

УДК 621:664(076)

Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М., Болдырев С.А.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ПОТЕНЦИАЛА НА ДЕЙСТВУЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ ПРОИЗВОДСТВА ЖИРОВ

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

Введение

В промышленно развитых странах, вот уже более 20 лет, развиваются и используются энергосберегающие методы интеграции процессов. В промышленности Украины, по различным причинам, системные энергосберегающие методы не применялись, и поэтому удельное энергопотребление здесь в 3–5 раз больше, чем у западных компаний. Пищевая промышленность Украины не является исключением.

Наиболее энергоемкой отраслью пищевой промышленности является масложировая отрасль, на долю которой приходится около 13 % общего объема реализуемой продукции всей пищевой промышленности. Прежде всего, к энергоемким предприятиям масложировой отрасли относятся жировые комбинаты, на которых сосредоточены все технологические линии производства продукции, от приема исходного сырья с железнодорожных цистерн и до отгрузки расфасованной и упакованной коммерческой продукции. Поэтому для увеличения конкурентоспособности отечественных предприятий, и это особенно важно при вхождении Украины во Всемирную торговую организацию, необходимо срочно снижать удельное энергопотребление в промышленности страны.

Экстракция потоковых данных

Обследуемый жиркомбинат был спроектирован и введен в эксплуатацию в 30-х годах прошлого века. Во время проведения энергоаудита на комбинате работали восемь основных технических подразделений и ряд вспомогательных служб. В их число входят маслосливная станция и участок хранения масел и жиров, цех рафинации, участок получения водорода (гидролизерная), участок очистки сточных вод и соапстоков, цеха производства маргарина и майонеза, склады готовой продукции. К отдельному подразделению завода относится и утилитная система, выполняющая функцию снабжения предприятия горячими и холодными утилитами, а также электроэнергией.

Утилитная система включает в себя: котельную, систему пароснабжения и горячего водоснабжения процессов и отопительную систему, электрическую подстанцию и станцию водоснабжения со скважиной, а также систему обеспечения холодом технологических процессов и складов готовой продукции, т.е. аммиачно-компрессорную станцию.

Масло на завод поступает в цистернах, из которых на маслосливной станции сливается и перекачивается в стальные резервуары. Если необходимо, используется размыв застывшего масла в цистернах с помощью горячей струи. Девять резервуаров для хранения масла установлены на специально оборудованной открытой площадке. Масло в резервуарах подогревается мятым паром. Далее масло поступает в цех рафинации (рис. 1).

Рафинация объединяет процессы, основное назначение которых удаление из исходного жира сопутствующих ему веществ и примесей, затрудняющих процесс гидрогенизации и ухудшающих товарное качество саломаса.

