

УДК 662.6

Товажнянский Л.Л., Гарев А.О., Арсеньева О.П., Перевертайленко А.Ю.

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ПЛАСТИНАТЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ПРИ ИНТЕГРАЦИИ ТЕПЛОНАСОСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОМЫШЛЕННЫЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ ЦИКЛЫ**

Анализ производственных процессов многих отраслей пищевой промышленности Украины [1] указывает на типичность структуры схем энергопотребления предприятий. Тепло к процессам подводится горячими утилитными потоками, а отводится холодными утилитными потоками. Некоторые процессы требуют охлаждения технологических потоков до достаточно низких температур. Это может быть обеспечено только низкотемпературными холодильными утилитами, получаемыми в холодильных установках.

Обобщенная принципиальная схема энергопотребления для ряда пищевых производств (производство молока и молокопродуктов, производство пива, вина, хлебопекарных дрожжей и некоторые другие) приведена на рис. 1.

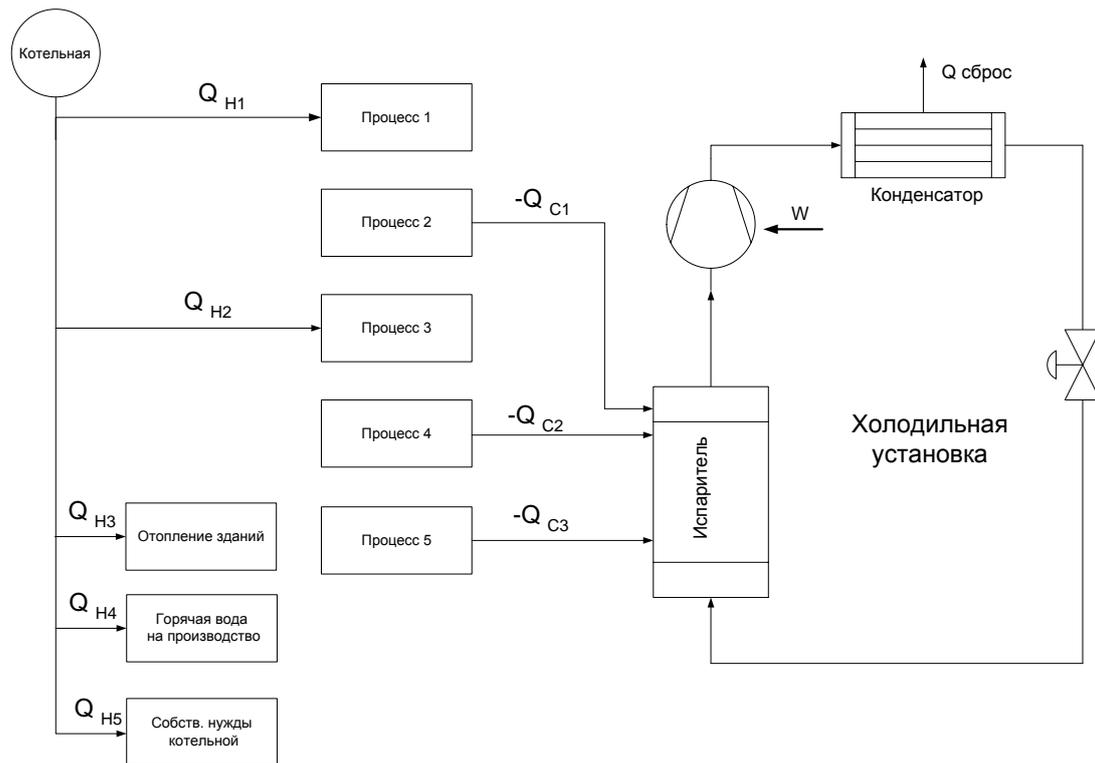


Рисунок 1

Источниками тепловой энергии, подаваемой к производственным процессам паром и/или горячей водой, как правило, является котельная. Часть тепла затрачивается на отопление, приготовление горячей воды на производственные и бытовые нужды и на собственные нужды котельной. Отвод тепла, т.е. охлаждение технологических пото-

ков производится различными холодными утилитами в зависимости от целевых температур технологических потоков. Во многих производствах предприятий пищевой промышленности требуется охлаждение целевых продуктов до температур в диапазоне от 0 до +8 °С (брожение пива, охлаждение термообработанного молока как готового продукта, охлаждение вина для извлечения винного камня, охлаждения смеси в производстве мороженого и т.д.) [1,2]. В качестве холодных утилит в этих случаях используют ледяную воду, рассолы (водные растворы  $\text{CaCl}_2$  и  $\text{NaCl}$ ), водные растворы пропиленгликоля и некоторые другие жидкости. Для обеспечения соответствующего температурного потенциала предназначена холодильная установка, в испарителе которой происходит охлаждение утилит испаряющимся хладагентом.

