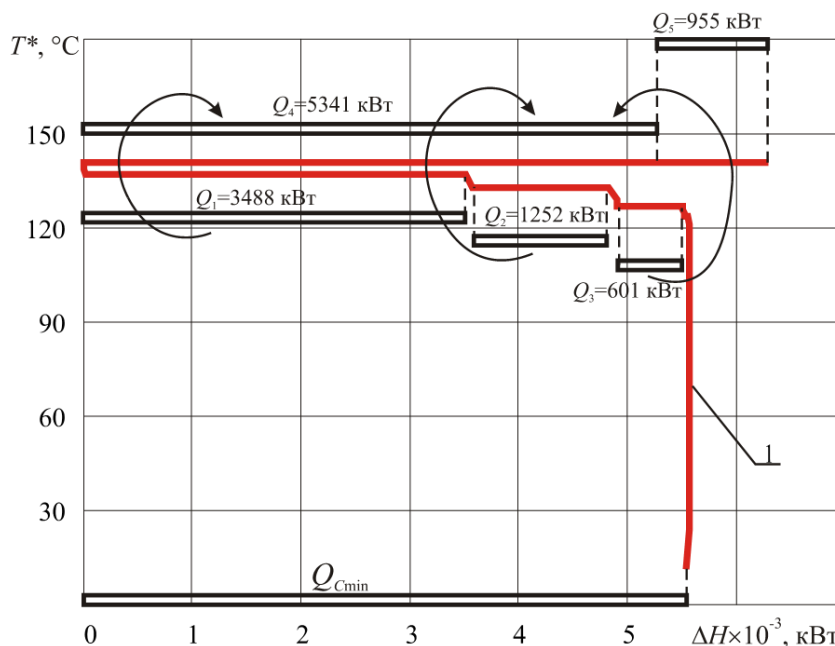


Рисунок 2 – Большая составная кривая процесса очистки тетрахлорида титана. T^* – сдвинутые на $\Delta T_{\min}/2$ температуры, Q_1, Q_2, Q_3 – хладопроизводительности тепловых насосов, Q_4 – общая хладопроизводительность тепловых насосов, Q_5 – новое значение горячей утилиты, $Q_{C\min} = 5528.1$ кВт, $Q_{REC} \approx 293.5$ кВт, $\Delta T_{\min} = 2$ °С

С учетом полученных данных относительно изменения температур потоков после установки компрессоров, составлена новая потоковая таблица (табл. 1).

Таблица 1 – Технологические данные потоков установки очистки тетрахлорида титана после установки компрессоров

№	Название потока	Тип	$T_s, ^\circ\text{C}$	$T_T, ^\circ\text{C}$	$G, \text{кг/ч}$	$C, \text{кДж/ (кг}\cdot^\circ\text{C)}$	$CP, \text{кВт/ } ^\circ\text{C}$	$r, \text{кДж/кг}$	$\Delta H, \text{кВт}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.1	КЛП, охлаждение пара (5)	гор	166	160	6600	0,528	0,968		5,81
1.2	КЛП, конденсация пара в АВО-1	гор	160	160	6600			190,974	350,12
1.3	КЛП, жидкость (8)	гор	160	152	6600	0,804	1,475		11,80
2	TiCl4 и легкокипящие примеси с установки (7)	гор	126	25	600	0,804	0,134		13,54
3.1	Ванадиевый дистиллят-1, охлаждение пара (11 - 18)	гор	172	166	65759	0,553	10,103		60,62
3.2	Ванадиевый дистиллят-1, конденсация пара в АВО-2	гор	166	166	65759			190,974	3488,42
3.3	Ванадиевый дистиллят-1, жидкость в РЕ-2 (17)	гор	166	164	5921	0,804	1,323		2,65
3.4	Ванадиевый дистиллят-1, жидкость из АВО-2 (19)	гор	166	158	59838	0,804	13,372		106,98
4.1	Очищенный тетрахлорид титана, охлаждение пара (22)	гор	167	158	17000	0,532	2,513		22,62