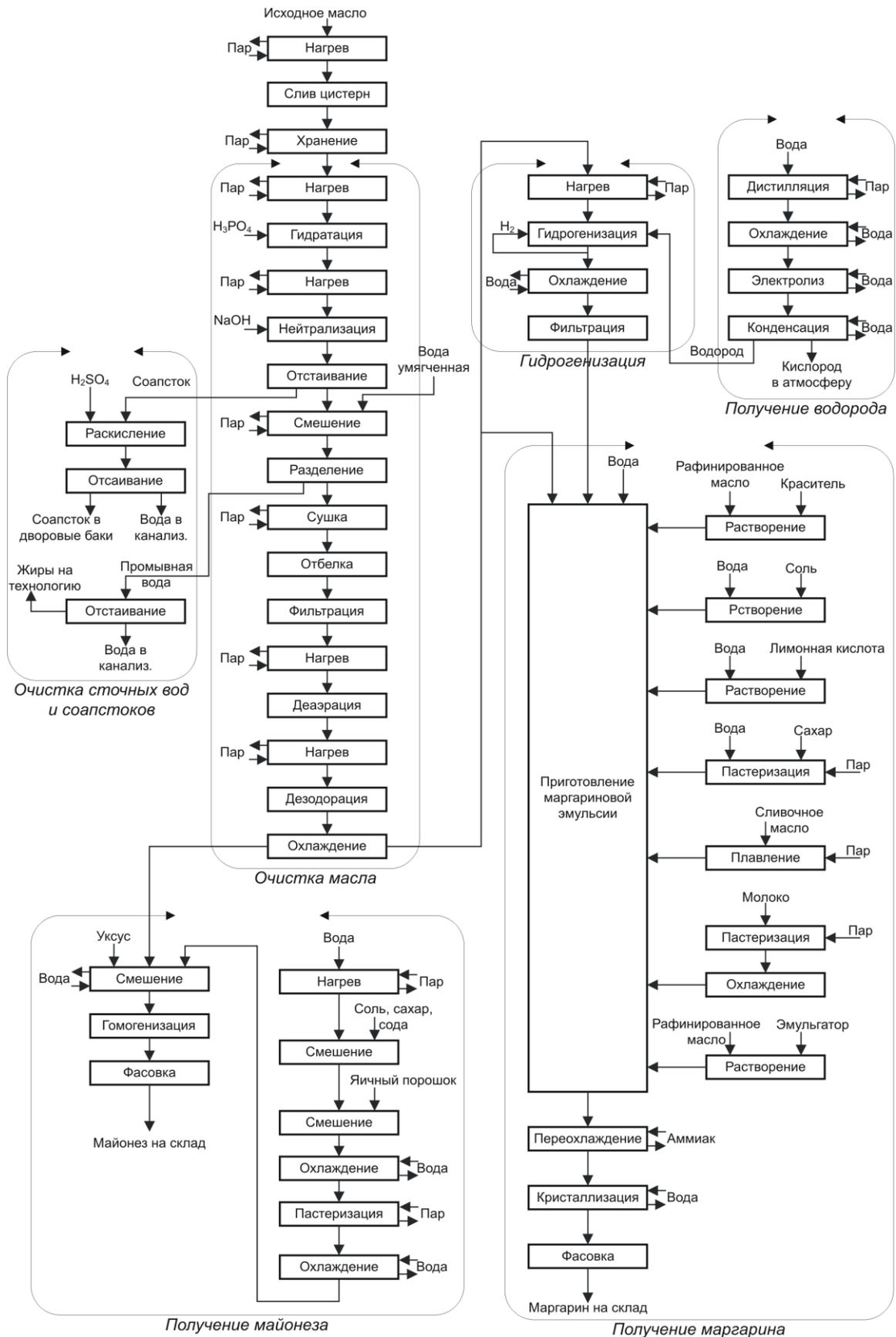


Рисунок 1 – Структурная схема жиркомбината, детализированная на основные технологические операции

Рафинация включает в себя следующие процессы: гидратацию для удаления фосфатов, щелочную рафинацию для удаления жирных кислот и отбеливание для удаления красящих веществ, удаление одорирующих веществ.

Далее очищенное масло поступает в отделение гидрогенизации (рис. 1). Гидрогенизация состоит из ряда технологических процессов и операций, включающих подготовку маслянистой суспензии катализатора, получение и подготовку водорода; непрерывное или периодическое гидрирование в батарее из автоклавов, отделение катализатора от гидрированного жира или саломаса. Затем полученный саломас поступает в хранилище. Из хранилища саломас подается в емкости маргаринового цеха.

Производство маргарина включает процессы подготовительного отделения: пастеризацию молока и раствора сахара. Затем саломас, растительное масло, сливочное масло, молоко, растворы лимонной кислоты, соли, сахара, красителя, эмульгатора подают в смеситель. После смешения однородная масса поступает на вентораторы и кристаллизаторы, где проходит ее медленная кристаллизация. На выходе из кристаллизаторов эмульсия представляет собой готовый продукт, который фасуется и отправляется на склад.

Очищенное масло также используется при производстве майонеза. Для производства майонеза в емкость набирают рассчитанное количество воды и подогревают ее до 30–40 °С. Затем воду подают в аппарат с мешалкой и добавляют сухое молоко, соль, сахар и соду. Полученную смесь нагревают до 90–95 °С и пастеризуют 20–25 минут. Нагрев ведут подачей пара в рубашку аппарата. После пастеризации смесь подают в другой смеситель и охлаждают водой до 60–65 °С, после чего добавляют яичный порошок. При постоянном перемешивании и температуре 60–65 °С снова проводят пастеризацию. Пастеризованную пасту охлаждают до 30–35 °С и подают в смесители для получения грубой эмульсии. В эти же смесители подается рафинированное масло и уксусная кислота. При постоянном перемешивании грубую эмульсию охлаждают водой до 20–25 °С. Охлажденную грубую эмульсию подают в гомогенизатор. Из гомогенизатора готовый майонез передают на фасовку и затем на склад готовой продукции.

