

УДК 621:662.6

Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М., ¹Болдырев С.А., ¹Гарев А.О.

ИНТЕГРАЦИЯ ЦИКЛА АММИАЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В ТЕПЛОСЕТЬ СЫРО-МОЛОЧНОГО ЗАВОДА

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
¹АО «Содружество – Т», Харьков*

Введение

Основные проблемы, которые необходимо решать человечеству в настоящее время и в будущем – удовлетворение потребностей в пище и энергии, а также создание удовлетворительных условий обитания со стороны окружающей среды. Производство пищи, которая поддерживает энергетический обмен в человеческом организме, требует ощутимого потребления энергии от природных ресурсов – главным образом угля, нефти и природного газа. Статистические данные, полученные в настоящее время, указывают на весьма ощутимое энергопотребление в пищевой промышленности: на производство 1 Дж энергии в виде пищи приходится затраты 10 Дж энергии природных ресурсов. Постоянный рост народонаселения Земли и обеспечение его питанием обуславливают ежегодный рост энергопотребления на 24-40 %. С другой стороны, это приводит к резкому ухудшению состояния окружающей среды ввиду увеличения выбросов CO₂, NO_x, SO_x, пыли, сажи и различных промышленных выбросов. Таким образом, задача энергосбережения в пищевой промышленности является общей и жизненно важной проблемой для всех без исключения государств.

Интенсивная работа в этом направлении началась только со времени глобального энергетического кризиса 70-х годов. За прошедшие два десятилетия наибольшее развитие в энергосбережении получили системные методы интеграции, которые в настоящее время выделились в отдельное научное направление.

Интеграция процессов заложила эффективную основу для определения минимального потребления топлива; кроме того, были усовершенствованы подходы к проектированию, синтезу и реконструкции процессов. Разработки были успешно внедрены в различных секторах пищевой промышленности – в производствах сахара, этилового спирта, глюкозы, сухого молока, томатной пасты, растительного масла, консервов.

Цель большинства подобных исследований состояла в том, чтобы обеспечить снижение более чем на 30% расхода топлива и соответственно снизить выбросы CO₂, NO_x, SO_x, а также механических частиц (например, пыли и сажи).

Имеется ряд успешных применений методологии интеграции процессов для различных производств Западной и Центральной Европы.

Пинч-анализ и интеграция

В настоящей работе проведено обследование системы теплоснабжения и системы технологического охлаждения сыро-молочного комбината с целью их дальнейшей интеграции для снижения энергозатрат.

Приведем краткое описание технологических потоков и оборудования в обследованных отделениях. Поток паров аммиака поступает в компрессорное отделение. В компрессорном отделении происходит сжатие паров хладагента до 10-15 кг/см². Из компрессорного отделения аммиак с температурой 100-130 °С и давлением 10-15 кг/см²

направляется через два маслоотделителя в блок конденсаторов (рис. 1), где происходит охлаждение, конденсация и переохлаждение жидкого аммиака.