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4.2	Очищенный тетрахлорид титана, конденсация пара в АВО-5	гор	158	158	17000			190,974	901,82
4.3	Очищенный тетрахлорид титана, жидкость (24)	гор	158	154	17000	0,804	3,799		15,20
5.1	Ванадиевый дистиллят-2, охлаждение пара (33)	гор	127	125	362	0,553	0,056		0,11
5.2	Ванадиевый дистиллят-2, конденсация пара в АВО-3	гор	125	125	362			190,974	19,19
5.3	Ванадиевый дистиллят-2, жидкость (36)	гор	125	120	362	0,804	0,081		0,40
6.1	Очищенный тетрахлорид титана, гот. продукция, охлаждение пара (25)	гор	130	128	11322	0,532	1,674		3,35
6.2	Очищенный тетрахлорид титана, гот. продукция, конденсация пара в АВО-6	гор	128	128	11322			190,974	600,60
6.3	Очищенный тетрахлорид титана, жидкость (32)	гор	128	25	11322	0,804	2,530		260,59
7.1	Очищенный VOCl_3 , охлаждение пара (39)	гор	127	125	362	0,553	0,056		0,11
7.2	Очищенный VOCl_3 , конденсация пара в АВО-4	гор	125	125	362			190,974	19,19
7.3	Очищенный VOCl_3 , жидкость в РЕ-4 (42)	гор	125	120	362	0,804	0,081		0,40
8	Очищенный VOCl_3 , жидкость, гот. продукция (46)	гор	120	25	24	0,804	0,005		0,51
9	ТТТ, жидкость (1 - 2)	хол	10	120	12000	0,796	2,654		291,90
Продолжение таблицы 1									
10	Очищенный ванадиевый дистиллят, жидкость, (35)	хол	120	140	24	0,804	0,005		0,11
11	Кубовый остаток РК-1 (27)	хол	140	140	17973			190,974	953,41
12	Кубовый остаток РК-2 (29)	хол	140	140	83013			190,974	4403,7
13	Кубовый остаток РК-3 (38)	хол	140	140	377			190,974	20,02
14	Кубовый остаток РК-4 (44)	хол	140	140	377			190,974	20,02
15	Кубовый остаток ДК (31)	хол	140	140	16944			190,974	898,87

Используя новые потоковые данные, построим составные кривые для технологической схемы процесса очистки тетрахлорида титана с компримированием дистиллята колонн и $\Delta T_{\min} = 2$ °С. Построенные составные кривые (рис. 3) показывают, что при использовании тепловых насосов горячие утилиты сократятся с 6297.4 кВт до 1370.1 кВт, т.е. уменьшатся в 4.6 раза. Потребление холодных утилит уменьшится с 5529.3 кВт до 625.44 кВт, т.е. уменьшится более чем в 8 раз. Мощность рекуперации тепловой энергии возрастет с 292.3 кВт до 5258 кВт, т.е. увеличится в 18 раз.

Синтез энерготехнологической схемы процесса очистки технического тетрахлорида титана с получением очищенного тетрахлорида титана и ванадиевого дистиллята

Применяя методы пинч-проектирования, такие как разделение системы технологических потоков, на две энергетически независимые системы на пинче, критерий ΔT_{\min} , CP правила [1-3] строим сеточную диаграмму теплоэнергетической системы для потоковой таблицы с учетом того, что пинч-температура горячих потоков равна $t_{\text{hot}} = 130$ °С, а холодных $t_{\text{cool}} = 128$ °С (рис. 3). В результате мы получили пинч-проект системы рекуперации тепловой энергии, содержащий четыре рекуперативных теплообменных аппарата (рис. 4). Общая мощность рекуперации тепловой энергии равна 5259 кВт, что совпадает с целевым значением мощности рекуперации, полученным при построении составных кривых (рис. 3). Мощность горячих утилит равна $Q_{H\min} = 1370$ кВт, а мощность холодных утилит равна $Q_{C\min} = 627,5$ кВт, что также совпадает с целевыми значениями.

Используя сеточную диаграмму предлагаемого проекта пинч-модернизации системы рекуперативного теплообмена (рис. 4) построим принципиальную энерготехнологическую схему процесса очистки тетрахлорида титана с использованием тепловых насосов (рис. 5).

