

УДК 658.26:665.63:338.45

**В.В. СИВАК**, и.о. генерального директора,  
ГП «ЗТМК», Запорожье,  
**Л.М. УЛЬЕВ**, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»,  
**А.Н. СУЛИМА**, канд. техн. наук, вед. научн. сотр.,  
ЗАО «УкрНИИхиммаш», Харьков

## **ИНТЕГРАЦИЯ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ЧЕТЫРЕХХЛОРИСТОГО ТИТАНА С КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ХЛОРОКИСИ ВАНАДИЯ**

Выполнено пинч-проектирование системы рекуперации тепловой энергии для процесса очистки четыреххлористого титана методом ректификации с одновременным получением оксотрихлорида ванадия. Определен энергосберегающий пинч-потенциал процесса и целевые энергетические значения. Синтезирована энерготехнологическая схема интегрированного процесса, срок окупаемости, при внедрении которой будет равен  $\approx 2$  месяцам.

Виконано пінч-проект системи рекуперації теплової енергії для процесу очищення чотирихлористого титану методом ректифікації з одночасним отриманням оксотріхлориду ванадію. Визначено пінч-потенціал енергозбереження процесу і цільові енергетичні значення. Синтезована енерготехнологічна схема інтегрованого процесу, термін окупності, при впровадженні якої буде рівний 2 місяцям.

The pinch-design of recuperation system for titanium tetrachloride cleaning process with rectification method with simultaneous vanadium oxitrichloride production is presented in this paper. Energy saving potential of process and target energy values were defined. Process integration flow-sheet was created. Pay back period for installation for this project is two months.

**Введение.** Титановая промышленность – одна из самых молодых отраслей металлургии. Первый промышленный титан был получен в середине XX века [1, 2], и в настоящее время является четвертым по значению конструкционным материалом.

В конце 80-х годов прошлого века Украина обладала действующими предприятиями всех переделов в производстве титана: горно-обогатительные комбинаты, производства диоксида титана и производство титановой губки, производство титановых слитков, производство проката и штамповки, а также производство порошковой металлургии. С

распадом СССР сильно сократилось производство литья, а затем остановилось и производство титановой губки. И только несколько лет назад титановое производство Украины начало возрождаться, хотя экономический кризис последних лет снизил темпы возрождения, что характерно для мирового титанового рынка в целом. Украина обладает большими возможностями для повышения своей роли в мировой титановой промышленности. По некоторым оценкам запасы ильменита и рутила в Украине составляют 30% от зафиксированных мировых запасов [3]. Но для выхода Украины в лидеры титанового рынка необходимо модернизировать все процессы производства титана, сократить издержки производства, и прежде всего, повысить его энергоэффективность.

Наиболее распространенным методом получения титана является восстановление тетрахлорида титана магнием или натрием (натрийтермический и магнийтеpmический методы, мало отличаются друг от друга). В результате восстановления образуется титановая губка с примесями магния и дихлоридами магния. Титановая губка может быть очищена от магния и хлорида магния, а также низших хлоридов титана гидрометаллургическим способом или вакуумной сепарацией.

Процесс получения четыреххлористого титана имеет четыре стадии: подготовка сырья, хлорирование, конденсация, очистка технического продукта. Наиболее трудноудаляемой примесью данного соединения является окситрихлорид ванадия.  $\text{VOCl}_3$  появляется в техническом продукте в результате хлорирующего обжига титансодержащего сырья.

Наибольшее распространение получила очистка технического четыреххлористого титана с помощью ректификации, хотя она значительно осложнена из-за близости температур кипения  $\text{TiCl}_4$  и  $\text{VOCl}_3$  — 127 и 136°C соответственно. Важным преимуществом метода ректификации является сохранение молекулярной формы  $\text{VOCl}_3$ , которая является важным звеном в технологии получения ванадия и его соединений. Металлический ванадий и его сплавы представляют интерес для развития таких отраслей, как ракетостроение, атомная промышленность [4].

Главным образом, четыреххлористый титан применяется для получения металлического титана, а также его сплавов. Помимо этого, тетрахлорид титана применяется в производстве титаносодержащей керамики [5], пигментного диоксида титана, как дымообразователь и др.

Производство титановой губки является одним из самых энергоёмких процессов в металлургии. Качество проведения данного процесса и получения необходимых продуктов зависит от чистоты используемого тетрахлорида титана. Таким образом, одной из основных задач в производстве титана является повышение эффективности очистки исходного сырья ( $\text{TiCl}_4$ ) от примесей и увеличение его энергоэффективности. Большой эффективностью при снижении удельного энергопотребления в химико-технологических системах обладают методы интеграции процессов, и, в частности метод пинч-анализа [6–12], который мы применим к процессу очистки исходного  $\text{TiCl}_4$ .

**Технологическая схема и экстракция данных.** Рассмотрим кратко технологическую схему процесса очистки тетрахлорида титана с одновременной концентрацией оксотрихлорида ванадия методом ректификации. Более подробно схема рассмотрена в работе [13].

Технический тетрахлорид титана  $\text{TiCl}_4$  (ТТТ) (поток 1) подогревается в электрическом котле К-0 и поступает в ректификационную колонну РК-1 (рис. 1). ТТТ на этой стадии освобождается от растворенных газов и легкокипящих примесей, выводятся с верха колонны. Жидкость после охлаждения поступает в рефлюксную емкость откуда одна часть в виде флегмы подается на орошение верха колонны РК-1, а другая часть, содержащая, в основном,  $\text{TiCl}_4$  и легкокипящие примеси, выводится на переработку. Твердые примеси, содержащиеся в ТТТ, выводятся на утилизацию. Обогрев колонны РК-1 происходит с помощью электрического куба-кипяльника. Очищенный тетрахлорид титана (поток 13) из куба-кипяльника поступает на дальнейшую очистку от  $\text{VOCl}_3$  в ректификационную колонну РК-2И. Пары из верхней части РК-2И по трубе поступают в кубовую часть РК-2У. Жидкость из кубовой части РК-2У подается на орошение верха РК-2И. Пары, уходящие из верха РК-2У, поступают в дефлегматор. Одна часть конденсата в виде флегмы подается на орошение верха колонны РК-2У, а другая часть отбирается как ванадиевый поток. Обогрев колонны РК-2И происходит с помощью электричества. Нижний продукт колонны РК-2И подается на окончательную очистку в куб-кипяльник К-5 дистилляционной колонны ДК. Очистка тетрахлорида титана от остаточного  $\text{VOCl}_3$  осуществляется подачей в К-5 химического реагента.