Сеточная диаграмма существующей системы технологических потоков аммиач-

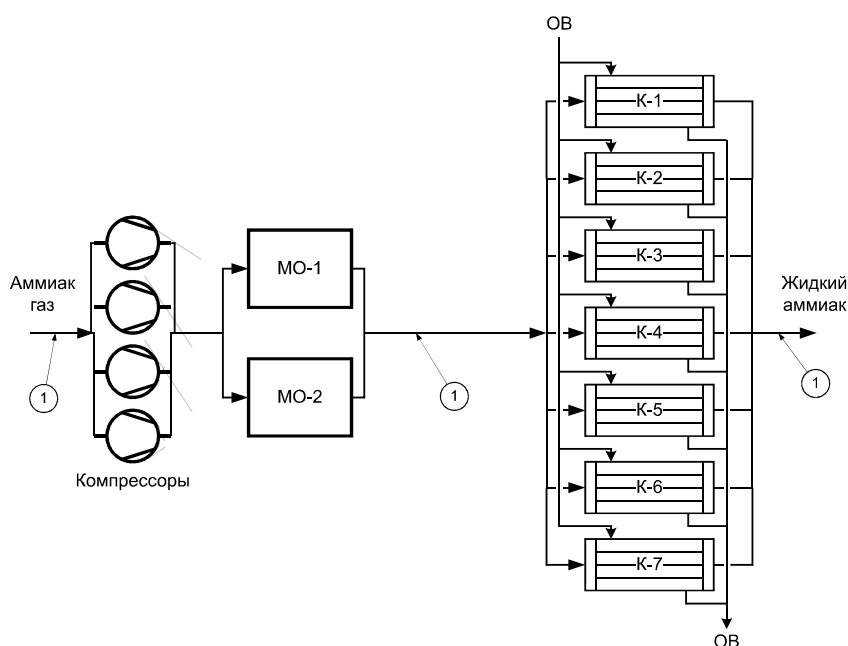


Рисунок 1 – Технологическая схема охлаждения и конденсации паров аммиака в аммиачном отделении. МО-1, 2 – маслоотделители; ОВ – охлаждающая вода оборотного цикла; К-1 – К-7 – конденсаторы

ного отделения и потоков, доступных для интеграции в систему теплоснабжения в настоящее время, показана на рис. 2. Здесь мы видим отсутствие какой-либо интеграции. Технологические потоковые данные, экстрагированные в процессе обследования, собраны в таблицу 1.

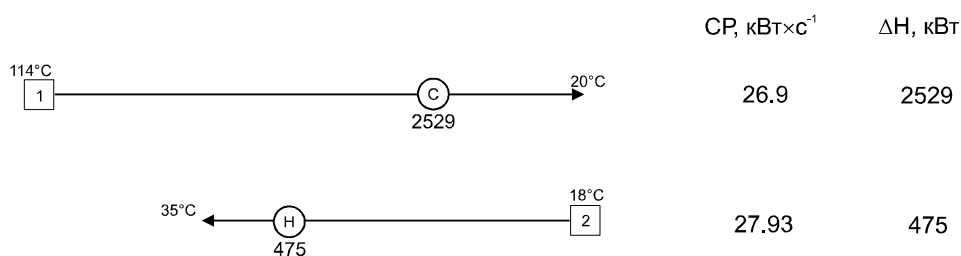


Рисунок 2 – Сеточная диаграмма системы потоков котельной и аммиачного отделения в настоящее время

Таблица 1 – Данные для существующей схемы

№	Название потока	Тип	TS, °C	TT, °C	G, т/ч	C, кДж/кг·K	г, кДж/кг	CP, кВт/К	ΔH, кВт
1.1	Охлаждение газообразного аммиака	гор	114	28	6,22	3,25		5,615	482,91
1.2	Конденсация аммиака	гор	28	28	6,22		1146		1980,03
1.3	Охлаждение жидкого аммиака	гор	28	20	6,22	4,75		8,207	65,66
2	Вода на ХВО	хол	18	35	24,0	4,190		27,933	474,87

С помощью этих данных мы построим составные кривые для существующего процесса и его тепловой системы (рис. 3), на которых хорошо видны необходимые утилитные нагрузки для обследуемой системы технологических потоков.

Анализ составных кривых показывает возможность интеграции потоков котельной, в частности потока воды на химводоочистку (ХВО). Мощность необходимую для этого потока вполне можно получить от паров аммиака (рис. 4), но составные кривые (рис. 3) также показывают наличие большого количества низкопотенциальной теплоты, которая в настоящее время отводится от системы охлаждающей водой. Данную теплоту можно использовать для интеграции и комбинированного нагрева воды на химводоочистку и потока теплоносителя для системы горячего водоснабжения всего предприятия.