Тепло, снятое в испарителе, передается в конденсаторе охлаждаемой среде: обротной воде или потоку воздуха (см. рис. 1):

$$Q_k = Q_{C1} + Q_{C2} + Q_{C3} + W, \quad (1)$$

где  $W$  – работа, затраченная на сжатие паров хладагента в компрессоре.

В существующих холодильных системах предприятий пищевой промышленности Украины это тепло практически не используется, то есть выбрасывается в окружающую среду:

$$Q_k = Q_{\text{сброс}}. \quad (2)$$

Анализ холодильных систем отечественных пищевых производств показывает, что в основном в них в качестве хладагента применяется аммиак ( $\text{R717}$ ). Аммиак обладает благоприятными для его использования как хладагента теплофизическими свойствами и высоким термодинамическим совершенством [3, 4]. Аммиак не разрушает озоновый слой ( $\text{ODP}=0$ ) и не оказывает прямого действия на увеличение парникового эффекта ( $\text{GWP}=0$ ). Резкий характерный запах, присущий аммиаку, и проявляющийся на уровне предельно допустимой концентрации в рабочей зоне является хорошим индикатором утечки [5]. Негативными свойствами аммиака являются токсичность, взрывоопасность и горючесть при концентрациях, указанных в ГОСТ 6221-90Е.

Поток паров аммиака после испарителя поступает в компрессорное отделение, где происходит его сжатие до 10–15 кг/см<sup>2</sup>. Как известно аммиак имеет наиболее существенный перегрев после сжатия среди хладагентов, поэтому температура нагнетания паров аммиака после компрессорного отделения составляет 80–120 °С. Охлаждение перегретых паров аммиака происходит в предконденсаторах (форконденсаторах) или непосредственно в конденсаторах, однако это тепло не используется:

$$Q_{\text{охл}} + Q_k = Q_{\text{сброс}}, \quad (2a)$$

где  $Q_{\text{охл}}$  – количество тепла, отданное перегретыми парами аммиака при их охлаждении до температуры конденсации;  $Q_k$  – количество тепла, отданное парами аммиака при их конденсации.

Результаты обследования аммиачных холодильных установок украинских предприятий пищевой промышленности показали, что фактическое количество сбросного тепла конденсационного отделения является близким по величине к количеству тепла, вырабатываемого котельной, однако, в основном, это тепло с невысоким температурным потенциалом, определяемым температурой конденсации насыщенных паров ам-

миака при давленні сжаття (27–35 °С). Сбросное тепло, отведенное при охлаждении перегретых паров аммиака до температуры конденсации составляет около 15–20 % всего количества тепла после компрессора, однако температурный потенциал этого тепла существенно выше, 80–120 °С.

Утилизация сбросного тепла после компрессорной установки зависит от потребностей технологических процессов, теплоснабжения и горячего водоснабжения в теплоносителе различных температурных потенциалов.

В качестве примера рассмотрим один из сыродельных заводов Харьковской области. Функциональная схема производства твердого сыра представлена на рис. 2.