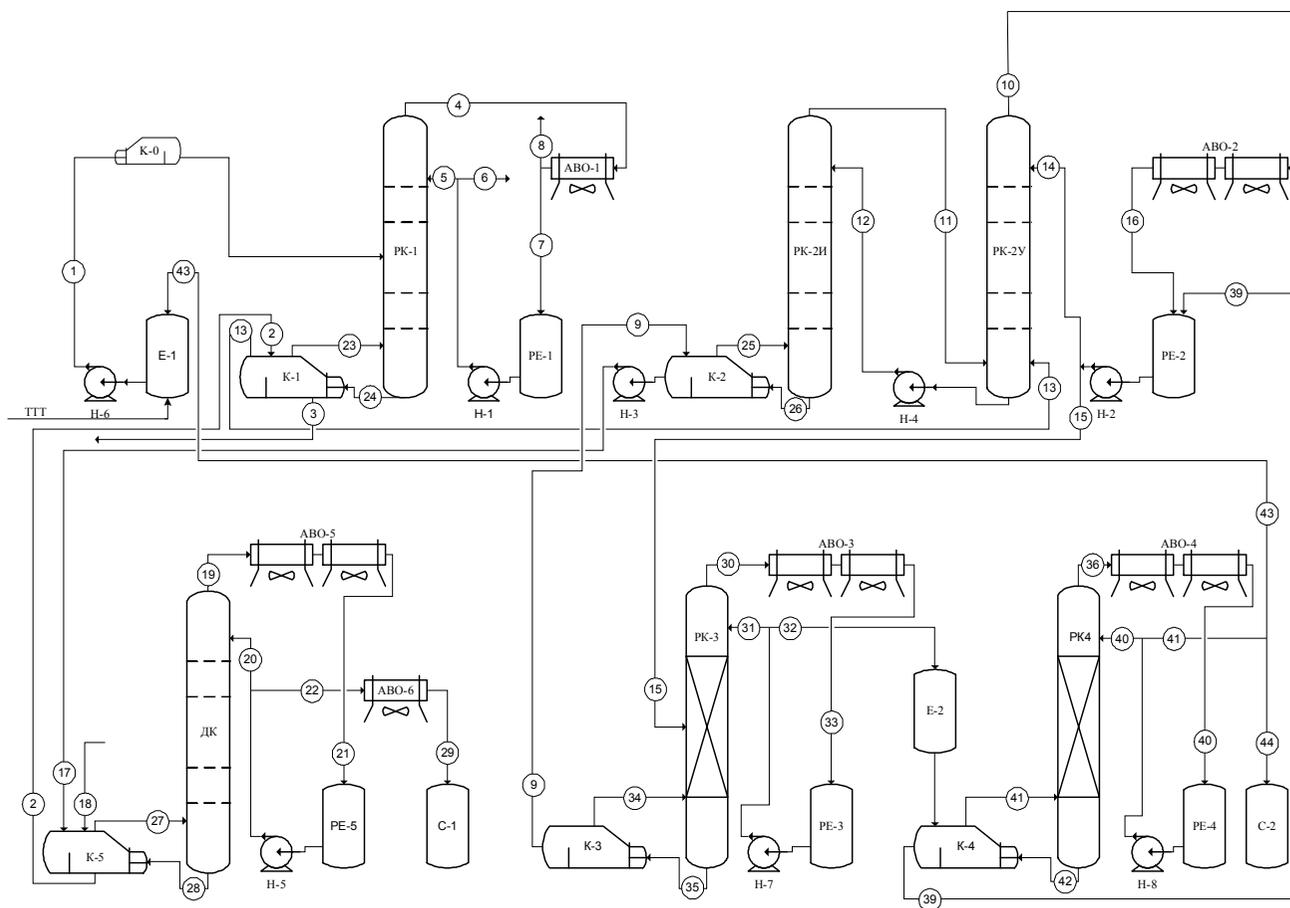


Рис. 1. Существующая принципиальная энерготехнологическая схема процесса очистки тетрахлорида титана. Е-1,2 – емкость; С-1,2 – сборник; Н-1-8 – насос; К-0-5 – электрический подогреватель; РК-1,3,4 – ректификационная колонна; ДК – дистилляционная колонна; РК-2И, РК-2У – ректификационные колонны – исчерпывающая и укрепляющая (разрезная колонна); АВО-1-5 – аппарат воздушного охлаждения; РЕ-1-5 – рефлюксная емкость.

В дистилляционной колонне происходит отделение твердых продуктов реакции от  $TiCl_4$  и удаление тяжелокипящих примесей. Верхний продукт ДК поступает на конденсацию и охлаждение. Затем одна его часть в виде флегмы подается на орошение верха колонны ДК, а другая часть отбирается как очищенный тетрахлорид титана (ОТТ) в сборник готового продукта. Обогрев колонны ДК происходит электричеством в кубе-кипяльнике К-5. Из куба К-5 вместе с  $TiCl_4$  выводятся твердые продукты реакции в куб-кипятник К-1 для повторной переработки.

Первичный ванадиевый дистиллят из емкости РЕ-2 подается в ректификационную колонну РК-3. В колонне происходит концентрирование оксотрихлорида ванадия. Пары, выходящие из колонны, конденсируются и охлаждаются в дефлегматоре, жидкость поступает в рефлюксную емкость РЕ-3. Из нее часть жидкости в качестве флегмы подается на орошение колонны РК-3, а другая часть, вторичный ванадиевый дистиллят, отбирается в емкость Е-2. Нижний продукт колонны РК-3, содержащий преимущественно  $TiCl_4$  и  $VOCl_3$ , поступает в куб-испаритель К-3, откуда отбирается в колонну РК-2. Обогрев колонны РК-3 осуществляется с помощью куба-испарителя К-3 электричеством. Состав примесей в ТТТ не является постоянным. Поэтому, для получения  $VOCl_3$  требуемого качества, предусмотрена ректификационная колонна РК-4. В этой колонне происходит окончательная очистка  $VOCl_3$ . Пары, выходящие из колонны РК-4 конденсируются и охлаждаются в дефлегматоре, а жидкость поступает в рефлюксную емкость РЕ-4. Из нее часть жидкости в качестве флегмы подается на орошение колонны РК-4, а другая часть, в зависимости от анализа: при высоком содержании легколетучих примесей – направляется на повторную переработку в ректификационную колонну РК-1, а при низком, очищенный  $VOCl_3$  — в емкость Е-3, откуда передается на склад готовой продукции. Обогрев колонны РК-4 осуществляется с помощью куба-испарителя К-4 электричеством. В описанном процессе совершенно отсутствует теплоэнергетическая интеграция. Действительно, сеточная диаграмма показывает только утилитные операции нагрева и охлаждения технологических потоков (рис. 2).