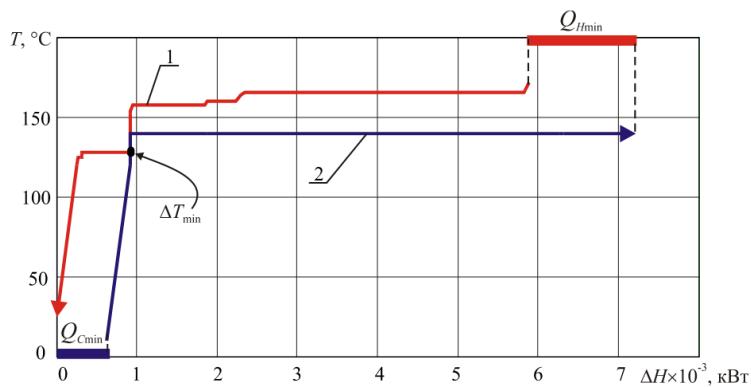


Рисунок 3 – Составные кривые системы теплообмена процесса очистки четыреххлористого титана с применением тепловых насосов. 1 – составная кривая горячих потоков; 2 – составная кривая холодных потоков; Q_{Hmin} , Q_{Cmin} , Q_{REC} – целевые значения потребляемой мощности горячих утилит, холодных утилит и мощность рекуперации. $Q_{Hmin} = 1370$ кВт, $Q_{Cmin} = 625.44$ кВт, $Q_{REC} \approx 5258$ кВт, $\Delta T_{min} = 2$ °C

