

УДК 66.045.1:65.011

Л. М. УЛЬЕВ, д-р техн. наук, профессор

А. А. КОВАЛЬЧУК, аспирант

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт",
г. Харьков

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ ПОТЕНЦИАЛ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА И ОЧИСТКИ ДВУОКИСИ ТИТАНА

В результате обследования цеха по производству и очистке двуокиси титана были определены экономический и энергетический потенциал энергосбережения. Добиться этого удалось путем пинч-интеграции процессов предприятия и подбором оптимальной пинч-температуры между холодной и горячей составными кривыми, что позволяет уменьшить энергопотребление в цехе до 3,6 МВт.

У результаті обстеження цеху з виробництва та очищення двоокису титану були виявлені економічний та енергетичний потенціал енергозбереження. Досягти цього вдалося шляхом пінч-інтеграції процесів підприємства і підбором оптимальної пінч-температури між холодною та гарячою складовими кривими, що дозволяє зменшити енергоспоживання у цеху до 3,6 МВт.

Постановка проблемы

Несмотря на то, что в Украине приняты и действуют Законы "Об энергосбережении", целый ряд ГОСТов в области энерго- и ресурсоиспользования, работает Государственный Комитет по энергосбережению, в стране сохраняется тенденция к росту энергоемкости продукции. Спрос на энергетические ресурсы постоянно растет, вместе с тем повышаются тарифы на них, сокращаются запасы полезных ископаемых (нефть, газ, уголь), ухудшается экология страны – все это придает особенное значение энергосбережению.

Запасов нефти и газа в Украине не достаточно, а увеличение объемов добычи углеводородов и развитие транспортной инфраструктуры требуют значительных инвестиций. Многие страны ведут разработку и реализацию программ по повышению эффективности в использовании энерго-ресурсов. Если не остановить увеличение энергопотребления, то рост издержек, сопровождаемый финансовыми потерями, будет задерживать обновление базы производства предприятия, что необходимо для развития производства. Для того чтобы предотвратить этот процесс необходимо не только провести мероприятия по энергосбережению на предприятии, но и вести постоянные разработки, обновление и совершенствование методов энергоаудита, оценки результативности и качества программ по энергосбережению, необходимо чтобы эти программы учитывали многовариантность использования инвестиционных источников, которые предназначены для их осуществления.

Анализ исследований и публикаций

Экономический кризис, усугубляющийся в Украине постоянным подорожанием энергоносителей, заставляет представителей все большего количества отраслей задуматься о внедрении энергосберегающих технологий. Сокращение потребления топливно-энергетических ресурсов в промышленности сопряжено с широкомасштабной реализацией современных энергосберегающих технологий, созданием высокоэффективных энерготехнологических комплексов.

Литературные данные, опубликованные в различных источниках [1, 8], говорят, что применение пинч-метода позволяет добиться существенной финансовой экономии за счет минимизации использования внешних энергоносителей, как подводящих энергию, так и отводящих, путем максимального применения рекуперации теплоты в рамках рассматриваемой энерготехнологической системы.

При этом данный метод позволяет минимизировать теплообменную поверхность и количество теплообменных единиц, оптимизировать перепад давления в сети и размещение силовых установок, минимизировать количество сточных вод и эмиссию углекислого газа. В случае модернизации существующих производств пинч-технологии позволяют максимально использовать уже установленное оборудование в новых рабочих сетях, что снижает инвестиции в реконструкцию. Более того, методами пинч-анализа возможно определить стоимостный компромисс между всеми названными факторами и капитальными вложениями при заданном сроке окупаемости, которому и должен удовлетворять окончательный проект.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

За последние годы для Украины вопросы повышения эффективности энергопотребления, реализации политики энергосбережения, создания и совершенствования энергорынка и повышения эффективности функционирования энергетики в целом приобрели особую актуальность. В отличие от стран Запада, где энергосбережение является элементом экономической и экологической целесообразности. Для экономики современной Украины характерна крайне низкая эффективность использования энергетических ресурсов. Это связано с тем, что все предприятия строились во времена относительно дешёвых энергоносителей, а постоянное их удорожание, связанное с грядущим их полным исчерпанием, не вызывает сомнения в необходимости их рационального использования. Особенно в столь энергоемкой отрасли, как химическая промышленность. В будущем необходимо решить проблемы нерационального использования энергоносителей. Это, в свою очередь даст, возможность снизить потребление энергии на единицу выпускаемой продукции, и тем самым оказать положительное влияние на окружающую среду и здоровье человека за счет снижения выброса вредных газов, образующихся при сжигании энергоносителей.