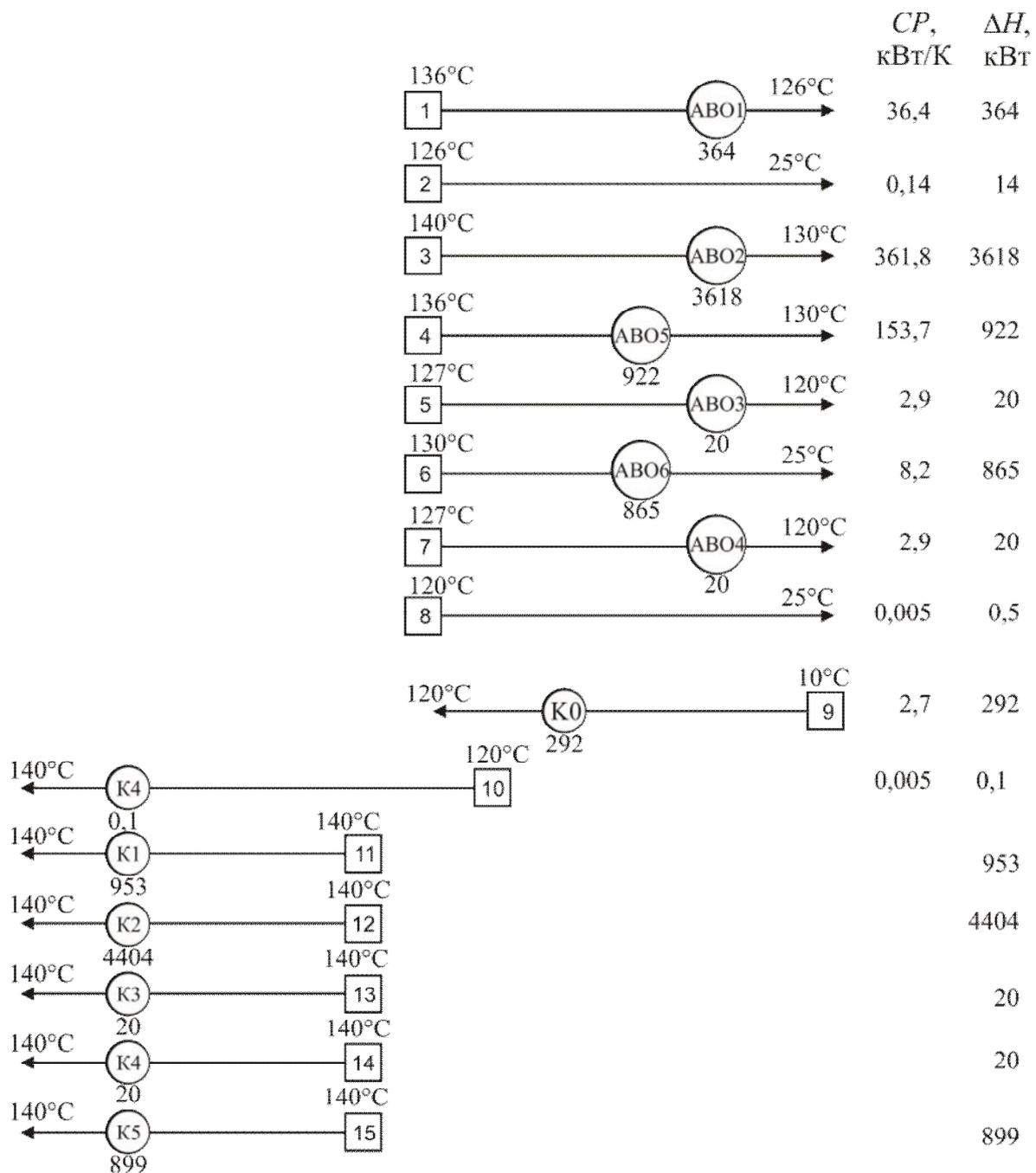


Рис. 2. Сеточная диаграмма существующей в настоящее время системы теплообмена процесса очистки тетрахлорида титана. АВО-1–6 – аппарат воздушного охлаждения; К-1-5 – электрический подогреватель куба; Т – ракуперативный теплообменный аппарат;  $CP$  – потоковые теплоемкости, кВт/К;  $\Delta H$  – изменение потокового теплосодержания, кВт. Внизу под размещениями теплообменных аппаратов показаны их тепловые нагрузки в кВт.

Анализ технологической схемы и литературы [3–5, 6–8] позволил определить теплофизические и потоковые данные технологических потоков рассматриваемого процесса и представить их в виде потоковой таблицы, которая является цифровым отображением процесса (таблица). Детальное описание потоков приведено в работе [13].

Таблица

Потоковые данные технологических потоков, включенных в интеграцию для существующего в настоящее время процесса очистки тетрахлорида титана