При выполнении теплоэнергетической интеграции процессов на жиркомбинате нельзя не заметить то, что один из технологических потоков обладает некоторым дуализмом в смысле его интеграции. Действительно, поток пара высокого давления на парожекторные блоки можно рассматривать как исключительно технологический поток, с помощью которого создается вакуум в технологических аппаратах. И, в то же время, этот поток создается в утилитной системе завода за счет сжигания природного газа в котлах, т.е. его можно рассматривать как горячую утилиту, а не как технологическую нагрузку на утилитную систему. Ниже мы остановимся на этом подробнее.

Из результатов измерения расходов оборотной воды на всех секциях парожекторных блоков и ее измерений температуры до и после блоков было рассчитано потребление пара высокого давления на этих блоках.

С помощью аналогичных измерений было определено потребление пара технологическими процессами в цехах завода (таблица 1).

Итак, мы видим, что основные потребители тепловой энергии используют 11.7 тонны пара в час, что эквивалентно их общей мощности, равной ~ 8572.16 кВт. Это значит, что от утилитной системы в течение года потребляется ~ 64 500 Гкал. Если принять во внимание, что к.п.д. утилитной системы составляет величины ~ 70 %, то для производства такого количества тепловой энергии необходимо сжечь в топках котлов 11 528 тыс. м³ природного газа.

Таблица 1 – Энергетическая мощность основных теплоиспользующих объектов предприятия

№	Потребители пара	Количество, т/ч	Количество, кВт
1	Резервуары для хранения жиров	1,60	1000,00
2	Технологический процесс	2,49	1855,52
3	Пароэжекторные блоки периодических процессов	3,92	3072,67
4	Пароэжекторные блоки непрерывной дезодорации	2,13	1676,00
5	Прочие потребители	0,6	374,70
6	На электролизерную	0,95	593,28
	Всего	11,7	8572,16

Стоимость газа для комбината в настоящее время составляет значение ~ 680 грн. за 1000 м³ природного газа, и, следовательно за потребляемый указанными объектами в течение года газ предприятие платит 7.84 млн грн. или 1.55 млн. дол. США.

Потребление пара пароэжекторными блоками составляет величину ~ 6.07 т/ч или 52 % от всего вырабатываемого пара. За год на создание вакуума в дезодорирующих линиях тратится 29 180 Гкал. тепловой энергии, для чего необходимо сжечь 5217 тыс. м³ природного газа общей стоимостью 3.55 млн. грн. или 700 тыс. дол. США.

Обследование технологических процессов на заводе позволило определить двадцать один технологический поток, которые могут быть включены в теплоэнергетическую интеграцию, свойства которых собраны в таблицу потоковых данных (таблица 2).

А сейчас перейдем к рассмотрению потоковых данных, экстрагированных из технологических процессов предприятия, и анализировать мы их будем с помощью методов интеграции процессов.

В связи со столь большим потреблением тепловой энергии в пароэжекторных блоках рассмотрим сначала систему технологических потоков, в которой будет отсутствовать поток пара, использующийся для создания вакуума. Но для учета мощности этого потока необходимо включить в исследуемую систему потоков предприятия поток оборотной воды, применяемый для охлаждения и конденсации пара.

Заметим, что во время обследования теплоэнергетической системы технологических процессов завода обнаружили только один рекуперативный теплообменник, в котором подогревается отфильтрованное масло, поступающее на непрерывную дезодорацию. Подогревается это – поток масла дезодорированным маслом с колонны Alfa Laval. Измерения температур теплоносителей в теплообменном аппарате позволило определить мощность рекуперации в этом теплообменном аппарате, которая равна 193.7 кВт.