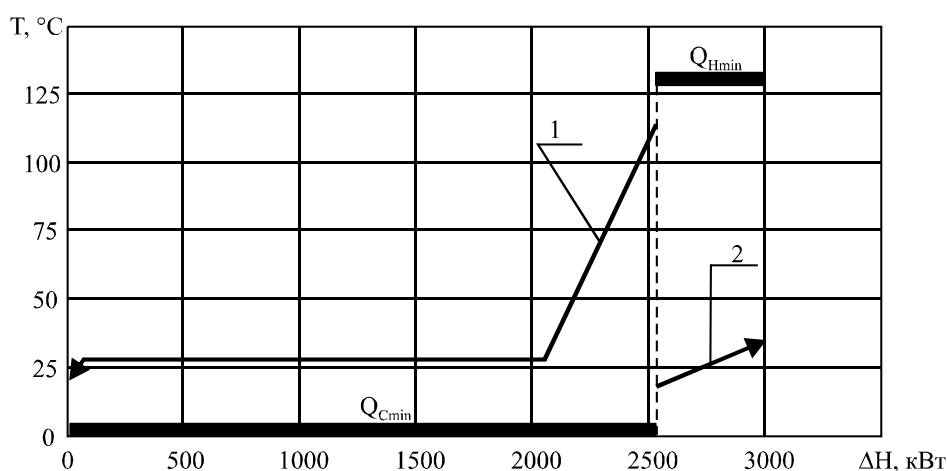


Рисунок 3 – Составные кривые системы технологических потоков котельной и компрессионного отделения до интеграции. 1 – горячая составная кривая; 2 – холодная составная кривая; $Q_{Hmin} = 475$ кВт – горячая утилиты; $Q_{Cmin} = 2529$ кВт – холодная утилиты

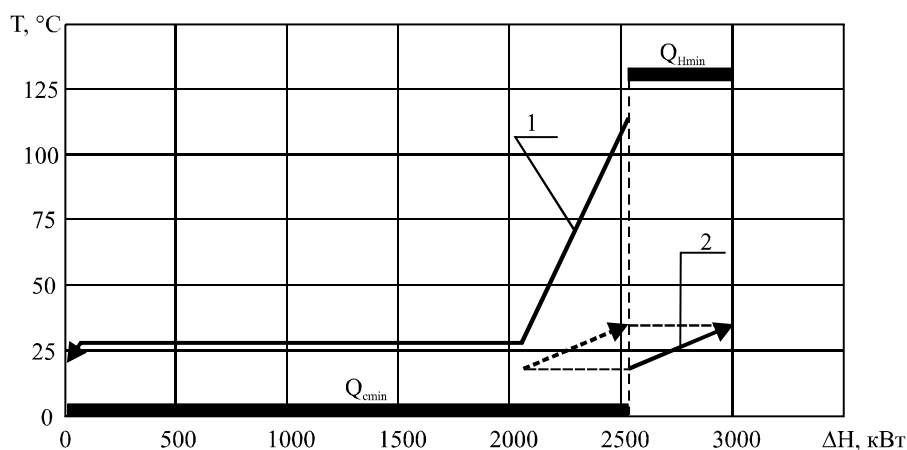


Рисунок 4 – Возможности интеграции потоков котельной и аммиачного отделения

Включив новый поток в тепловую интеграцию, заполним новую таблицу с потоковыми данными (табл. 2).

Для интеграции выбрана ΔT_{min} в системе теплообмена, равной 2°C . Такую разность температур между используемыми теплоносителями вполне можно обеспечить на современных высокоэффективных компактных теплообменных аппаратах, например, на пластинчатых теплообменных аппаратах.

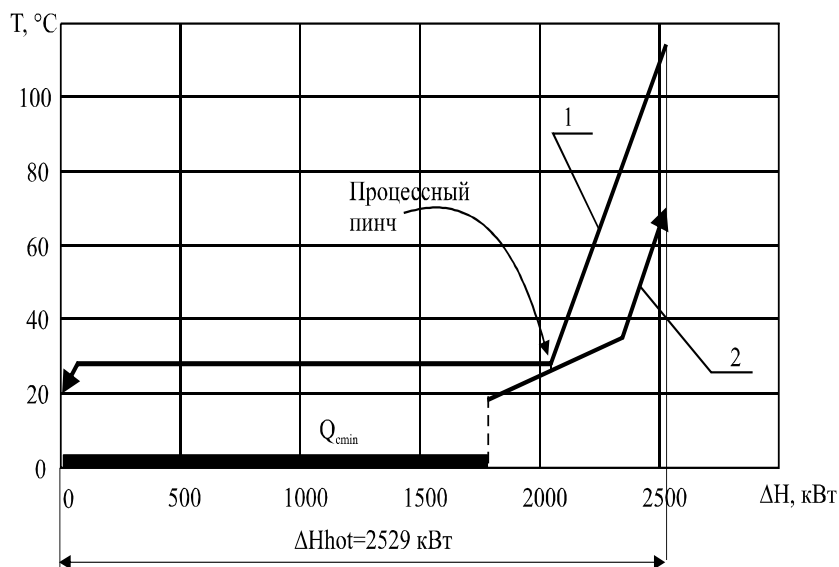


Рисунок 5 – Составные кривые системы технологических потоков котельной и компрессионного отделения после интеграции без дополнительного компримирования. 1 – горячая составная кривая; 2 – холодная составная кривая; $Q_{Hmin} = 0$ кВт – горячая утилита; $Q_{Cmin} = 1780$ кВт – холодная утилита; ΔH_{hot} – общее потоковое теплосодержание горячей составной кривой