№	Название потока	Тип	$T_s$ , °C	$T_r$ , °C	$G$ , кг/ч	$C$ , кДж/(кг·°C)	$CP$ , кВт/°C	$r$ , кДж/кг	$\Delta H$ , кВт	$\alpha$ , кВт/(м <sup>2</sup> ·К)
1,1	КЛП, охлаждение пара (5)*	гор	136	134	6600	0,528	0,968		1,94	1
1,2	КЛП, конденсация пара в АВО-1	гор	134	134	6600			190,97	350,12	1
1,3	КЛП, жидкость (8)	гор	134	126	6600	0,804	1,475		11,80	1
2	TiCl <sub>4</sub> и легкокипящие примеси с установки (7)	гор	126	25	600	0,804	0,134		13,54	1
3,1	Ванадиевый дистиллят-1, охлаждение пара (11 – 18)	гор	140	138	65759	0,553	10,103		20,21	1
3,2	Ванадиевый дистиллят-1, конденсация пара в АВО-2	гор	138	138	65759			190,97	3488,4	1
3,3	Ванадиевый дистиллят-1, жидкость в РЕ-2 (17)	гор	138	136	5921	0,804	1,323		2,65	1
3,4	Ванадиевый дистиллят-1, жидкость из АВО-2 (19)	гор	138	130	59838	0,804	13,372		106,98	1
4,1	Очищенный тетрахлорид титана, охлаждение пара (22)	гор	136	134	17000	0,532	2,513		5,03	1
4,2	Очищенный тетрахлорид титана, конденсация пара в АВО-5	гор	134	134	17000			190,97	901,82	1
4,3	Очищенный тетрахлорид титана, жидкость (24)	гор	134	130	17000	0,804	3,799		15,20	1
5,1	Ванадиевый дистиллят-2, охлаждение пара (33)	гор	127	125	362	0,553	0,056		0,11	1
5,2	Ванадиевый дистиллят-2, конденсация пара в АВО-3	гор	125	125	362			190,97	19,19	1
5,3	Ванадиевый дистиллят-2, жидкость (36)	гор	125	120	362	0,804	0,081		0,40	1
6,1	Очищенный тетрахлорид титана, гот. продукция, охлаждение пара (25)	гор	130	128	11322	0,532	1,674		3,35	1

Продолжение таблицы										
6,2	Очищенный тетрахлорид титана, гот. продукция, конденсация пара в АВО-6	гор	128	128	1322			190,97	600,60	1
16,3	Очищенный тетрахлорид титана, гот. продукция, жидкость (32)	гор	128	25	11322	0,804	2,530		260,59	1
7,1	Очищенный $\text{VOCl}_3$ , охлаждение пара (39)	гор	127	125	362	0,553	0,056		0,11	1
7,2	Очищенный $\text{VOCl}_3$ , конденсация пара в АВО-4	гор	125	125	362			190,97	19,19	1
7,3	Очищенный $\text{VOCl}_3$ , жидкость в РЕ-4 (42)	гор	125	120	362	0,804	0,081		0,40	1
8	Очищенный $\text{VOCl}_3$ , жидкость, гот. продукция (46)	гор	120	25	24	0,804	0,005		0,51	1
9	ТТТ, жидкость (1 – 2)	хол	10	120	12000	0,796	2,654		291,90	1
10	Очищенный ванадиевый дистиллят, жидкость, подогрев (35)	хол	120	140	24	0,804	0,005		0,11	1
11	Кубовый остаток РК-1 (27)	хол	140	140	17973			190,97	953,41	1
12	Кубовый остаток РК-2 (29)	хол	140	140	83013			190,97	4403,71	1
13	Кубовый остаток РК-3 (38)	хол	140	140	377			190,97	20,02	1
14	Кубовый остаток РК-4 (44)	хол	140	140	377			190,97	20,02	1
15	Кубовый остаток ДК (31)	хол	140	140	16944			190,97	898,87	1

\*) Номера потоков на схеме (рис. 1).

**Определение энергосберегающего потенциала.** Используя энерготехнологическую схему процесса и потоковую таблицу, построим на энтальпийно-температурной плоскости составные кривые горячих и холодных технологических потоков [9–11] (рис. 3). Проекция составной кривой горячих технологических потоков (горячей составной кривой) на энтальпийную ось показывает величину мощности, которую необходимо отвести от процесса для его выполнения, т.е. значение мощности холодных утилит –  $Q_C$ . Проекция составной кривой холодных технологических потоков (холодной составной кривой) на энтальпийную ось показывает величину мощности, которую необходимо подвести к процессу для его выполнения – т.е. значение мощности горячих утилит –  $Q_H$ .

Для снижения энергопотребления в химико-технологической системе (ХТС) необходимо уменьшение минимальной разности температур

$\Delta T_{\min}$  между теплоносителями в теплообменных аппаратах. Это достигается путем сближения составных кривых вдоль энтальпийной оси. Значение  $\Delta T_{\min}$ , которое может быть достигнуто в теплообменной сети ХТС, определяется как спецификацией теплообменного оборудования, так и теплофизическими свойствами теплоносителей, которые, в свою очередь, конечно, влияют на выбор спецификации теплообменного оборудования.

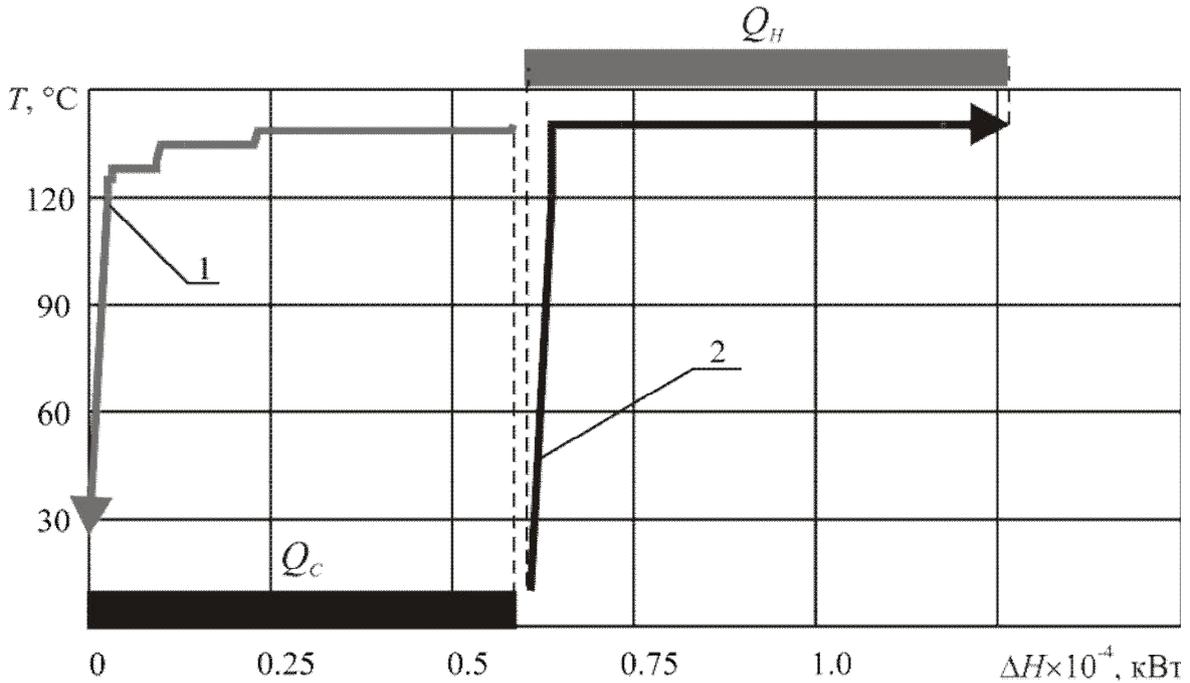


Рис. 3. Составные кривые процесса очистки четыреххлористого титана для процесса без рекуперации тепловой энергии. 1 – составная кривая горячих потоков; 2 – составная кривая холодных потоков;  $Q_H$ ,  $Q_C$  – потребляемая мощность горячих утилит, холодных утилит и мощность рекуперации.  $Q_H \approx 6590$  кВт,  $Q_C \approx 5822$  кВт

Для того чтобы экономически оптимально интегрировать рассматриваемый процесс, нам необходимо выяснить наиболее важные экономические значения, существенно влияющие на приведенную стоимость выполненного проекта.