Формулировка целей статьи

Применяя пинч-метод добиться существенной финансовой экономии за счет минимизации использования внешних энергоносителей, как подводящих энергию, так и отводящих, путем максимального применения рекуперации теплоты в рамках рассматриваемой энерготехнологической системы.

Показать эффективность пинч-метода в области сбережения энергии и его удобство при проектировании систем теплообмена. Привести данные об экономическом эффекте от применения пинч-анализа в процессе производства и очистки двуокиси титана.

Основной материал исследования

Цех производства пигментной двуокиси титана введен в эксплуатацию в 1963 году с проектной мощностью 20 тыс. тонн пигмента в год.

Технология синтеза двуокиси титана основана на сернокислотном способе производства. Обследуемый процесс, включает в себя получение компонентов для производства красок, бумаги, полимерных материалов, резины, химических волокон и т. п. продуктов. Во время проведения энергоаудита предприятие работало в обычном режиме.

Цех производства двуокиси титана состоит из таких участков [4]:

1. Сушка и размол ильменитового концентрата;
2. Разложение ильменитового концентрата серной кислотой;
3. Восстановление железа в растворе сульфата титана;
4. Очистка от шлама раствора сульфата титана;
5. Вакуум-кристаллизация и выделение на центрифугах железного купороса из суспензии сульфата титана;
6. Вакуум-выпарка раствора сульфата титана;
7. Гидролиз, приготовление зародышей анатаза;
8. Приготовление рутильных зародышей;

9. Фильтрация ГДТ (гидратированный диоксид титана), отбелка и солеобработка (сульфирование);
10. Прокалка двуокиси титана и газоочистка;
11. Сухой размол двуокиси титана;
12. Мокрый размол, классификация, поверхностная обработка, фильтрация;
13. Сушка, микронизированный размол и упаковка;
14. Складирование и отгрузка двуокиси титана.

Ниже, на рис. 1а и 1б, приводится принципиальная технологическая схема процесса производства (чёрное отделение) и очистки (белое отделение) двуокиси титана.