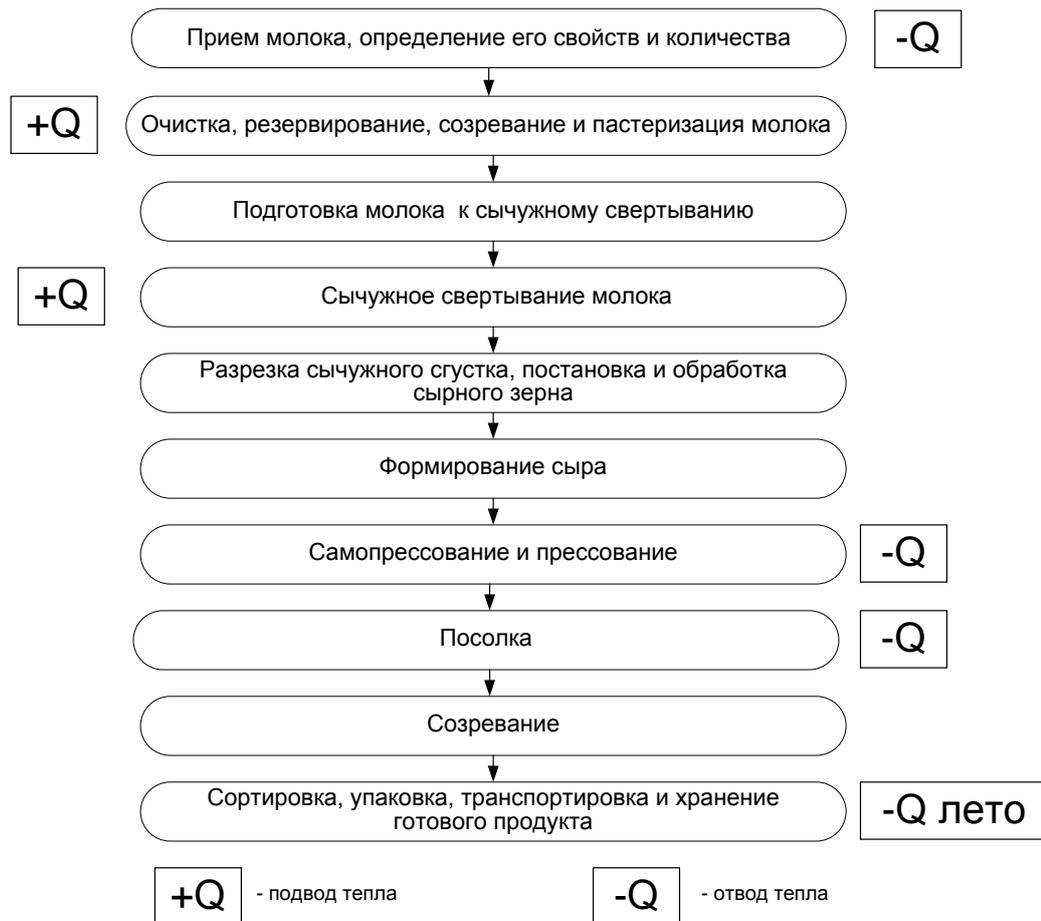


Рисунок 2

Тепло с самым высоким температурным потенциалом требуется для пастеризации молока. В зависимости от качества получаемого молока для пластинчатых пастеризаторов требуемая температура горячей воды для нагрева молока до температуры пастеризации составляет 78–90 °С. Затем идет горячая вода на отопление помещений (50–80 °С), горячая вода для промывки оборудования и другие нужды (50–60 °С), горячая вода на сычужное свертывание молока (28–34 °С) – первое нагревание, 36–58 °С – второе нагревание в зависимости от сорта сыра). В некоторых производствах термическую обработку получаемого молока не производят с целью повышения его сыропригодности [1]. Кроме того, требуется подогрев сырой воды до 30–32 °С перед химводоподготовкой котельной.

Тепловая энергия, которую необходимо отвести от паров аммиака после компрессора (отделение конденсации) не используется. Решить задачу утилизации тепла газообразного аммиака можно с помощью пластинчатого теплообменного аппарата за счет высокой степени рекуперации тепловой энергии в теплообменнике.

Высокоэффективные пластинчатые теплообменники применяются в холодильных технике в качестве испарителей, конденсаторов, маслоохладителей для аммиачных и фреоновых холодильных установок, охладителей молока, пива, воды, масел, газов, химикатов, конденсатоохладителей в системах теплоснабжения, утилизаторов тепла. В холодильных установках молочной промышленности могут использоваться полусварные, сварные, никельпаяные, медно-паяные и разборные пластинчатые теплообменные аппараты.

Полуразборные теплообменники (Рис. 3) применяются как в аммиачных, так и во фреоновых циклах, где можно позволить использовать непосредственное охлаждение конечного продукта за счет надежного разделения теплоносителя и хладагента. В полуразборных пластинчатых теплообменниках сварные каналы чередуются с каналами, герметизированными традиционными прокладками. Хладагент циркулирует по сварным каналам, с ним контактируют только две кольцевые прокладки в отверстиях, соединяющих каналы. Эти прокладки изготавливаются из особо стойких материалов и устанавливаются без клея, что значительно упрощает их замену. Каналы вторичного хладоносителя уплотняются обычными прокладками из эластомера. Двойное уплотнение и пластины из коррозионно-стойкого материала предотвращают смешение циркулирующих сред, обеспечивают отсутствие механических напряжений в сварных швах, а также делают конструкцию гибкой и при этом виброустойчивой.