Стоимость горячих утилит, использованных в процессе, оценим исходя из величины тарифа для промышленных предприятия Украины: 93.46 коп за кВт/час, что ведет к стоимости горячих утилит  $\sim 980$  долл. США за 1 кВт/год.

Стоимость холодных утилит принимаем стоимости природного газа. В настоящее время эта величина составляет значение  $\sim 520$  долл. США за  $1000 \text{ м}^3$ , что дает значения 47 долл. США за 1 кВт год.

Используя цены на теплообменное оборудование, полученные от его производителей, можно еще до выполнения проекта реконструкции оценить необходимые капвложения и срок их окупаемости [19]. Итак, капитальную стоимость одного теплообменного аппарата можно определить выражением [20]:

$$\text{Кап. стоимость} = A_T + B_T(S)^c, \quad (1)$$

где  $A_T = 40000$  долл. США — стоимость установки одного теплообменного аппарата, для пластинчатых теплообменных аппаратов  $A_T = 5000$  долл. США;  $B_T$  — коэффициент, эквивалентный стоимости  $1 \text{ м}^2$  площади поверхности теплообмена, для кожухотрубчатых теплообменных аппаратов  $B_T = 800$ , для пластинчатых  $B_T = 1000$ ;  $S$  — площадь поверхности теплообмена теплообменного аппарата;  $c$  — коэффициент, отражающий нелинейную зависимость стоимости теплообменника от величины его поверхности теплообмена. Для кожухотрубчатых теплообменников  $c = 0.8$ .

Будем считать, что для выполнения проекта предприятие берет в банке кредит сроком на 5 лет с 10% кредитной ставкой. Для расчета общей целевой площади поверхности теплообмена будем использовать потоковые данные, приведенные в таблице, к которым добавим характерные значения коэффициентов теплоотдачи технологических потоков.

Расчет дисконтированных величин стоимостей проекта реконструкции [9, 12] процесса очистки тетрахлорида титана позволяет определить значение минимальной разности температур между теплоносителями в будущей системе рекуперации тепловой энергии с учётом существующего теплообменного оборудования,  $\Delta T_{\min} \approx 2^\circ\text{C}$  (рис. 4).

Построим составные кривые для  $\Delta T_{\min} = 2^\circ\text{C}$  (рис. 5). Мы видим, что пинч локализуется на температуре для горячих потоков, раной  $140^\circ\text{C}$ , и соответственно для холодных потоков —  $138^\circ\text{C}$ . Составные кривые показывают, что горячие утилиты при этом приобретают значение равное  $Q_{H\min} = 6296.1$  кВт. Холодные утилиты уменьшаться до величины  $Q_{C\min} = 5528.1$  кВт. При этом рекуперация тепловой энергии станет

равной  $Q_{REC} \approx 293.5$  кВт (рис. 5), которая и является выражением энерго-сберегающего потенциала.

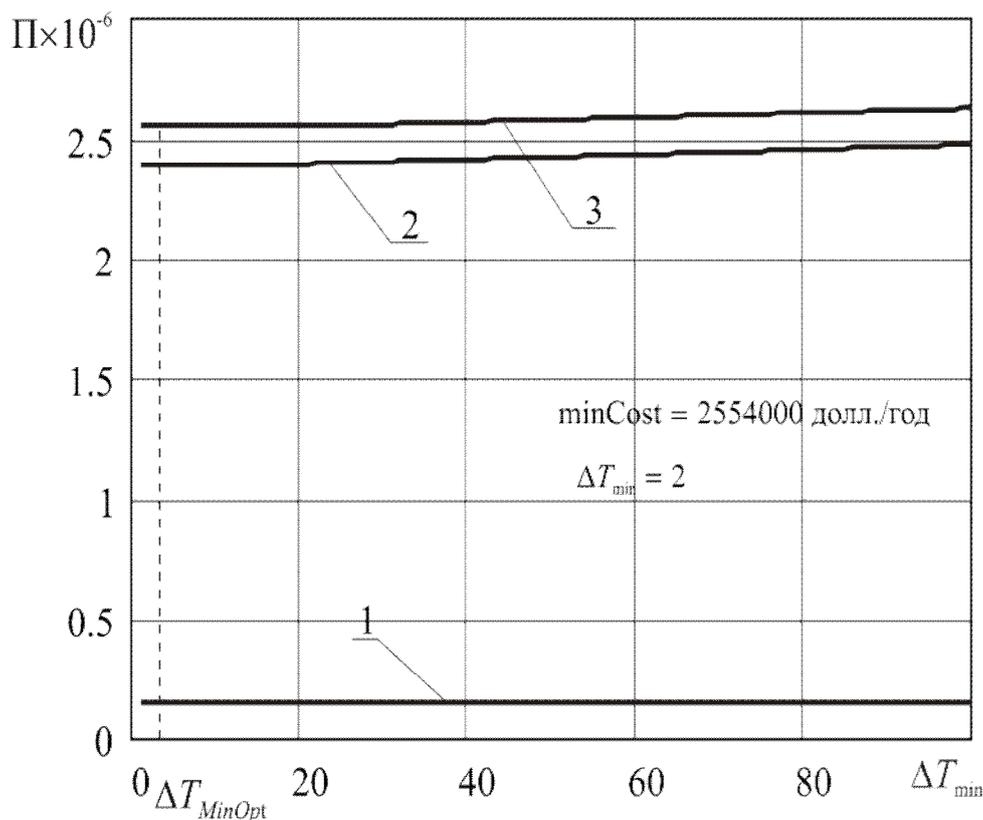


Рис. 4. Приведенная (дисконтированная) стоимость проекта реконструкции системы теплообмена процесса очистки тетрахлорида титана. 1 – приведенные капитальные затраты; 2 – годовая стоимость энергии; 3 – общая приведенная стоимость проекта реконструкции

Принимая во внимание стоимость горячих и холодных утилит в процессе очистки тетрахлорида титана, получаем величину возможной годовой прибыли равной  $\sim 300$  тыс. долл США.