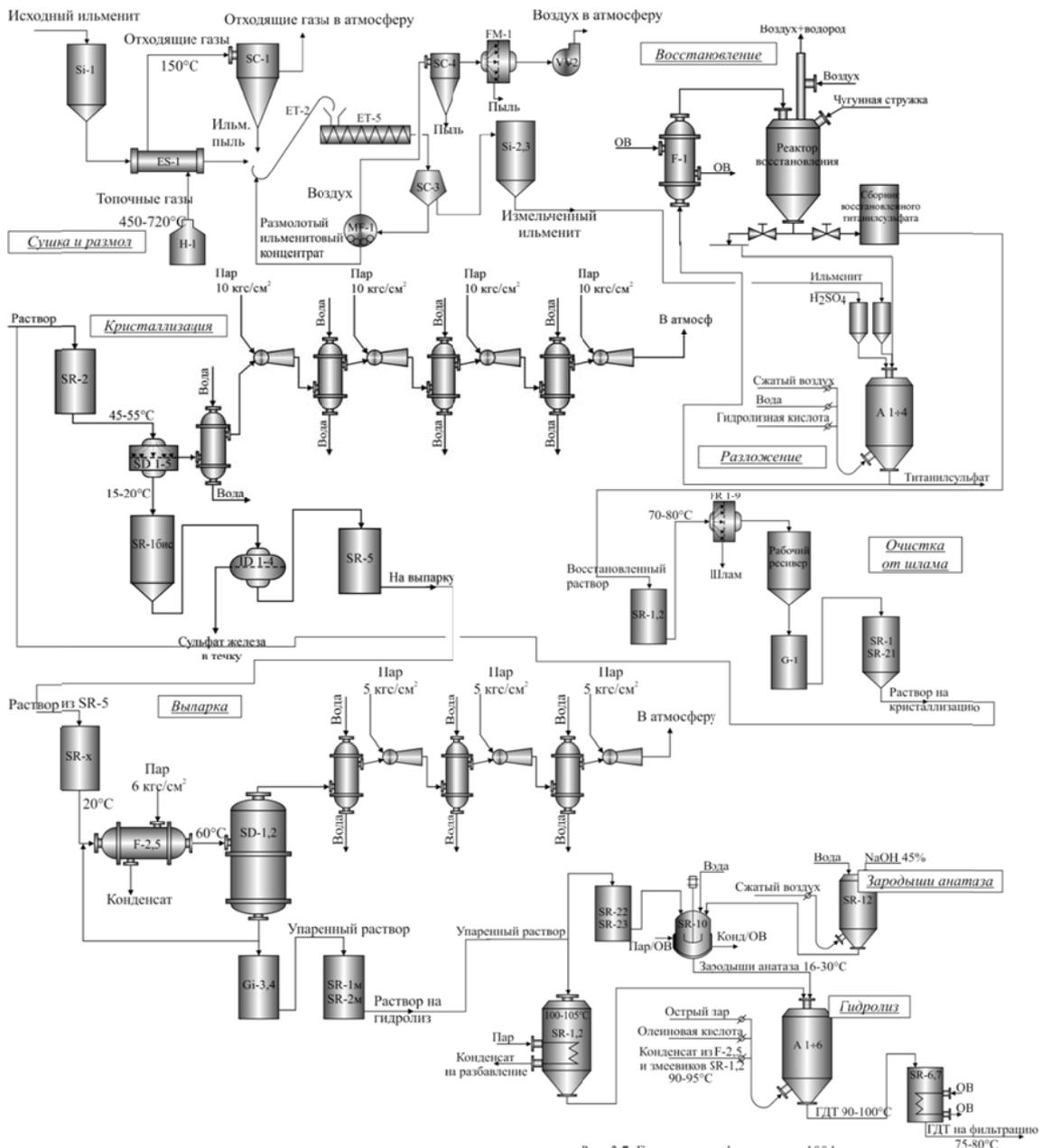


Рис. 1а. Принципиальная энерготехнологическая схема процесса производства двуокиси титана (чёрное отделение): SR-1, 2, 21-бис, А-1 – подогреватели; SR-6, 7 – охладители; А-1÷4, А 2,3, А 1,6 – реакторы; SR-3-22 – ёмкости; FR-1-4 – фильтры; Н-1-7 – шнековые прессы; F-1-6 – вакуум-фильтры; ES-1,2 – печи; TR-1,2 – вращающиеся холодильные барабаны; SC-1, 2, 7, 10, 9, 12, 8, 11 – циклоны; MF-1 – шаровые мельницы; F-1-5 – теплообменники

При использовании методов интеграции процессов и в частности метода пинч-анализа, необходимо экстрагировать расходные (потокные) данные технологических потоков.

Чем больше технологических потоков будет включено в обследование, тем выше будет значение определенного потенциала энергосбережения, а затем это приведет к тому, что при разработке и реализации пинч-проекта реконструкции теплоэнергетической системы предприятия, на большую величину уменьшится удельное энергопотребление при производстве конечной товарной продукции данного предприятия [2].