Определение энергосберегающего потенциала

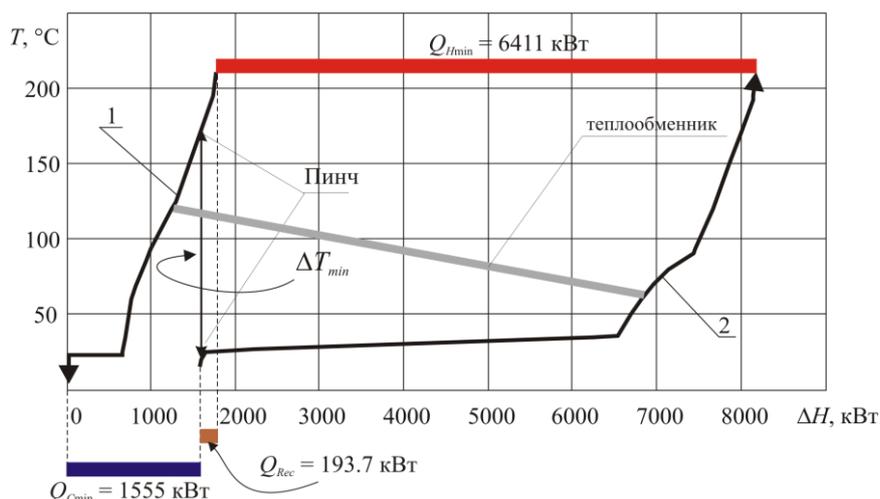
Используя технологические данные из таблицы 2, построим на энтальпийно-температурной диаграмме горячую и холодную составные кривые выбранной системы технологических потоков, и далее разместим их таким образом, чтобы интервал перекрытия между ними составил величину в 193.7 кВт (рис. 2).

Составные кривые показывают значения тепловой мощности, которую возможно отвести от системы горячих потоков – 1748.5 кВт и мощности, которую необходимо подвести к холодным потокам для выполнения процессов переработки жиров.

Таблица 2 – Поточковые данные технологических потоков, которые используются для определения энергосберегающего потенциала с учетом работы ПЭБ

№	Название потока	Тип	T_s , °C	T_T , °C	G , т/ч	C , кДж/(кг·K)	r , кДж/кг	CP , кВт/К	ΔH , кВт	α , кВт/($m^2 \cdot K$)
1	Дезодорированное масло (непр.)	гор	192	69	4,7	2,090		2,729	335,62	0,6
2	Дезодорированное масло (периодич.)	гор	210	60	3	2,100		1,750	262,50	0,6
3	ПЭБ непр. дезодорации: <i>охлаждение паров</i>	гор	260	171	2,13	2,279		1,346	119,78	0,1
	<i>конденсация паров</i>	гор	171	171	2,13		2045,3		1208,0	8
	<i>охлаждение конденсата</i>	гор	171	32	2,13	4,241		2,505	348,17	2
4	ПЭБ периодич. процессов: <i>охлаждение пара</i>	гор	260	171	3,92	2,279		2,482	220,89	0,1
	<i>конденсация паров</i>	гор	171	171	3,92		2045,3		2227,8	8
	<i>охлаждение конденсата</i>	гор	171	36	3,92	4,243		4,621	623,90	2
5	Скрубберное масло	гор	85	25	0,5	2,070		0,288	17,25	0,6
6	Охлаждение молока	гор	120	15	1,25	3,949		1,366	143,40	1,5
7	Охлаждение сахарного сиропа	гор	93	35	0,08	3,350		0,078	4,53	1
8	Саломас перед фильтрацией	гор	195	93	3,5	2,100		2,042	208,25	0,5
9	Охлаждение аммиака	гор	125	23	1,95	2,608		1,413	144,08	0,1
	Конденсация аммиака	гор	23	23	1,95		1168		632,7	7
10	Исходное масло на рафинацию	хол	15	50	12,5	1,850		6,424	224,83	0,4
11	Гидратированное масло	хол	50	90	12,5	2,030		7,049	281,94	0,5
12	Щелочь для нейтрализации	хол	20	90	0,21	4,000		0,232	16,24	1
13	Вода на промывку	хол	20	90	3,13	4,000		3,472	243,06	2
14	Подогрев масла перед сепаратором	хол	80	90	12,5	2,050		7,118	71,18	0,5
	Подогрев воды перед сепаратором	хол	80	90	3,13	4,200		3,646	36,46	0,2
15	Масло на непрерывную дезодорацию	хол	70	192	4,7	2,080		2,716	331,30	0,5
16	Масло на периодическую дезодорацию	хол	60	210	3	2,100		1,750	262,50	0,5
17	Пастеризация молока	хол	26	120	1,25	3,949		1,366	128,38	2
18	Пастеризация сахарного сиропа	хол	25	93	0,08	3,350		0,078	5,32	1,5
19	Масло в 1-й автоклав	хол	70	150	3,5	2,080		2,022	161,78	0,5
20	Масло во 2-й автоклав	хол	150	170	3,5	2,110		2,051	41,03	0,5
21	Масло в 3-й автоклав	хол	170	195	3,5	2,120		2,061	51,53	0,5