Сеточная диаграмма с учетом установки теплового насоса

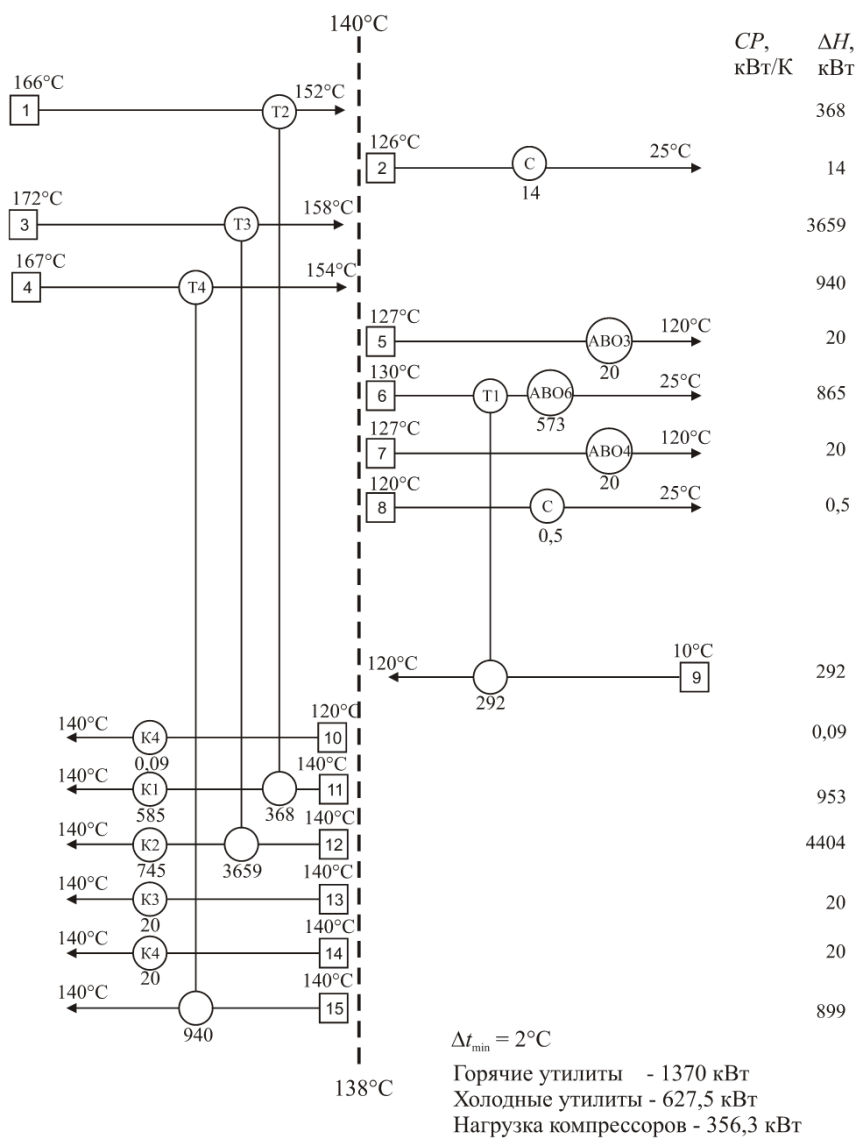


Рисунок 4 – Сеточная диаграмма пинч-проекта системы рекуперативного теплообмена с использованием тепловых насосов. $Q_{Hmin} = 1370$ кВт, $Q_{Cmin} = 625.44$ кВт, $\Delta T_{min} = 2$ °C

Отделение твердых примесей и растворенных газов.

В колонну РК-1 на расчетную тарелку подаётся питание (поток 2) – технический $TiCl_4$ (ТТТ). $TiCl_4$ освобождается от растворенных газов (поток 5) (хлор, фосген), $SiCl_4$, алюминия, твердых взвесей.

С верха колонны отбирается КЛП, состоящий в основном из $SiCl_4$, а растворенные газы удаляются вместе с газовой фазой. Пары верха колонны (поток 5) РК-1 сжимаются компрессором К-102, конденсируются в теплообменнике Т-2 и дросселируются в емкость (сепаратор) РЕ-1 (поток 8).

Твердые взвеси, алюминий и кислород (поток 4) – концентрируются в кубовой жидкости, а затем выводятся из куба. После этого кубовый остаток возвращается в начало процесса вместе с исходным ТТТ. Подогрев низа колонны осуществляется последовательно в теплообменнике Т-2 (поток 27) и подогревателе куба К-1 (поток 26). Очищенный от примесей $TiCl_4$ (поток 14) из куба передается на следующую стадию очистки.

Получение первичного ВД.

В колонну РК-2 на расчетную тарелку подаётся питание (поток 14) – ректификат с РК-1, а в куб – кубовый остаток с РК-3 (поток 10). Продукт освобождается от $VOCl_3$ и в виде ректификата-2 (поток 12) перетекает в куб следующей колонны. Первичный ВД отбирается с верха колонны. Пары верха колонны РК-2У (поток 11) сжимаются компрессором К-100, конденсируются в теплообменнике Т-3 и дросселируются в емкость (сепаратор) РЕ-2 (поток 18). Подогрев низа колонны осуществляется последовательно в теплообменнике Т-3 (поток 29) и подогревателе куба К-2 (поток 28).

Отделение остаточного ВД из ректификата.

Осуществляется в колонне дистилляции ДК с орошением, методом химической очистки, подача химического реагента производится в куб колонны.

В кубе происходит химическое превращение растворенного $VOCl_3$ в нерастворимый $VOCl_2$, а в колонне – отделение твердых продуктов реакции и окончательная очистка $TiCl_4$ от труднокипящих примесей.

Целевой очищенный $TiCl_4$ отбирается с верха колонны (поток 22). Пары верха колонны ДК (поток 22) сжимаются компрессором К-101, конденсируются в теплообменнике Т-4 и дросселируются в емкость (сепаратор) РЕ-5 (поток 24). Целевой продукт отбирается из емкости РЕ-5 (поток 25), охлаждается в теплообменнике Т-1 и (аппарате воздушного охлаждения) АВО-6 и выводится с установки (поток 30).

Вывод кубового остатка производится по установленному значению содержания твердых взвесей (не более 100 г/дм^3). После отделения твердых взвесей возвращается в начало процесса вместе с исходным ТТТ на питание в РК-1. Подогрев низа колонны осуществляется последовательно в теплообменнике Т-4 и подогревателе куба К-5.

Концентрирование первичного ВД.