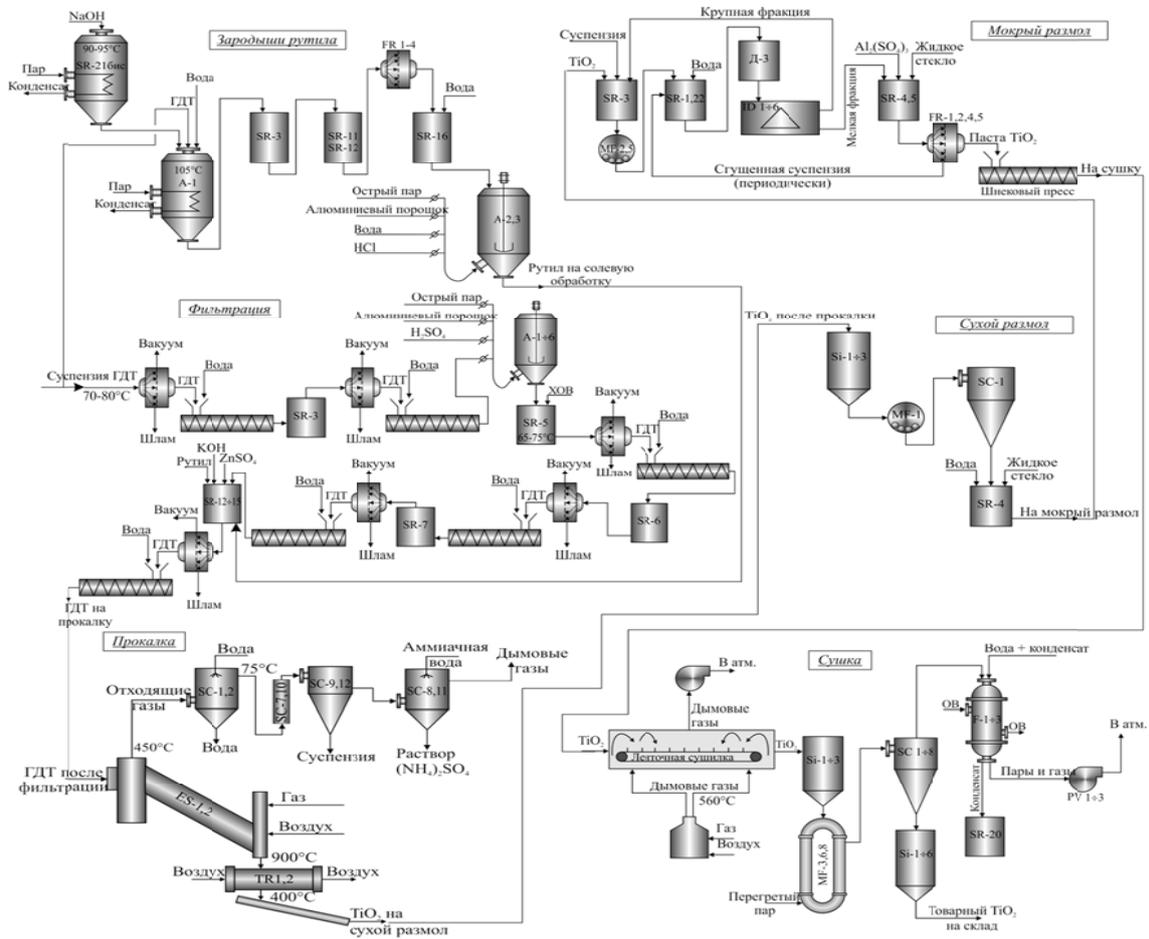


Рис. 16. Принципиальная энерготехнологическая схема процесса очистки двуокиси титана (белое отделение): SR-1, 2, 21-бис, A-1 – подогреватели; SR-6,7 – охладители; A-1÷6, A 2,3, A 1,6 – реакторы; SR-3-22 – ёмкости; FR-1-5 – фильтры; Н-1-7 – шнековые прессы; F-1-6 – вакуум-фильтры; ES-1,2 – печи; TR-1,2 – вращающиеся холодильные барабаны; SC-1, 2, 7, 10, 9, 12, 8, 11 – циклоны; MF-1, 2, 5 – шаровые мельницы; F-1-3 – теплообменники; P-1 – сушилка; К-1 – печь

Потребление пара и охлаждающей воды в цехе по производству и очистке двуокиси титана представлены в табл. 1.

Видно, что для проведения процессов при получении двуокиси титана необходимо обеспечить тепловой поток к холодным технологическим потокам цеха равный величине – 11756 кВт. Вся эта мощность потребляется от утилитной системы предприятия.

Определим количество газа и его стоимость, необходимого для обеспечения проведения технологического процесса.

Таблица 1

Энергетическая мощность основных потребителей пара и охлаждающей воды на предприятии

№	Потребители пара и воды	Количество, т/ч	Количество, кВт
1	Мельница, Гидролиз, Рутил, Отбелка, Анатаз, Выпарка, Эжекторы выпарки, Эжекторы кристаллизаторов	17,44	11 756
2	Охладители	647	19 977

Зная полезную нагрузку горячих и холодных утилит можно определить годовые затраты на проведение процесса. Действительно, полезная нагрузка горячих утилит составляет величину $Q_{Hmin} = 11756$ кВт и если считать теплоту сгорания природного газа, равной $33\,500$ кДж/м³, то в течение года полезная нагрузка в эквивалентном газовом отношении будет составлять – $14\,438\,073$ м³ природного газа. Средняя стоимость природного газа для промышленных предприятий Украины, равна 345 долл. США за 1000 м³ природного газа. Тогда годовая стоимость полезной нагрузки на горячие утилиты равна – $4\,055\,820$ долл. США [3].

Учитывая, что удельная цена холодных утилит, как правило, составляет 10 % от цены горячих утилит [2], следовательно, стоимость природного газа сжигаемого для создания полезной нагрузки на холодные утилиты, равной в рассматриваемом случае $Q_{Cmin} = 19\,977$ кВт будет равна – $689\,207$ долл. США. Следовательно, общая годовая стоимость газа, с учетом к.п.д. для горячих утилит, идущего на проведение процесса, равна – $5\,794\,029$ долл. США.

В итоге на полезную нагрузку процесса в течение года расходуется – $6\,483\,236$ долл. США.

Рассмотрим потоковые данные, экстрагированные из технологических процессов предприятия, и анализировать мы их будем с помощью методов интеграции процессов.