Для проведения этих процессов необходима мощность ~ 6604.2 кВт, но это не значит, что вся эта мощность должна быть получена от утилитной системы установки, в данном случае – котлов котельной и Джоулева подогрева термического масла на колонне непрерывной дезодорации. Часть энергии может быть рекуперирована с помощью системы теплообмена между холодными и горячими потоками. Величину мощности, существующей в настоящее время, и показывает перекрытие кривых (рис. 2). Это значение на диаграмме кривых равно ~ 193.7 кВт. Наименьшее расстояние между кривыми по оси ординат – температурной оси показывается областью пинча выбранной системы технологических потоков. В нашем случае на действующей установке пинч показывается на температурах: $T_{гор} = 173$ °С и $T_{хол} = 20$ °С. Разность температур в области пинча равна $\Delta T_{min} = 153$ °С. Эта разность была бы минимальной между теплоносителями в теплообменном оборудовании, если бы выполнялись условия вертикального теплообмена [1], но в настоящее время в теплообменной системе установки вся мощность рекуперированной тепловой энергии передается через пинч, что отчетливо видно при изображении теплообменных связей между горячими и холодными технологическими потоками на графике составных кривых (рис. 2), поэтому на теплообменном аппарате наблюдаются разности температур между теплоносителями меньшие, чем ΔT_{min} . Перекрестный теплообмен, наблюдаемый в существующей теплообменной сети завода, приводит к значительному завышению площади поверхности теплообмена в теплообменных сетях



[1].

Рисунок 2 – Составные кривые процессов переработки жиров на ХЖК для существующей в настоящее время теплоэнергетической системы с потоком пара на парозежкторные блоки, включенным как утилит: 1 – составная кривая горячих потоков; 2 – составная кривая холодных потоков; Q_{Hmin} , Q_{Cmin} , Q_{Rec} – потребление мощности горячих утилит, холодных утилит и мощность рекуперации

При построении составных кривых (рис. 2) мы учитывали поток пара на парозежкторные блоки как горячую утилиту для того, чтобы определить общую величину горячих утилит, которые необходимо произвести для осуществления процессов переработки жиров. Мы отчетливо видим на рисунке, что основная мощность горячих утилит идет на нагрев оборотной воды конденсирующей пар.

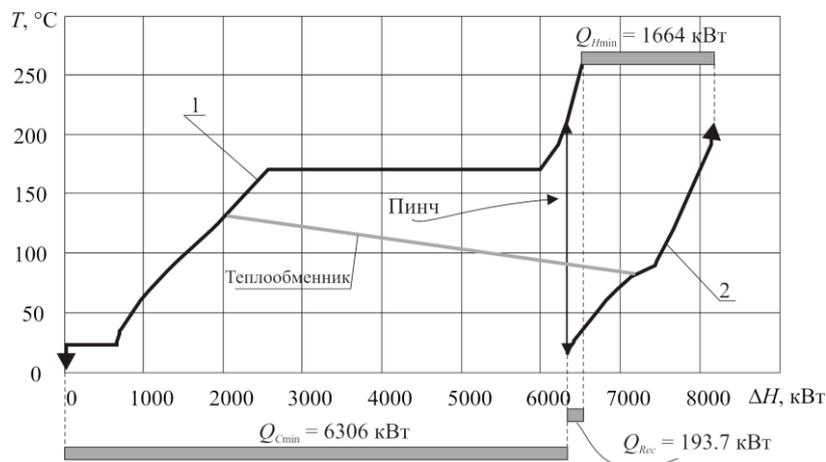
Для того, чтобы определить энергосберегающий потенциал, доступный при теплоэнергетическом объединении процессов завода, построим составные кривые процес-

сов на основе потоковых данных, включающих поток пара на парожекторные блоки как технологический поток.