### Пинч-проектирование.

Применяя методы пинч-проектирования [16] строим сеточную диаграмму теплообменной системы для интегрированного процесса с минимальной разностью температур между теплоносителями,  $\Delta T_{min} = 2^\circ\text{C}$ . Рекуперации тепловой энергии на составных кривых (рис. 5) на сеточной диаграмме выразится установкой двух рекуперативных теплообменных аппаратов (рис. 6). Мощность теплообменника T2 составляет  $3 \times 10^{-2}\%$  от

общего значения рекуперации тепловой энергии. Поэтому при синтезе энерготехнологической схемы его можно исключить (рис. 7).

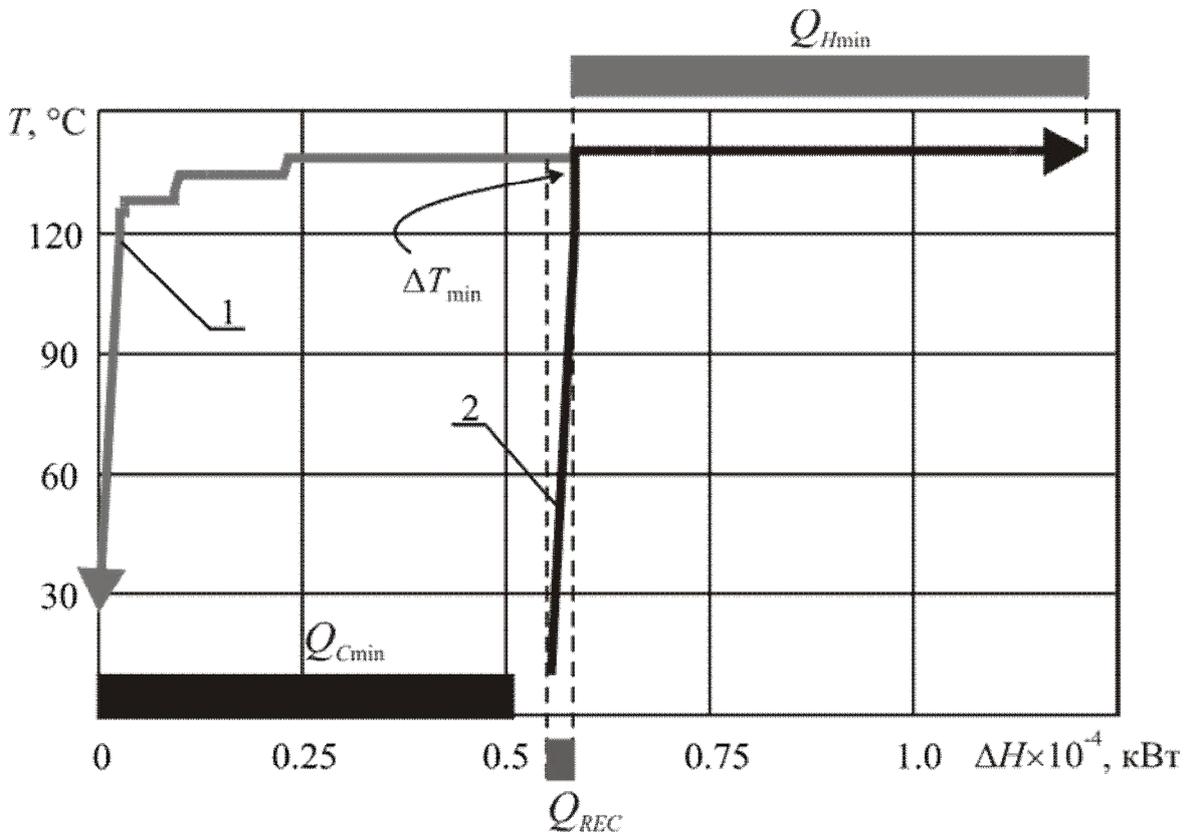


Рис. 5. Составные кривые системы теплообмена процесса очистки четыреххлористого титана с углубленной тепловой интеграцией. 1 – составная кривая горячих потоков; 2 – составная кривая холодных потоков;  $Q_{Hmin}$ ,  $Q_{Cmin}$ ,  $Q_{REC}$  – целевые значения потребляемой мощности горячих утилит, холодных утилит и мощность рекуперации.  $Q_{Hmin} = 6296.2$  кВт,  $Q_{Cmin} = 5528.1$  кВт,  $Q_{REC} \approx 293.5$  кВт,  $\Delta T_{min} = 2^\circ\text{C}$

Оценка площади поверхности теплообменного аппарата T1 дает значение  $\sim 10 \text{ м}^2$ . Минимальная разность температур между теплоносителями на этом теплообменнике равна  $20^\circ\text{C}$ , а такая разность температур достижима на кожухотрубчатых аппаратах. Поэтому для оценки капложений и срока окупаемости предполагаем, что на размещении T1 будет установлен кожухотрубчатый теплообменный аппарат. Стоимость такого аппарата согласно (1) будет равна 48000 долл. США. Следовательно срок окупаемости проекта пинч-интеграции будет равен 2 месяцам.