Заметим, что во время обследования теплоэнергетической системы технологических процессов нагрев потоков осуществлялся только за счёт пара, а охлаждение соответственно за счёт охлаждающей воды. Сократить расход пара и воды можно, но для этого сначала необходимо провести проектирование теплообменных сетей и процессов на предприятии.

Обследование технологических процессов на предприятии позволило определить двадцать шесть технологических потоков, которые могут быть включены в теплоэнергетическую интеграцию, свойства которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Данные технологических потоков, использующиеся для определения энергосберегающего потенциала

№	Название потока	Тип	TS, °C	TT, °C	G, т/ч	CP, кВт/К	ΔH, кВт
1	Машинное масло	гор	40	37	2,10	1,02	3,06
2	Охлаждение реактора разложения	гор	150	70	18,57	6,37	510
3	Охлаждение конденсата	гор	100	30	1,27	11,90	836
4	Титанилсульфат на восстановление	гор	65	54	37,16	30,96	341
	Титанилсульфат на восстановление	гор	73	58	37,16	30,96	464
5	Конденсат паров кристаллизации	гор	150	34	5,59	34,82	4039
6	Кондесат паров выпарки	гор	130	68	8,70	94,81	5878
7	Раствор после гидролиза	гор	100	85	25,66	28,42	426
8	Суспензии на пептизации	гор	102	70	2,50	2,77	89
9	Отходящие газы прокалки	гор	450	120	22,98	8,08	2666
10	TiO2 после прокалки	гор	120	50	2,53	0,61	44

Продолжение таблицы 2							
11	Отходящие газы сушки	гор	200	120	8,68	3,28	262
12	Конденсат пароструйных мельниц	гор	112	78	3,00	58,00	1972
13	Охлаждение конденсата	гор	106	40	3,50	30,08	2447
14	Суспензия на выпарку	хол	20	60	28,66	23,88	955
15	Раствор на гидролиз	хол	60	100	23,25	25,74	1030
16	Раствор в гидролизере (А 1-6)	хол	100	106	29,16	395,00	2370
17	Нагрев NaOH	хол	20	95	0,04	0,05	3,5
18	Нагрев ГДТ в А-1 (рутил)	хол	20	78	0,55	0,61	36
19	Нагрев ГДТ + NaOH в А-1 (рутил)	хол	78	105	0,60	0,66	18
20	Нагрев ГДТ в пептизаторах	хол	20	102	0,60	0,66	54
21	Отбелка	хол	30	90	13,75	10,74	644
22	Прокалка TiO ₂ (нагрев пасты)	хол	30	100	6,78	5,29	370
23	Воздух на прокалку	хол	120	1100	17,44	5,18	5076
24	Сушка TiO ₂ (нагрев пасты)	хол	30	100	5,03	3,92	275
25	Воздух на сушку	хол	30	560	5,82	1,73	916
26	Раствор на зародыши анатаза	хол	40	60	0,63	0,42	8

Задачей проектирования является организация теплообмена между горячими (которые необходимо охладить) и холодными (которые необходимо нагреть) потоками между собой, а также с внешними энергоносителями с целью минимизации годовых затрат предприятия, кроме того выбранный проект должен быть безопасным, управляемым и удовлетворять экологическим требованиям [2]. Параллельно определяются: оптимальные параметры процесса, срок окупаемости, капитальные вложения, а также ежегодная прибыль. На основании полученных результатов делается вывод, о целесообразности реконструкции предприятия. Ведь если затраты окажутся большими, ежегодная прибыль маленькой и срок окупаемости больше 5 лет, то инвесторы не захотят вкладывать деньги в такой проект. Сначала определяется, какое количество тепла можно забрать у горячих потоков и подвести к холодным потокам для их нагрева, иначе говоря, определим энергосберегающий потенциал [8].

Используя технологические данные из табл. 2, построим на энтальпийно-температурной диаграмме горячую и холодную составные кривые выбранной системы технологических потоков без рекуперации процесса [5]. Составные кривые показаны на рис. 2.

На рис. 2 видно, для того чтобы нагреть исходный поток до целевой температуры нужно подвести к потоку тепловую энергию, равную – 11 756 кВт и соответственно для охлаждения горячих потоков отвести тепловую энергию, равную – 19 977 кВт. Для этого предприятие каждый год тратит – 6 483 236 долл. США, из них – 5 794 029 долл. США на горячие утилиты и – 689 207 долл. США на холодные утилиты. Так как энергоносители с каждым годом дорожают и их количество на земле уменьшается, то появилась необходимость сокращать потребление энергоносителей. Достичь этого удалось благодаря интеграции процесса. Составные кривые показывают значения тепловой мощности, которую возможно отвести от системы горячих потоков – 19 977 кВт и мощности, которую необходимо подвести к холодным потокам – 11 756 кВт для выполнения процессов рекуперации.