Осуществляется в колонне ректификации РК-3. С верха колонны отбирается вторичный ВД (поток 33) с содержанием $VOCl_3$ 100 %. Кубовый остаток возвращается в куб РК-1 (поток 10). Первичный ванадиевый дистиллат ВД-1 из емкости РЕ-2 насосом Н-2 (поток 16) подается в ректификационную колонну РК-3. В колонне происходит концентрирование оксохлорида ванадия до заданной концентрации $VOCl_3$. Пары, выходящие из колонны (поток 33), конденсируются и охлаждаются в дефлегматоре АВО-3, жидкость поступает в рефлюксную емкость РЕ-3 (поток 36). Из нее часть жидкости, в качестве флегмы (поток 34), подается на орошение колонны РК-3, а другая часть (поток 35) – вторичный ванадиевый дистиллат ВД-2, остаточные количества $SiCl_4$, и $SOCl_2$ +АЦХ отбирается в емкость Е-2.

Продукт низа колонны РК-3 (поток 38), содержащий преимущественно $TiCl_4$ и $VOCl_3$, поступает в куб К-3, откуда, в заданном количестве, отбирается в колонну РК-2 (поток 10). Обогрев колонны РК-3 осуществляется с помощью куба-испарителя К-3 электричеством.

Состав примесей в техническом тетрахлориде титана не является постоянным. Кроме того, в первичном ванадиевом дистиллате ВД-1 происходит концентрирование легколетучих примесей, уходящих с парами из куба-испарителя К-1 в РК-2. Поэтому, для получения $VOCl_3$ требуемого качества, предусмотрена ректификационная колонна РК-4 периодического действия. В этой колонне происходит окончательная очистка $VOCl_3$ от легколетучих примесей. Пары, выходящие из колонны РК-4 (поток 39) конденсируются и охлаждаются дефлегматоре АВО-4, а жидкость поступает в рефлюксную емкость РЕ-4 (поток 42). Из нее, часть жидкости, в качестве флегмы (поток 40), подается на орошение колонны РК-4, а другая часть (поток 41), в зависимости от анализа: при высоком содержании легколетучих примесей – направляется на повторную переработку к ректификационную колонну РК-1, а при низком, очищенный $VOCl_3$ – в емкость С-2, где накапливается и периодически передается на склад готовой продукции. Обогрев колонны РК-4 осуществляется с помощью куба К-4 электричеством.