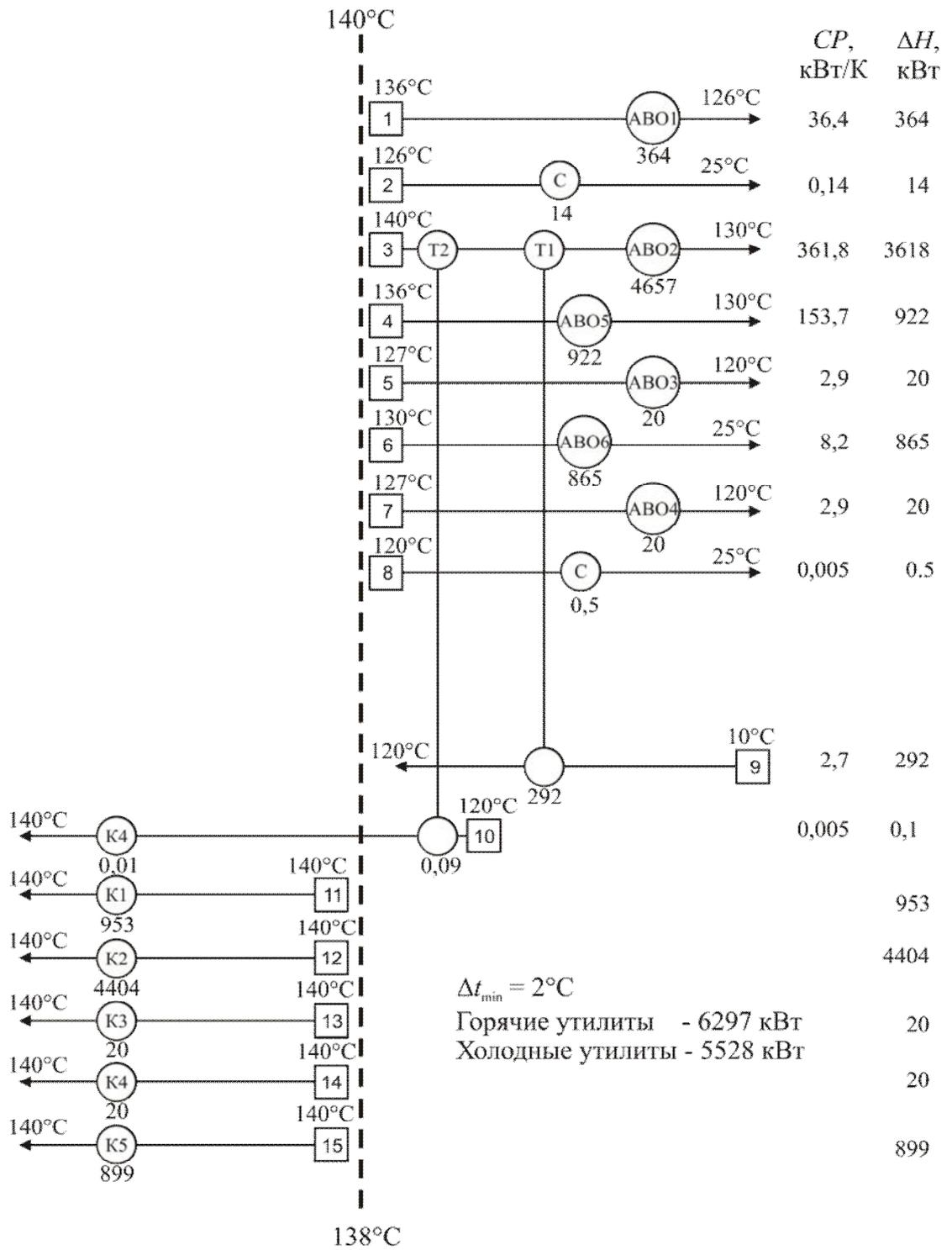


Рис. 6. Сеточная диаграмма традиционного пинч-проекта системы теплообмена.  $Q_{H\min} = 6296.2$  кВт,  $Q_{C\min} = 5528.1$  кВт,  $Q_{REC} \approx 293.5$  кВт,  $\Delta T_{\min} = 2^{\circ}\text{C}$ .