Как правило, при выполнении проектов пинч-реконструкции промышленных предприятий, в теплоэнергетической системе присутствует рекуперация тепловой энергии, пусть не оптимальная, но рекуперация уже существует.

Если концепция интеграции при проектировании не была заложена, то возможность теплоэнергетической связи между потоками должна быть рассмотрена совместно с интеграцией при составлении пинч-проекта [5, 7].

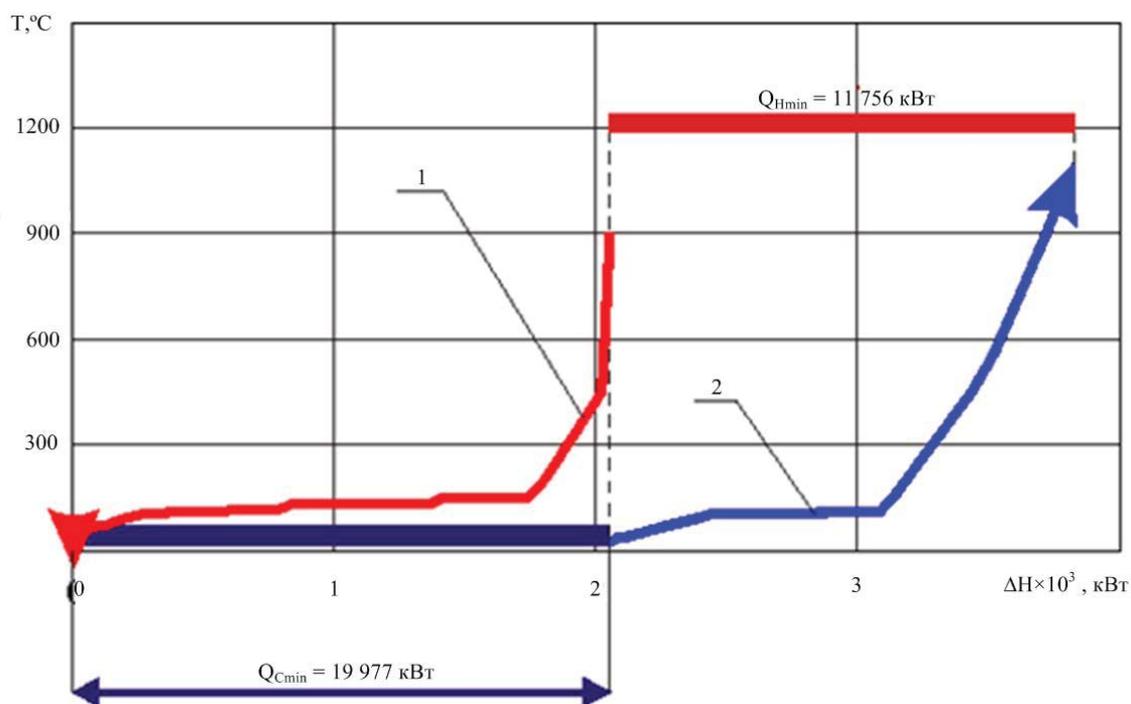


Рис. 2. Составные кривые процесса производства двуоксида титана для существующей в настоящее время теплоэнергетической системы: 1 – составная кривая горячих потоков; 2 – составная кривая холодных потоков; Q_{Hmin} , Q_{Cmin} – потребление мощности от горячих и холодных утилит

Используя потоковые данные построим на рис. 3, составные кривые процесса с минимальной разницей температур, между горячей и холодной кривой, $\Delta T_{min}=10^\circ\text{C}$.

Работая с составными кривыми технологических потоков, мы уже видели, что они заключают в себе большой объем информации об энергопотреблении в рассматриваемом процессе.