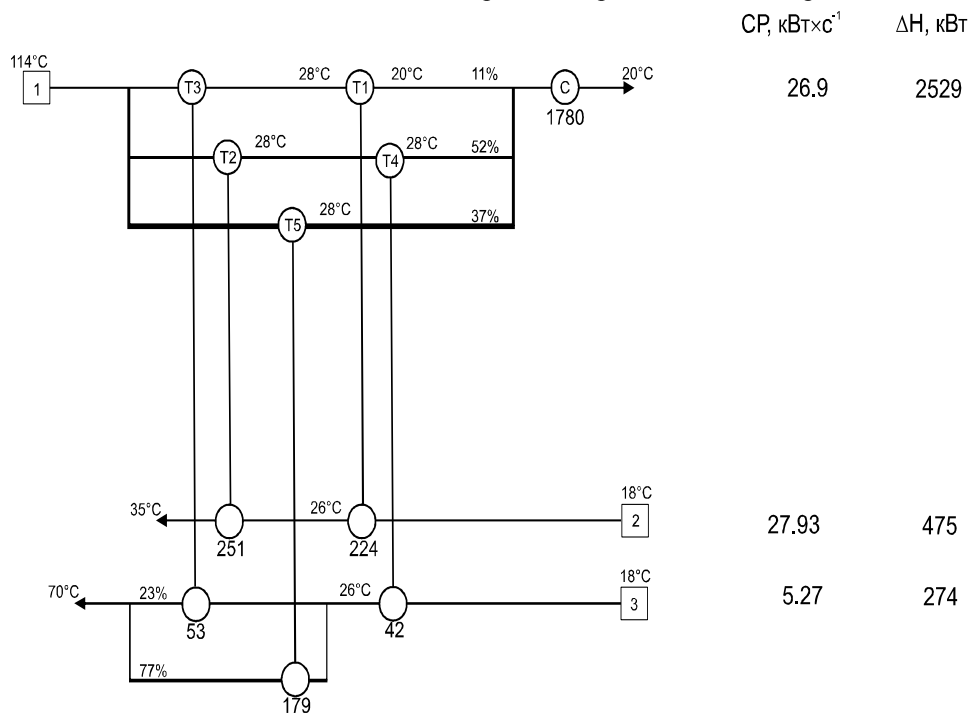


Рисунок 6 – Сеточная диаграмма интегрированной системы потоков котельной и аммиачного отделения: Т – теплообменные аппараты; С – холодильник; СР – потоковая теплоемкость; ΔН – потоковая энтальпия

Таблица 2 – Данные для интегрированной схемы без дополнительной компрессии

№	Название потока	Тип	TS, °C	TT, °C	G, т/ч	C, кДж/кг·K	г, кДж/кг	CP, кВт/K	ΔH, кВт
1.1	Охлаждение газообразного аммиака	гор	114	28	6,22	3,250		5,615	482,91
1.2	Конденсация аммиака	гор	28	28	6,22		1146		1980,03
1.3	Охлаждение жидкого аммиака	гор	28	20	6,22	4,750		8,207	65,66
2	Вода на ХВО	хол	18	35	24,00	4,190		27,933	474,87
3	Вода на производство	хол	18	70	4,53	4,190		5,270	274,00

Составные кривые, построенные для потоковых данных из таблицы 2 и $\Delta T_{\min}=2^{\circ}\text{C}$ показывают возможность полного исключения горячих утилит из рассматриваемой системы потоков и возможность дополнительного подогрева сетевой воды. Всего в рассматриваемой системе, для выбранного ΔT_{\min} , возможная мощность тепловой рекуперации составляет величину $\sim 0,75$ МВт, из которых 0,47 МВт идет на подогрев воды для химводоочистки, а 0,27 МВт для подогрева сетевой воды.