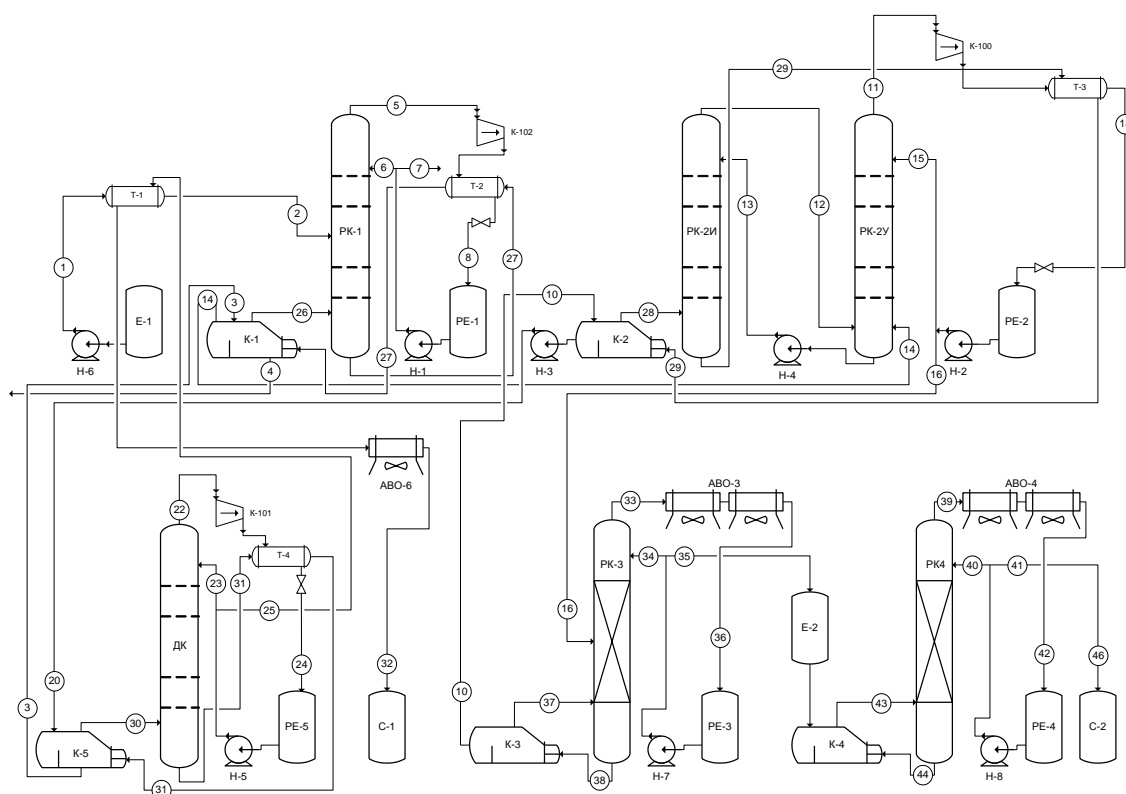


Рисунок 5 – Предлагаемая энерготехнологическая схема реконструкции процесса очистки тетрахлорида титана после реконструкции

E-1,2 – емкость; C-1,2 – сборник; H-1-8 – насос; K-1-5 – электрический подогреватель куба; PK-1,3,4 – ректификационная колонна; ДК – дистилляционная колонна; РК-2И, РК-2У – ректификационные колонны – исчерпывающая и укрепляющая (разрезная колонна); Т-1-3 – теплообменник; АВО-1-5 – аппарат воздушного охлаждения; РЕ-1-5 – рефлюксная емкость; К-100-102 – компрессор

Оценка численных значений энергопотребления и рекуперации в существующем и предлагаемом проектах приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Энергопотребление и рекуперация существующей системы теплообмена и системы теплообмена в предлагаемом проекте реконструкции

№ п/п	Энергетическая характеристика процесса первичной переработки нефти	Процесс с существующей системой теплообмена	Процесс с предлагаемой системой теплообмена	% от существующего значения
1	Тепловая мощность, потребляемая процессом, кВт	6297.4	1370.1	22
2	Тепловая мощность, отводимая на холодильниках, кВт	5529.3	625.44	11
3	Мощность рекуперации теплоты, кВт	292.3	5258	1800

Выводы

Применение методов пинч-анализа к интеграции тепловых насосов в процесс очистки четыреххлористого титана на ЗТМК позволит уменьшить энергопотребление на установке более чем в 4 раза от уровня потребления, существующего в настоящее время, а мощность, используемых холодных утилит уменьшить почти в 8 раз.

Годовая прибыль от внедрения проекта модернизации системы теплообмена процесса очистки четыреххлористого титана составит величину 3 127 000 долл. США, а срок окупаемости в этом случае будет

равен 5 місяцям, но эта величина получена без учета стоимости проектных работ. Их учет не сильно изменит величину срока окупаемости.