В рассматриваемом случае используем два новых горячих потока. Это потоки пара на парожекторные блоки непрерывной (ПЭБ) дезодорации и периодической дезодорации. Используя технологические данные из таблицы 2, построим на энтальпийно-температурной диаграмме горячую и холодную составные кривые выбранной системы технологических потоков, и далее разместим их таким образом, чтобы интервал перекрытия между ними составил величину в 193.7 кВт (рис. 3).

Область пинча локализуется на температурах равных значениям: для горячих потоков $T_{pin} = 210\text{ }^{\circ}\text{C}$, для холодных – $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, т.е. $\Delta T_{min} = 195\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Проекция горячей составной кривой на ось потоковой энтальпии составляет значение, равное 6499.7 кВт, это означает, от горячих потоков необходимо отводить именно такой тепловой поток. Этот поток теплоты может быть рекуперирован, а в существующей теплоэнергетической системе предприятия рекуперирована только 193.7 кВт,



и то с переносом теплоты через пинч, т.е. посредством теплообменной системы энергия переносится от горячих утилит к холодным (рис. 3).

Рисунок 3 – Составные кривые процессов переработки жиров на ХЖК для существующей в настоящее время теплоэнергетической системы с потоками пара на ПЭБ, включенных как технологические потоки: 1 – составная кривая горячих потоков; 2 – составная кривая холодных потоков; Q_{Hmin} , Q_{Cmin} , Q_{Rec} – потребление мощности горячих утилит, холодных утилит и мощность рекуперации

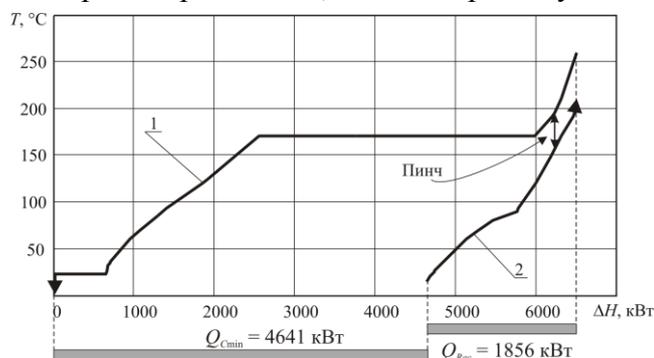
Проекция холодной составной кривой показывает, что для проведения процессов переработки жиров необходимо обеспечить тепловой поток к холодным технологическим потокам завода равный величине 1857.7 кВт. Составные кривые для рассматриваемого случая потоковых данных показывают, что непосредственно технологический процесс потребляет 1664 кВт тепловой энергии от утилитной системы вследствие того, что часть энергии холодными потоками рекуперирована (рис. 3). Пересчитывая стоимость газа для предприятия в стоимость тепловой энергии, получаем, что 1 кВт-год стоит $CH = 127\text{ \$}$. С учетом к.п.д. утилитной системы, получаем, что стоимость энергии для проведения процесса в течение года равна 211 тыс. дол. США.

В качестве холодной утилиты на предприятии используется оборотная вода, которая и отводит от процессов тепловую мощность, равную 6306 кВт.

Удельная стоимость холодных утилит для предприятий Украины, как правило, составляет 10 % от стоимости горячих утилит [2], т.е. 1 кВт·год холодных утилит стоит $CC = 12.7$ \$. Это значит, что в настоящее время предприятие в течение года платит за холодные утилиты, используемые в процессах переработки жиров, 80 тыс. дол. США.

Следовательно, стоимость утилит для проведения процессов на заводе обходится в сумму 291 тыс. дол. США. Здесь необходимо помнить, что поток пара на ПЭБ мы учитывали как горячий технологический поток, т.е. поток, который требует охлаждения.