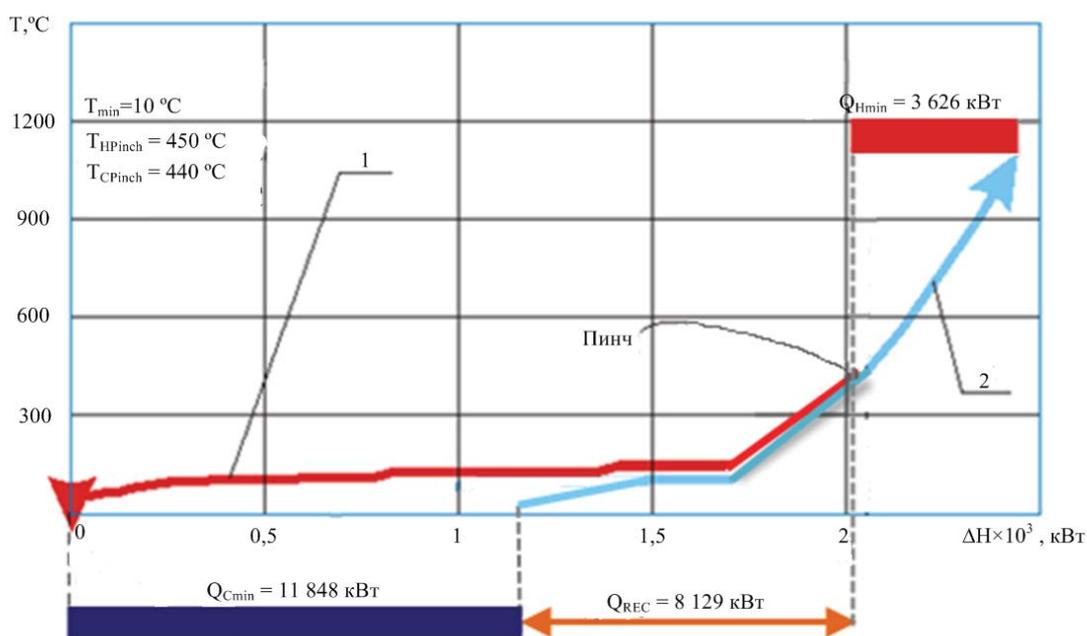


Рис. 3. Составные кривые процесса производства двуоксида титана для существующей теплоэнергетической системы при $\Delta T_{min}=10^\circ\text{C}$: 1 – составная кривая горячих потоков; 2 – составная кривая холодных потоков; $Q_{Hmin} = 3\,626\text{ кВт}$ – мощность горячих утилит; $Q_{Cmin} = 11\,848\text{ кВт}$ – мощность холодных утилит; $Q_{REC} = 8\,129\text{ кВт}$ – мощность рекуперации

При $\Delta T_{\min}=10$ °С верхняя температура пинча определяется значением $T_{HPinch} = 450$ °С, а нижняя $T_{CPinch} = 440$ °С. Мощность горячих утилит в этом случае равна $Q_{Hmin} = 3\ 626$ кВт, мощность холодных $Q_{Cmin} = 11\ 848$ кВт.

Такое уменьшение связано с тем, что теплоэнергетическая интеграция процесса – это, прежде всего, организация системы рекуперации тепловой энергии, и составные кривые на рис. 3, предполагают систему теплообмена между холодными и горячими потоками с минимальной разностью температур между теплоносителями, равной 10 °С.

Данная система теплообмена обеспечивает мощность тепловой рекуперации, равную $Q_{REC} = 8\ 129$ кВт. Как раз на эту величину уменьшились и горячие и холодные утилиты, что позволяет определить, на какую величину сократится потребление природного газа в случае внедрения пинч-проекта реконструкции системы теплообмена [6, 7].

Если учитывать только полезную нагрузку на процесс, то потребление природного газа сократится на – 6 989 373 м³ природного газа в год. При учете к.п.д. генерации тепловой энергии потребление газа снизится на – 9 984 818 м³ в год, что в стоимостном выражении составит сумму, равную – 4 006 929 долл. США за год работы.

Годовая экономия от уменьшения величины холодных утилит будет равна сумме – 280 451 долл. США, т.е. общая экономия за счет снижения утилит, потребляемых процессом производства двуокиси титана, будет равна – 4 287 380 долл. США в год.

Принимая во внимание указанную выше стоимость горячих и холодных утилит, непосредственное проведение процесса производства и очистки двуокиси титана, в случае внедрения, обойдется предприятию в – 2 195 856 долл. США в год, вместо – 6 483 236 долл. США в год до реконструкции. Стоимость горячих утилит для проведения процесса уменьшится на ~ 70 %, а холодных на ~ 41 %. Естественно, что за все необходимо платить, и платой в нашем случае будет установка дополнительной теплообменной поверхности, т. е. капитальные затраты.

Составные кривые содержат достаточно информации для определения этих затрат еще до разработки самого проекта реконструкции теплоэнергетической системы [1, 6].