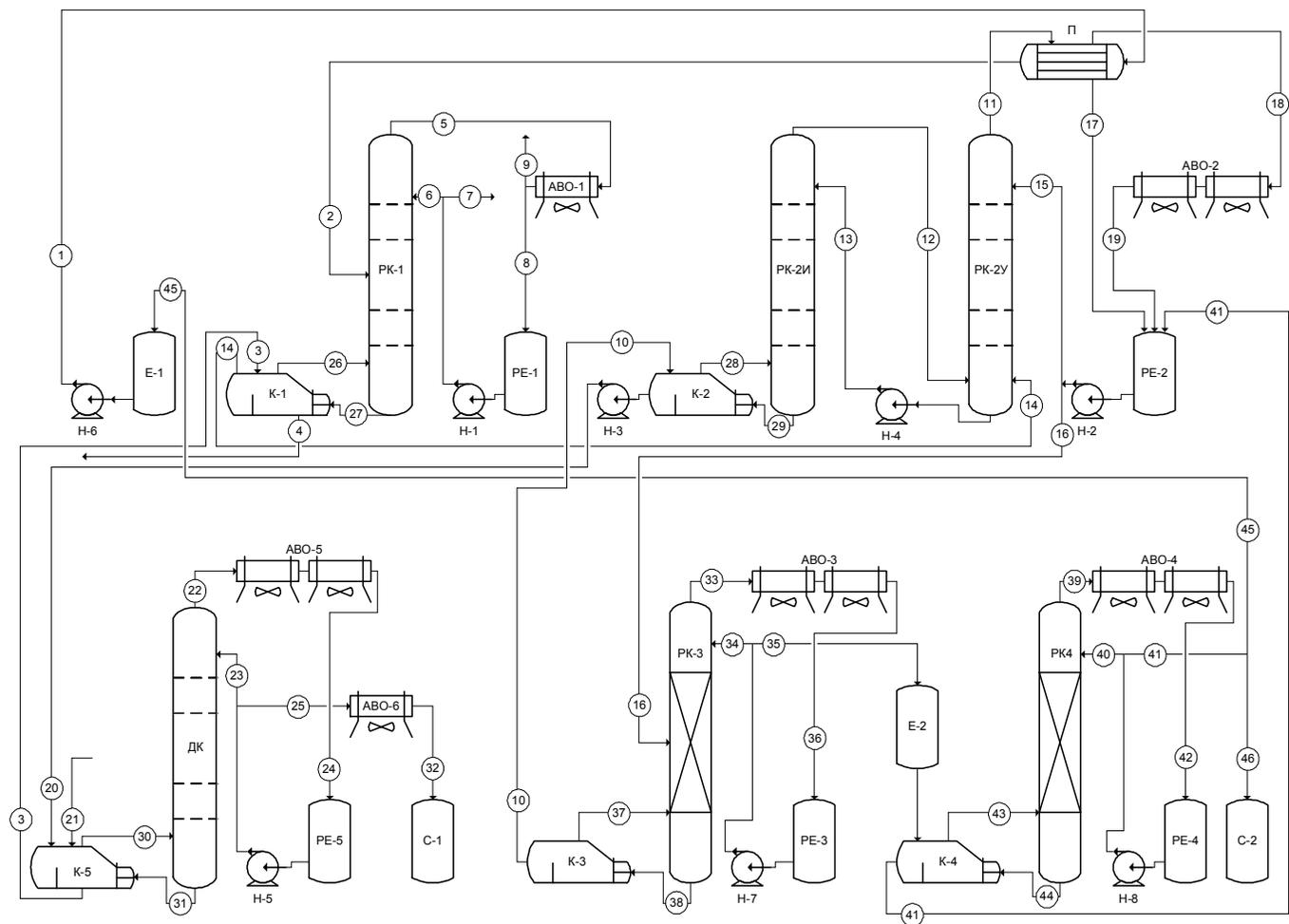


Рис. 7. Интегрированная принципиальная энерготехнологическая схема процесса очистки тетрахлорида титана. Е-1,2 – емкость; С-1,2 – сборник; Н-1-8 – насос; К-1-5 – электрический подогреватель куба; РК-1,3,4 – ректификационная колонна; ДК – дистилляционная колонна; РК-2И, РК-2У – ректификационные колонны – исчерпывающая и укрепляющая (разрезная колонна); П – теплообменник; АВО-1-5 – аппарат воздушного охлаждения; РЕ-1-5 – рефлюксная емкость.

## **Выводы**

Определены технологические потоки, которые могут участвовать в теплоэнергетической интеграции процесса очистки четыреххлористого титана методом ректификации с одновременным получением оксотрихлорида ванадия, и найдены их технологические параметры.

С помощью аппарата составных кривых определен энергосберегающий пинч-потенциал процесса и целевые энергетические значения. В денежном выражении потенциал составляет величину годовой прибыли ~ 300 тыс. долл. США в год.

Синтезирована энерготехнологическая схема интегрированного процесса, в которой достигаются целевые значения. Срок окупаемости при внедрении интегрированной энерготехнологической схемы равен  $\approx 2$  месяца.

**Список литературы:** 1. Байбаков М.К. Производство четыреххлористого титана / М.К. Байбаков, В.Д. Попов, И.М. Чепресов. – М.: Metallurgy, 1987. – 128 с. 2. 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. 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. Войтович Б.А. Физико-химические основы разделения продуктов хлорирования титаносодержащих материалов / Б.А. Войтович, А.С. Барабанова. – К.: Наукова думка, 1969. – 608 с. 5. Крамник В.Ю. Metallurgy титана / В.Ю. Крамник. – М.: Metallurgy, 1968. – 480 с. 6. Ульев Л.М. Определение энергосберегающего потенциала разделения ШФЛУ на центральной газофракционирующей установке / Л.М. Ульев, С.А. Болдырев, Е.В. Поливода // ВІСНИК Національного технічного університету «ХПІ». – 2009, Випуск 40. – С. 21–32. 7. Ульев Л.М. Пинч-диагностика и моделирование процесса разделения широкой фракции легких углеводородов / Л.М. Ульев, Е.В. Поливода – Інтегровані технології та енергозбереження. – 2010, – № 4. – С. 34 – 40. 8. Ульев Л.М. Энергосберегающий потенциал процесса гидроочистки на установке каталитического риформинга / Л.М. Ульев, Д.Д. Нечипоренко // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2011, – № 2. – С. 20 – 28. 9. Ульев Л.М. Визначення потенціалу енергозбереження і значення кількості шкідливих викидів установки первинної переробки нафти / Л.М. Ульев, Л.О. Мельниковська

// Вісник Харківського університету імені В.Н. Каразіна. Сер.: Екологія. – 2011. – № 944. Вип. 6.– С. 103–111. **10.** Ульєв Л.М. Теплоенергетическая интеграция блока гидроочистки сырья установки Л-35-11/600 / Л.М. Ульєв, Д.Д. Нечипоренко // Интегровані технології та енергозбереження. – 2011, – № 3. – С. 3–7. **11.** Ульєв Л.М. Економічно обґрунтована теплова інтеграція процесу очищення коксового газу від бензольних вуглеводнів / Л.М. Ульєв, С.О. Болдирєв, М.А. Васильєв – Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів». – Харків: НТУ «ХПІ» – 2011. – № 21. – С. 125–132. **12.** Ульєв Л.М. Определение энергосберегающего потенциала для процесса очистки целевого продукта при производстве пигментной двуокиси титана / Л.М. Ульєв, А.А. Ковальчук // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів». – Харків: НТУ «ХПІ» – 2012. – № 10. – С. 106–115. **13.** Сивак В.В. Экстракция данных для теплоэнергетической интеграции процесса очистки четыреххлористого титана методом ректификации / В.В. Сивак, Л.М. Ульєв, А.Н. Сулима. // Интегровані технології та енергозбереження. – 2011, – № 3. – С. 15–19. **14.** Музгин В.Н. Аналитическая химия ванадия / В.Н. Музгин, Л.Б. Хамзина, В.Л. Золотавин, И.Я. Безруков. // М.: Наука, – 1981. – 870 с. **15.** Гармата В.А. Титан: Свойства, сырьевая база, физико-химические основы и способы получения / В.А. Гармата, А.Н. Петрунько, Н.В. Галицкий. // М.: Металлургия, 1983. – 558 с. **16.** Основы интеграции тепловых процессов / [Смит Р., Товажнянский Л.Л., Клемеш Й., Капустенко П.А., Ульєв Л.М.]. – Х.: ХГПУ. 2000. – 457 с. **17.** Smith R. Chemical Process Design and Integration / R. Smith – Chichester: John Wiley & Sons Ltd. – 2005. – 688 p. **18.** Kemp I.C. Pinch Analysis and Process Integration / I.C. Kemp – Oxford. Elsevier. – 2007. – 396 p. **19.** Альтернативная энергетика и энергосбережение: современное состояние и перспективы / [Капустенко П.А., Кузин А.К., Макаровский Е.Л., Товажнянский Л.Л., Ульєв Л.М., Черная Е.Б.]. – Харьков. ООО Издательский дом «Вокруг цвета». – 2004. – 312 с. **20.** Nordman R. New process integration methods for heat – saving retrofit projects in industrial systems / R. Nordman – Chalmers University of Technology. Goteborg, Sweden. – 2005. – 77 p.

Поступила в редколлегию 24.07.12