Литература

1. Eylon D. Titanium Technology in the USA – an Overview / D. Eylon, S.R. Seagle // *J. Mater. Sci. Technol.* – 2001. – Vol. 17, № 4. – P. 439–443.
2. Turner P. C. Low cost titanium myth or reality [Электронный ресурс] / P.C, Turner, A. Hartmar, J.S. Hansen S.J.Gerdeman // – Режим доступа <http://www.osti.gov/bridge/purl.cover.jsp?purl=/899609-PMSrtc/899609.PDF>, Last Updated: 07.23.2012.
3. Ремизов Г.О. Перспективы развития титановой промышленности на Украине / Г.О. Ремизов, В.Я. Саенко, Я.В. Белоконь. – *Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра: Матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції* – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – С. 297–307.
4. Мищенко В.Г. Титан Украины для авиастроения: тенденции и перспективы развития / В.Г. Мищенко, А.С. Багрийчук // *Вестник двигателестроения.* – 2009. – №1. – С. 139–142.
5. «Космический» прокат [Электронный ресурс]: <http://www.dsnews.ua/companies-markets/markets-regions/>.
6. Сивак В.В. Обзор современных методов очистки тетраоксида титана / В.В. Сивак, Л.М. Ульев, М.В. Соколов // *Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів».* – Харків: НТУ «ХПІ» – 2012. – № 10. – С. 96–105.
7. Сивак В.В. Экстракция данных для теплоэнергетической интеграции процесса очистки четыреххлористого титана методом ректификации / В.В. Сивак, Л.М. Ульев // *Інтегровані технології та енергозбереження.* – 2012. – № 2. – С. 3–8.
8. Сивак В.В. Энергосберегающий потенциал процесса очистки четыреххлористого титана / В.В. Сивак, Л.М. Ульев // *Тези доповідей XX Міжнародної науково-практичної конференції [«Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я»], microCAD'2012.* – Харків: СПДФО Ізрайлев Є.М. – 2012. – Ч. III. – С. 25.
9. Ульев Л.М. Традиционный энергосберегающий потенциал процесса очистки тетраоксида титана / Л.М. Ульев, В.В. Сивак, Л.А. Мельниковская // *Наукові праці ОНАХТ.* – Одеса: ФОП Попова Н.М. – 2012. – Випуск 41, том 2. – С. 25–30.
10. Сивак В.В. Интеграция процесса очистки четыреххлористого титана с концентрацией хлорокси ванадия / В.В. Сивак, Л.М. Ульев, А.Н. Сулима // *Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів».* – Харків: НТУ «ХПІ» – 2012. – № 39. – С. 15–30.
11. Ульев Л.М. Пинч-анализ процесса очистки четыреххлористого титана методом ректификации / Л.М. Ульев, В.В. Сивак // *International Conference "Energetica Moldovei-2012, conf.int.*(2012: Chişinău) Aspecte regionale de dezvoltare, 4-6 oct, 2012, Chisinau: Rapoarte, Ed. a 2-a/col. red.: Berzan V. [et.al]. - Ch.: S. n. 2012 (Tipogr. AŞM)/- 620 p., – P. 413–420.*
12. Wisz M.W. High performance trays and heat exchangers in heat pumped distillation columns / M.W. Wisz, R. Antonelli, E. G. Ragi // *Proceedings from the Third Industrial Energy Technology Conference.* – Houston, TX, April 26–29. – 1981. – P. 91–96.
13. Meszaros I. Design strategy for heat pump assisted distillation system / I. Meszaros, Z.Fonyo // *Heat Recovery Systems.* – 1986. – Vol. 6, – No. 6. – P. 469–476.
14. Fonyo Z. Economic applications of heat pumps in integrated distillation systems / Z. Fonyo, P. Mizsay // *Heat Recovery Systems and CHP.* – 1994. – Vol. 14. – No. 3. P. 249–263.
15. Fonyo Z. Comparison of various heat pump assisted distillation configurations / Z. Fonyo, N. Benko // *Trans IChemE.* – 1998. – Vol 76. – March. – Part A. – P. 348–360.
16. Fonyo Z. Comparative analysis of various heat pump schemes applied to C₄ splitters / Z. Fonyo, Kurntt, D.W.T. Rippin, I. Meszaros // *Computers chem. Engng.* – 1995. – Vol. 19. – Suppl. – P. S1–S6.
17. Mesazaros I. 1-butene separation processes with heat pump assisted distillation / I. Mesazaros, A. Meili // *Heat Recovery Systems and CHP.* – 1994. – Vol. 14. – No. 3. – P. 315–322.
18. Richterová V. Application of heat pump in rectification decreases energy consumption in the chemical industry / V. Richterová // *Energy Corners. Mgmt.* – 1991. – Vol. 32. – No. 6. – P. 519–528.
19. Wallin E. Integration of heat pumps in industrial processes / E. Wallin, T. Berntsson // *Heat Recovery Systems and CHP* – 1994. – Vol. 14. – No. 3. – P. 287–296.
20. Koggersbøl A. Control Configurations for an Energy Integrated Distillation Column / A. Koggersbøl, B.R. Andersen, J.S. Nielsen, S. Bay Jørgensen // *Compuun chem. Engng.* – 1996. – Vol. 20. – Suppl. –P. S853–S858.