В пинч-анализе также существуют методы определения минимального количества теплообменных аппаратов и их секций. После определения количества теплообменных секций и их поверхности можно оценить стоимость их установки, а значит и общие капитальные затраты. Стоимость теплообменного оборудования выбираем в соответствии с ценами поставщиков.

Значению ΔT_{\min} можно сопоставить в соответствии приведенную капитальную стоимость и годовую стоимость энергии. При увеличении ΔT_{\min} уменьшается мощность рекуперации, увеличиваются среднелогарифмические разности температур, что ведет к уменьшению площади поверхности теплообмена и в итоге к уменьшению капитальной приведенной стоимости. В то же время стоимость потребленной энергии будет расти с увеличением ΔT_{\min} . Общая приведенная стоимость проекта теплообменной системы процесса формируется этими двумя конкурирующими величинами и в результате является немонотонной функцией ΔT_{\min} . $\Delta T_{\min opt}$ определяется минимальным значением приведенной стоимости проекта [2].

Выводы

Результатом проведенного исследования, стала таблица потоковых данных, которые в дальнейшем послужат основой для интеграции существующего процесса. Построенные составные кривые показывают, что предложенный проект по установке рекуперативной системы позволит снизить тепловую нагрузку, которую необходимо подвести к процессу, до 3,6 МВт, практически в 3,2 раза. Потребление охлаждающей воды при выполнении приведенной интеграции сократится до 11,8 МВт, практически в 1,7 раз. Что немаловажно во времена увеличения цен на энергоносители [6].

Также уменьшится выброс CO₂ при сжигании газа, необходимого для производства и очистки двуокиси титана, и уменьшится использование пресной воды необходимой для охлаждения потоков, которая уже считается дефицитом.

Основной вывод проведенного исследования заключается в том, что современная цивилизация не может развиваться традиционным путем, который характеризуется нерациональным использованием природных ресурсов, особенно энергетических, и прогрессирующей негативным воздействием современных энергетических технологий на окружающую среду, следует также учитывать мотивационный аспект решения данной проблемы.

Список литературы

1. Состояние энергоэффективности в Донецкой области [Электронный ресурс] / А. С. Киричок // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы» – 2007. – №6. – Режим доступа к публикации <http://www.esco-ecosys.narod.ru/journal/journal66.htm>.
2. Основы интеграции тепловых процессов / [Смит Р., Товажнянский Л., Клемеш Й. и др.]. – Харьков: ХГПУ, 2000. – 457 с.
3. Мешалкин В. П. Основы теории ресурсосберегающих интегрированных химико-технологических систем / В. П. Мешалкин, Л. Л.Товажнянский, П. А. Капустенко – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – 412 с.
4. Хазин Л. Г. Двуокись титана / Л. Г. Хазин – Л.: Химия, 1970. – 176 с.
5. Построение составных кривых технологических процессов для определения энергетической эффективности предприятий : сб. науч. работ по материалам междунаучно-техн. конф. «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье», microCAD'96. Ч. 1 / [Товажнянский Л. Л., Капустенко П. А., Ульев Л. М. и др.]. – Харьков: Вестник, – 1996. – 179 с.
6. Алгоритм построения составных кривых технологических процессов для определения энергетической эффективности предприятий / [Товажнянский Л. Л., Капустенко П. А., Ульев Л. М., Зулин Б. Д.] // Междунар. конф. « Математические методы в химии и химической технологии», ММХ-10. Тезисы докладов. – Тула. – 1996. – С. 74–75.
7. Linnhoff В. The pinch design method for heat exchanger networks / В. Linnhoff, E. Hindmarsh // Chem. Engng. Sci. – 1983. – Vol. 38. – P. 745–763.
8. Альтернативная энергетика и энергосбережение: современное состояние и перспективы / [Капустенко П. А., Кузин А. К., Макаровский Е. Л., ТОВАЖНЯНСКИЙ Л. Л., УЛЬЕВ Л. М. и др.]. – Харьков: ООО Издательский дом «Вокруг света», – 2004. – 312 с.

ENERGY SAVING POTENTIAL OF TITANIUM DIOXIDE PRODUCTION AND REFINING

L. M. ULYEV, Dr. Scie. Tech., Pf.
A. A. KOVALCHUK, graduate student

Based on the results of the inspection of the titanium dioxide production and refining facility, power engineering and economic energy saving potentials were determined. This achievement was reached by pinch integration of processes of the enterprise and selection of the optimal pinch temperature between cold and hot compound curves that gives a possibility to reduce power consumption in the facility to 3.6 MW.

Поступила в редакцию 05.12 2012 г.