Сеточная диаграмма системы теплообмена, удовлетворяющая составным кривым (рис. 5), приведена на рисунке 6. Для достижения энергетических целей, определенных составными кривыми, понадобится 5 рекуперативных теплообменных аппаратов. Технологическая схема системы теплообмена, удовлетворяющая сеточной диаграмме (рис. 6), показана на рисунке 7.

Краткая характеристика теплообменных аппаратов, планируемых к использованию в технологической схеме, приведенной на рисунке 7, дана в таблице 3.

Таблица 3 – Оценочные технические данные теплообменных аппаратов для теплообменной системы без дополнительного компримирования

№	Горячий поток			Холодный поток			ΔT_{\min}	Q, кВт	S, м ²
	№	T _{вх}	T _{вых}	№	T _{вх}	T _{вых}			
T1	1	28	20	2	18	26	2	224	10,22
T2	1	114	28	2	26	35	2	251	17,28
T3	1	114	28	3	26	70	2	53	8,68
T4	1	28	28	3	18	26	2	42	7,04
T5	1	114	28	3	26	70	2	179	21,60
								Всего	64,82

Проводя дополнительный анализ составных кривых для исследуемой системы потоков (рис. 5), мы видим, что локализация пинча на горячей температуре 28 °C – температуре конденсации аммиака лимитирует расходное теплосодержание сетевого теплоносителя, который можно было бы использовать для отопления и горячего водоснабжения. Если бы нам удалось поднять температуру конденсации, хотя бы части потока аммиака, то можно было бы увеличить расходную энтальпию теплоносителя, идущего на нужды предприятия.

Увеличить температуру конденсации паров аммиака можно повысив равновесную температуру части потока, т.е. применив дополнительное компримирование. Параметры потока при его компримировании находим с помощью математического обеспечения, разработанного для интеграции технологических потоков в химико-технологических системах. В результате было определено, что для практического обеспечения предприятия теплом и горячей водой, т.е. для подогрева сетевой воды с расходом ~ 20 т/ч до 70 °C необходима дополнительная компрессия $\sim 2,3$ т/ч газообразного

аммиака с 11 ат до 26 ат и температурой конденсации ~ 60 °С. Результаты исследования приведены в таблице 4.

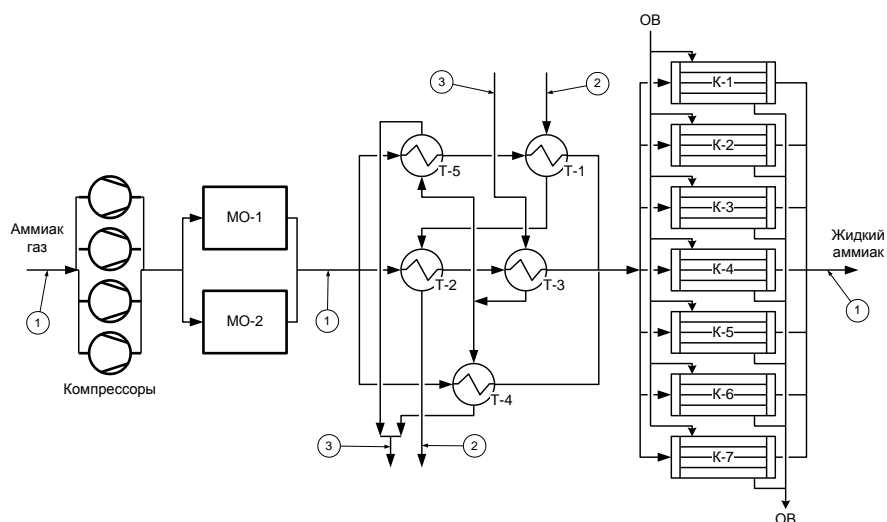


Рисунок 7 – Технологическая схема системы теплообмена котельной и аммиачного отделения после интеграции без дополнительного компримирования. МО-1, 2 – маслоотделители; ОВ – охлаждающая вода оборотного цикла; К-1 – К-7 – конденсаторы; Т-1 – Т-5 – теплообменники