Составные кривые, приведенные на рисунке 3, показывают, что рассматриваемая задача определения энергосберегающего потенциала предприятия и задача составления пинч-проекта реконструкции для системы теплообмена относятся к так называемым пороговым задачам. Поэтому в данном случае нам даже нет необходимости определять оптимальное значение минимальной разности температур в системе теплообмена для построения составных кривых, которые будут соответствовать оптимальной по приведенной стоимости системе теплообмена между холодными и горячими потоками. Для этого мы просто построим кривые так, чтобы горячая утилита была равна нулю



при наибольших возможных при этом движущих силах теплопередачи, что заведомо будет минимизировать теплообменную поверхность. Этим условиям удовлетворяют кривые, показанные на рисунке 4. В этом случае $\Delta T_{\min} = 39$ °C.

Рисунок 4 – Составные кривые процессов переработки жиров на ХЖК для предлагаемой теплоэнергетической системы с потоками пара на ПЭБ, включенным как технологические потоки:

1 – составная кривая горячих потоков; 2 – составная кривая холодных потоков; $Q_{C\min}$, Q_{Rec} – потребление мощности горячих утилит, холодных утилит и мощность рекуперации

Здесь мы видим, что $Q_{H\min} = 0$, мощность рекуперации тепловой энергии, составляет значение, равное 1856 кВт, а необходимое значение холодных утилит равно 4641 кВт, т.е. принимая во внимание указанную выше стоимость холодных утилит, непосредственное проведение процесса переработки жиров предприятию обойдется в этом случае в 59 тыс. дол. США, вместо 291 тыс. дол. США до реконструкции. Стоимость утилит для проведения процессов уменьшится почти в 5 раз. Совершенно понятно, что за все необходимо платить, и платой в нашем случае будет установка дополнительной теплообменной поверхности, т.е. капитальные затраты.

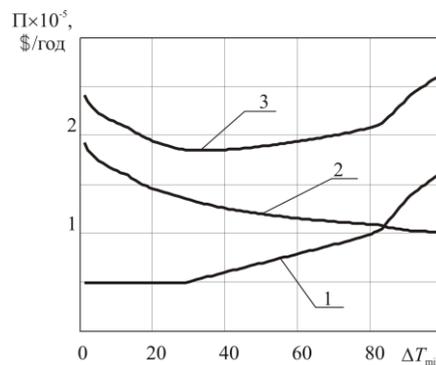
Составные кривые содержат достаточно информации для определения этих затрат еще до разработки самого проекта реконструкции теплоэнергетической системы.

Нам известны начальные и конечные температуры технологических потоков, их тепловые нагрузки и, как правило, известны характерные коэффициенты теплоотдачи для каждого из потоков в теплообменном оборудовании. Применяя аппарат составных кривых, мы можем достаточно точно оценить необходимую площадь поверхности теплообмена для проектируемого или реконструируемого процесса. Для этого мы по вы-

полненным измерениям оценили коэффициенты теплоотдачи для каждого технологического процесса (табл. 2).

В пинч-анализе также существуют методы определения минимального количества теплообменных аппаратов и их секций [1]. После определения количества теплообменных секций и их поверхности можно оценить стоимость их установки, а значит и общие капитальные затраты. При известной банковской ставке и жизненном цикле предприятия легко вычислить приведенную стоимость капитальных затрат [1]. Приведенная стоимость потребляемой энергии определяется по уже известным значениям утилит Q_{Hmin} и Q_{Cmin} (рис. 4), а стоимость теплообменного оборудования выбираем в соответствии с ценами его поставщиков.

Теперь мы можем каждому значению ΔT_{min} сопоставить в соответствии приве-



денную 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 (рис. 5).