21. Chandra Ishwar Control of a heat pump assisted distillation column / Ishwar Chandra, Sukumar Devotta // *Applied Thermal Engineering*. – 1998. – Vol. 18. – No. 8. – P. 643–652.
22. Rivera-Ortega P. Thermal integration of heat pumping systems in distillation columns / P. Rivera-Ortega, M. Picón-Núñez, E. Torres-Reyes, A. Gallegos-Muñoz // *Applied Thermal Engineering*. – 1999. – Vol. 19. – P. 819–829.
23. Enweremadu C. C. Parametric study of pressure increase across a compressor in ethanol-water vapour recompression distillation column / C. C. Enweremadu, M. A. Waheed, J. O. Ojediran // *Scientific Research and Essay*. – 2008. – Vol. 3 – No. 9. – P. 431–441.
24. Matsuda Kazuo Advanced energy saving in distillation process with self-heat recuperation technology / Kazuo Matsud, Kenichi Kawazuishi, Yasuki Kansha, Chihiro Fushimi, M Nagao, H. Kunikiyo, F. Masuda, Atsushi Tsutsumi // *Chemical engineering transactions*. – 2010. – Volume 21. – P. 31–36.
25. Bagajewicz Miguel J. On the use of heat pumps in total site heat integration / Miguel J. Bagajewicz, Andres F. Barbara // *Computers and Chemical Engineering*. – 2003. – Vol. 27 –P. 1707–1719.
26. Farhanieh B. Analysis of an existing heat exchanger network and effects of heat pump installations / B. Farhanieh, B. Sunden // *Heat Recovery System and CHP*. – 1990 – Vol. 10. – No. 3. P. 285–296.
27. Kiss Anton A. Mastering heat pumps selection for energy efficient distillation / Anton A. Kiss, Servando J. Flores Landaeta, Carlos A. Infante Ferreira // *Chemical engineering transactions*. – 2012. – Volume 29. – P. 397–402.
28. Основы интеграции тепловых процессов / [Смит Р., Товажнянский Л.Л, Клемеш Й. Капустенко П.А., Ульев Л.М.]. – Х.: ХГПУ. 2000. – 457 с.

УДК 669.295: 662.2

Ульев Л.М., Сивак В.В.

ПІНЧ-ІНТЕГРАЦІЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ В ПРОЦЕС ОЧИЩЕННЯ ТЕТРАХЛОРИДА ТИТАНУ

На підставі детального аналізу технологічної схеми процесу очищення чотирехлористого титану методом ректифікації із одночасним отриманням оксотрихлориду ванадію заданої чистоти визначені технологічні потоки, які можуть брати участь в теплоенергетичній інтеграції теплових насосів у процес, і визначені їх технологічні параметри. Застосування методів пінч-аналізу до інтеграції теплових насосів в процес очищення чотирехлористого титану на ЗТМК дозволить зменшити енергоспоживання на установці більш ніж в 4 рази від рівня споживання, існуючого в даний час, а потужність, використовуваних холодних утиліт зменшити майже в 8 разів. Річний прибуток від впровадження проекту модернізації системи теплообміну процесу очищення чотирехлористого титану складе величину 3127000 дол. США, а термін окупності в цьому випадку буде дорівнює 5 місяців, але ця величина отримана без урахування вартості проектних робіт.

Ulyev L.V., Sivak V.V.

PINCH-INTEGRATION OF HEAT PUMP IN TITANIUM TETRACHLORIDE CLEANING PROCESS

The flowsheet for new titanium tetrachloride cleaning process with rectification method with simultaneous vanadium oxitrichloride production is presented in this paper. Flowsheet studding and literature analysis allow to define the technological streams for process heat energy integration. The thermal physic and technological parameters were defined for streams. Application of the methods of pinch-analysis to the integration of heat pumps in the cleaning of titanium tetrachloride processes will reduce energy consumption more than 4 times the level of consumption of the present-time, and cold utilities will reduce almost in 8 times. The annual profit from the introduction of the project of modernization of heat treatment process of titanium tetrachloride will equal almost 3.127 million U.S. dollars, and the payback period in this case would be 5 months.