Таблица 4 – Данные для интегрированной схемы с дополнительной компрессией

№	Название потока	Тип	TS, °С	TT, °С	G, т/ч	C, кДж/кг·К	г, кДж/кг	CP, кВт/К	DN, кВт
1.1	Охлаждение газообразного аммиака	гор	114	28	3,914	3,250		3,533	303,88
1.2	Конденсация аммиака	гор	28	28	3,914		1146		1245,96
1.3	Охлаждение жидкого аммиака	гор	28	20	3,914	4,750		5,164	41,31
2.1	Охлаждение газообразного аммиака	гор	146	60	2,306	4,275		2,738	235,50
2.2	Конденсация аммиака	гор	60	60	2,306		986,2		631,72
2.3	Охлаждение жидкого аммиака	гор	60	20	2,306	4,935		3,161	126,45
3	Вода на ХВО	хол	18	35	24,000	4,190		27,933	474,87
4	Вода на производство	хол	18	70	19,933	4,190		23,200	1206,40

Составные кривые, построенные для потоковых данных из таблицы 4, для уже выбранного $\Delta T_{\min} = 2 \text{ }^\circ\text{C}$ показывают, что задача проектирования теплообменной системы, в данном случае, представляет двухпичевую проблему [1] (рис. 8). Составные кривые также показывают, что в системе с дополнительным компримированием аммиака мощность рекуперации составляет $Q_{\text{rec}} \approx 1,7 \text{ МВт}$, что почти в 2,3 раза больше, чем в системе без дополнительного компримирования (рис. 5)

Мощность, которая должна быть отведена от системы горячих потоков, в данном случае равна $\Delta H_{\text{гор}} = 2,585 \text{ МВт}$, что больше мощности, отводимой в настоящее время на 56 кВт, это и есть та величина мощности, которая будет затрачиваться на насосах дополнительного компримирования.

Для того, чтобы синтезировать сеточную диаграмму теплообменной системы, которая будет удовлетворять составным кривым на рисунке 8, изобразим сначала попу-

ляцию технологических потоков, участвующих в тепловой интеграции с локализацией утилитного и процессного пинчей (рис. 9). Эти два пинча делят систему потоков на три подсистемы, в каждой из которых мы будем строить свою теплообменную систему, запрещая при этом перенос энергии через оба пинча.

В результате мы получаем сеточную диаграмму теплообменной сети, представленную на рисунке 10. Здесь мы можем заметить несколько петель, но разрывать их с целью упрощения системы нам кажется нецелесообразным технически и экономически, поскольку в состав всех петель входят теплообменные аппараты, в которых теплоносителями являются не только различные фазовые состояния вещества, но и его расход.

В данной системе 7 теплообменных рекуперативных аппаратов с общей площадью поверхности теплообмена равной 69 м^2 , что всего на 5 м^2 больше, чем в сети, показанной на рисунке 7. Краткая техническая характеристика этих аппаратов приведена в таблице 5.

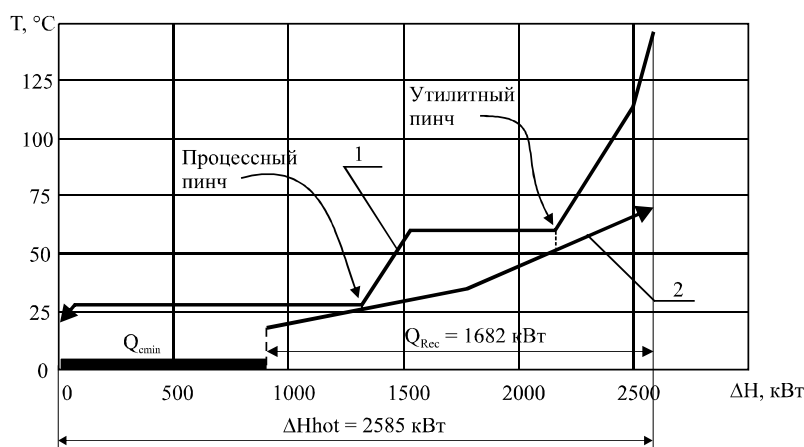


Рисунок 8 – Составные кривые системы технологических потоков котельной и компрессионного отделения после интеграции с дополнительным компримированием. 1 – горячая составная кривая; 2 – холодная составная кривая; $Q_{Hmin}=0$ кВт – горячая утилита; $Q_{Cmin}=903$ кВт – холодная утилита; $Q_{Rec} = 1682$ кВт – мощность рекуперации в системе теплообмена; ΔH_{hot} – общее потоковое теплосодержание горячей составной кривой