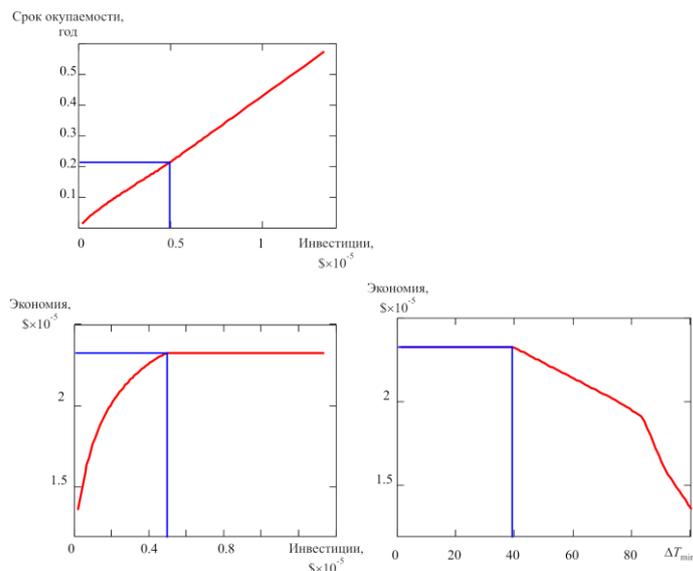
Рисунок 5 – Корректное значение ΔT_{min} определяется экономическим компромиссом между конкурирующими зависимостями от минимальных движущих сил теплопередачи в системе теплообмена, приведенной стоимости капитальных вложений – 1 и стоимости внешних энергоносителей – 2, 3 – общая приведенная стоимость проекта

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} (рис. 5), и ΔT_{min}^{opt} определяется при минимальном значении приведенной стоимости проекта.

Приведенные стоимостные кривые (рис. 5) показывают нам значение оптимальной величины минимальной разности температур, которая должна наблюдаться в проекте реконструкции, и она равна $\Delta T_{min} = 39 \text{ }^\circ\text{C}$, т.е. совпадает с разностью, которую мы определили, исходя из порогового характера пинч-задачи.

Стоимостные кривые совместно с составными кривыми технологических потоков позволяют построить диаграммы для определения величин ΔT_{min} , величины инвестиций в дополнительную к существующей площади поверхности теплообмена и срока окупаемости предлагаемого проекта (рис. 6).

Мы опять здесь видим, что задача энергосберегающей реконструкции жиркомбината имеет пороговый характер, т.е. при превышении некоторого значения инвестиций годовая экономия перестает увеличиваться (рис. 6). Данный порог соответствует капвложениям в 90 тыс. дол. США, срок окупаемости данных инвестиций составит



~ 0.25 года или три месяца. Минимальная разность температур между теплоносителями на теплообменных аппаратах вблизи порогового значения энергопотребления несколько превышает величину $\Delta T_{\min} = 39 \text{ }^\circ\text{C}$.

Рисунок 6 – Функциональная связь между значениями величины ΔT_{\min} , сроком окупаемости, капитальными вложениями и величиной годовой экономии средств

Заключение

Экономический потенциал энергосбережения, доступный интеграции процессов обследованного жиркомбината, равен 232 тыс. дол. США, что составляет 76 % стоимости энергии, потребляемой в процессе производства жиров без рассмотрения остальных потребителей, и 15 % стоимости энергии, потребляемой всем заводом.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Европейской Комиссии (Проект SHERHRA, контракт No COLL-CT-2004-500229).

Литература

1. Смит Р., Клемеш Й., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М. Основы интеграции тепловых процессов. Харьков: ХГПУ. 2000. – 457 с.
2. Капустенко П.А., Кузин А.К., Макаровский Е.Л., Товажнянский Л.Л., Ульев Л.М., Черная Е.Б. Альтернативная энергетика и энергосбережение: современное состояние и перспективы. Харьков. ООО Издательский дом «Вокруг цвета». 2004. – 312 с.

УДК 621:664(076)

Товажнянский Л.Л., Капустенко П.О., Ульев Л.М., Болдирев С.О.

ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО ПОТЕНЦІАЛУ НА ДІЮЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ ВИРОБНИЦТВА ЖИРІВ

У роботі показано, що економічний потенціал енергозбереження, доступний інтеграції процесів обстеженого жиркомбіната, дорівнює 232 тис. дол. США, що становить 76 % вартості енергії, споживаної в процесі виробництва жирів без розгляду інших споживачів, і 15 % вартості енергії, споживаної всім заводом.