Таблица 5 – Оценочные технические данные теплообменных аппаратов для теплообменной системы с дополнительным компримированием

№	Горячий поток			Холодный поток			ΔT_{min}	Q, кВт	S, м^2
	№	$T_{вх}$	$T_{вых}$	№	$T_{вх}$	$T_{вых}$			
T1	1	114	60	4	52	70	8	191	11,44
T2	2	146	60	4	52	70	8	236	7
T3	2	60	28	4	26	52	2	593	9,38
T4	2	60	28	3	26	35	2	139	3,87
T5	1	60	28	3	26	35	2	113	21,12
T6	1	28	28	4	18	26	2	186	7,28
T7	1	28	28	3	18	26	2	223	9,24
								Всего	69,33

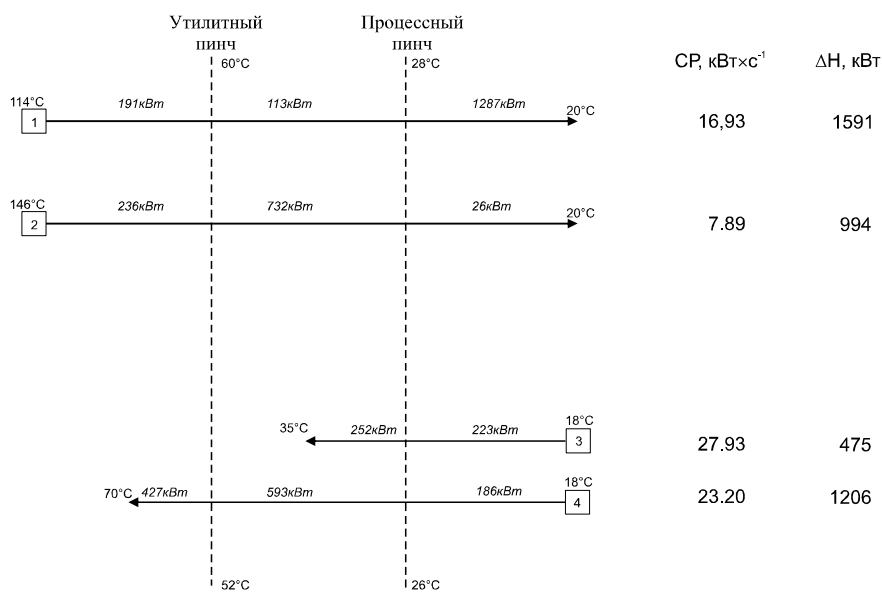


Рисунок 9 – Сеточная диаграмма системы технологических потоков, участвующих в интеграции с дополнительным компримированием. Штриховые линии показывают деление на пинчах.

CP – потоковая теплоемкость; ΔH – потоковая энтальпия

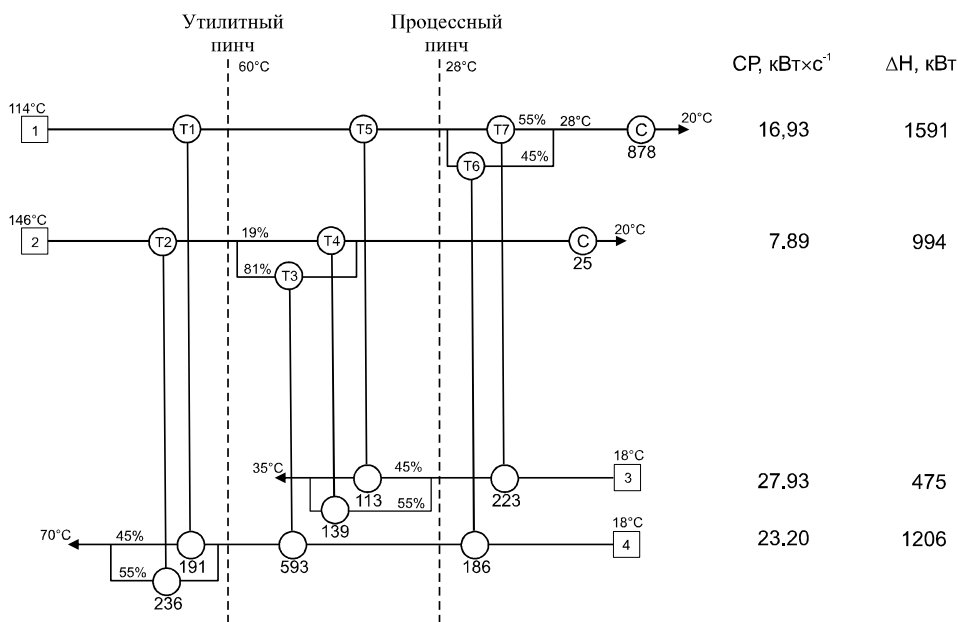


Рисунок 10 – Сеточная диаграмма системы технологических потоков и системы теплообмена при интеграции с дополнительным компримированием. Штриховые линии показывают деление на пинчах.

T – теплообменные аппараты; C – холодильник; CP – потоковая теплоемкость, ΔH – потоковая энтальпия

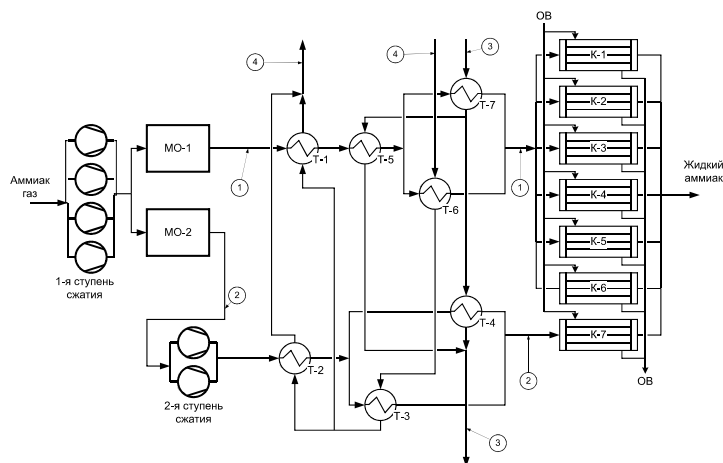


Рисунок 11 – Технологическая схема системы теплообмена котельной и аммиачного отделения после интеграции с дополнительным компримированием. МО-1, 2 – маслоотделители; ОВ – охлаждающая вода оборотного цикла; К-1 – К-7 – конденсаторы; Т-1 – Т-5 – теплообменники

Технологическая схема теплообменной системы рекуперативных теплообменных аппаратов в случае с дополнительным компримированием потока аммиака показана на рисунке 11.

Внедрение данной системы позволит обеспечить нагрев воды для химводоочистки с расходом 24 т/ч и для нужд производства с расходом ~20 т/ч, затрачивая дополнительно всего ~ 56 кВт мощности, т.е. затрачивая 56 кВт электроэнергии, без учета к.п.д двигателя, мы увеличиваем мощность полезной рекуперации тепловой энергии на величину ~1 МВт, а происходит это за счет того, что при дополнительном компримировании мы сдвинули область процессного пинча, дав тем самым возможность увеличить угол наклона холодной составной кривой (рис. 8).

Таким образом, использование дополнительного компримирования технологического газообразного потока позволило углубить интеграцию теплообменной системы с технологическим циклом и создать систему для рекуперации низкопотенциальной тепловой энергии.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Европейской Комиссии (Проект SERHRA, контракт No COLL-СТ-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. Щербин В.А., Гинберг Я.И. Холодильные станции и установки. – М.: Химия. 1976 г. – 376 с.

УДК 621:662.6

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

ИНТЕГРАЦИЯ ЦИКЛУ АМИАЧНОГО ОХОЛОЖДЕНИЯ В ТЕПЛОМЕРЕЖУ СИРО-МОЛОЧНОГО ЗАВОДУ

Використання додаткового компримування технологічного газового потоку дозволило поглибити інтеграцію теплообмінної системи у технологічний цикл і створити систему для рекуперації низькопотенціальної теплової енергії.