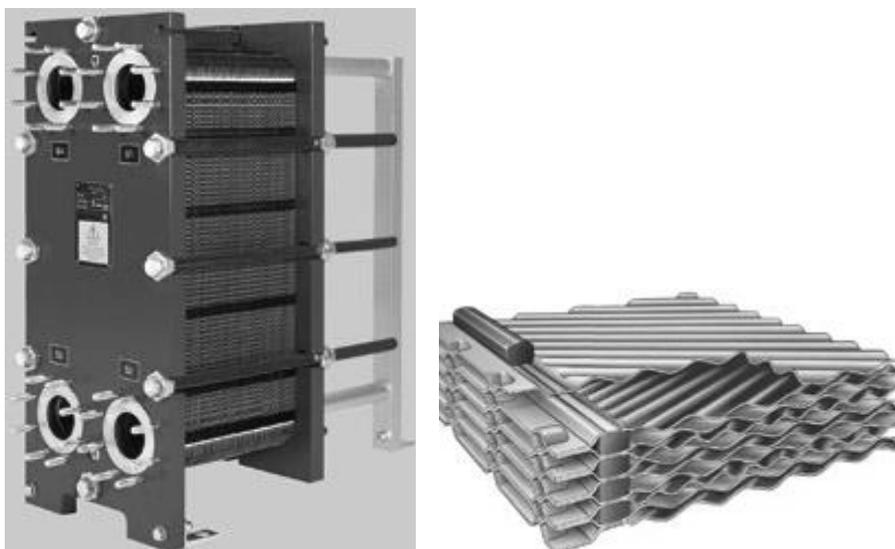


Рисунок 3

Конструктивные особенности пластинчатых теплообменных аппаратов позволяют легко объединить в одном агрегате несколько таких теплообменников, например, из двух полуразборных пластинчатых теплообменников можно скомпоновать один агрегат с функциями “предконденсатор/конденсатор” или “маслоохладитель / конденсатор”(рис. 4). Это позволяет конструировать агрегаты, имеющие одну раму, но выполняющие две функции, что снижает затраты, а также уменьшает габариты оборудования

и место, занимаемое на полу. При необходимости повышения производительности или изменения температурного режима поверхность теплопередачи можно увеличить, установив дополнительные кассеты. Диапазон производительности полуразборных аппаратов от 50 до 8000 кВт[6].

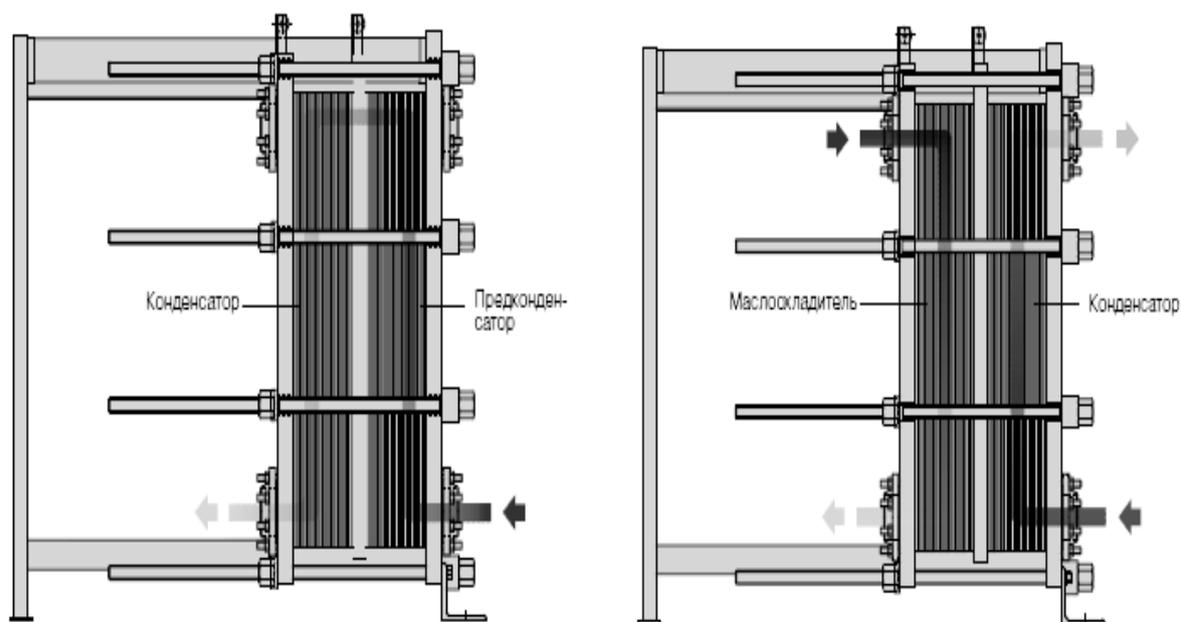


Рисунок 4

Поскольку в пластинчатом теплообменнике среда течет через каналы с гофрированными стенками, а теплообмен осуществляется через тонкие пластины, эффективность теплопередачи чрезвычайно высока. Турбулентность потока препятствует образованию отложений и увеличивает коэффициент теплопередачи, что позволяет эффективно использовать его даже при малой разности между температурой испарения и температурой охлаждаемой воды. Это, в свою очередь, обеспечивает экономию эксплуатационных расходов благодаря высокому холодильному коэффициенту. Применение полуразборных пластинчатых теплообменников дает следующие практические преимущества:

- меньший вес;
- меньшее занимаемое пространство;
- меньшая масса заправляемого хладагента.

Полуразборный пластинчатый теплообменник состоит из попарно сваренных пластин, образующих каналы, ограниченные сваркой, так называемые кассеты.

#### Характеристики кассет

Существуют три типа каналов, образуемых смежными пластинами и отличающихся углом между гофрами пластин:

*L-каналы* – предназначены для работы при больших значениях расхода сред и разности температур (температуры охлаждаемой среды на выходе и охлаждающей среды на входе).

*М-каналы* – предназначены для работы при средних значениях расхода и разности температур.

*Н-каналы* – предназначены для работы при низких значениях расхода и разности температур.

М-каналы состоят из одной L-пластины и одной Н-пластины.

Для охлаждения агрессивных жидкостей можно использовать пластины из специальных материалов.

Полусварной пластинчатый теплообменник выдерживает резкие перепады температур, а из-за близкого расположения точек крепления в нем не возникают вибрации.

В полусварном пластинчатом теплообменнике не существует цельносварного пакета пластин, так как кассеты уплотняются между собой через эластичные прокладки. Это существенно повышает надежность конструкции пакета при циклических нагрузках, а также при локальном замерзании.

Сварной пластинчатый теплообменник представляет собой пакет гофрированных пластин, соединенных методом лазерной или диффузионной сварки. Гофры на соседних пластинах направлены в противоположные стороны. Этот пакет смонтирован на раме между неподвижной и подвижной плитами, которые скреплены стяжными болтами. Присоединительные патрубки расположены на передней плите и имеют уплотнение, которое приваривается к пакету пластин. Сварные теплообменники применяются практически для работы в более широком диапазоне температур и давлений. Мощность от 50 до 3000 кВт. При выборе сварных теплообменников на позицию конденсатора/предконденсатора необходимо учитывать возможные циклические нагрузки, которые обуславливаются компрессионным оборудованием.

Никельпаяные теплообменники используются преимущественно в аммиачных циклах на небольших мощностях от 1 до 500 кВт.

Медно-паяные теплообменники широко применяются в фреоновых холодильных циклах. Взаимодействующие среды надежно разделены, что позволяет использовать непосредственное охлаждение. Спектр медно-паяных теплообменников значительно расширяется в последнее время за счет создания принципиально новых конструкций.

Пластинчатые теплообменники имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с кожухотрубными теплообменниками, которыми оснащены все холодильные системы на Украине, спроектированные 20–30 лет назад [9]:

- маленький внутренний объем, благодаря чему количество хладагента в системе удастся сократить в 10 раз, особенно это актуально для аммиачных систем, т.к.;
- в 3 раза компактнее и более чем в 6 раз легче при одинаковой мощности;
- высокие значения коэффициента теплопередачи, за счет высокой турбулентности и малой толщины пластин (примерно в 2–4 раза выше, чем в кожухотрубных) и, как следствие – компактность, уменьшение монтажных и эксплуатационных затрат, уменьшение энергозатрат;
- эффективное использование тепловой энергии (КПД до 99 %);
- при необходимости есть возможность увеличения поверхности теплопередачи (за счет увеличения количества пластин) без установки дополнительного теплообменного оборудования;
- надежны и просты в установке и не требуют специального фундамента;
- не требуют больших затрат на обслуживание, ремонт. Возможность 100 % очистки разборных пластинчатых теплообменников;

– удобство в експлуатації та довговечність.

Центром інтегрованих енергосберегаючих інтегрованих технологій НТУ «ХПІ» спільно з АО «Содружество-Т» була розроблена і виготовлена модульна установка охолодження газообразного аміака на базі полусварного пластинчатого теплообмінника M10-BWFDR. Основна задача, виконувана установкою – утилізація теплоти перегретого пара аміака існуючої холодильної установки підприємства[7]. Принципіальна схема установки показана на рис. 5.

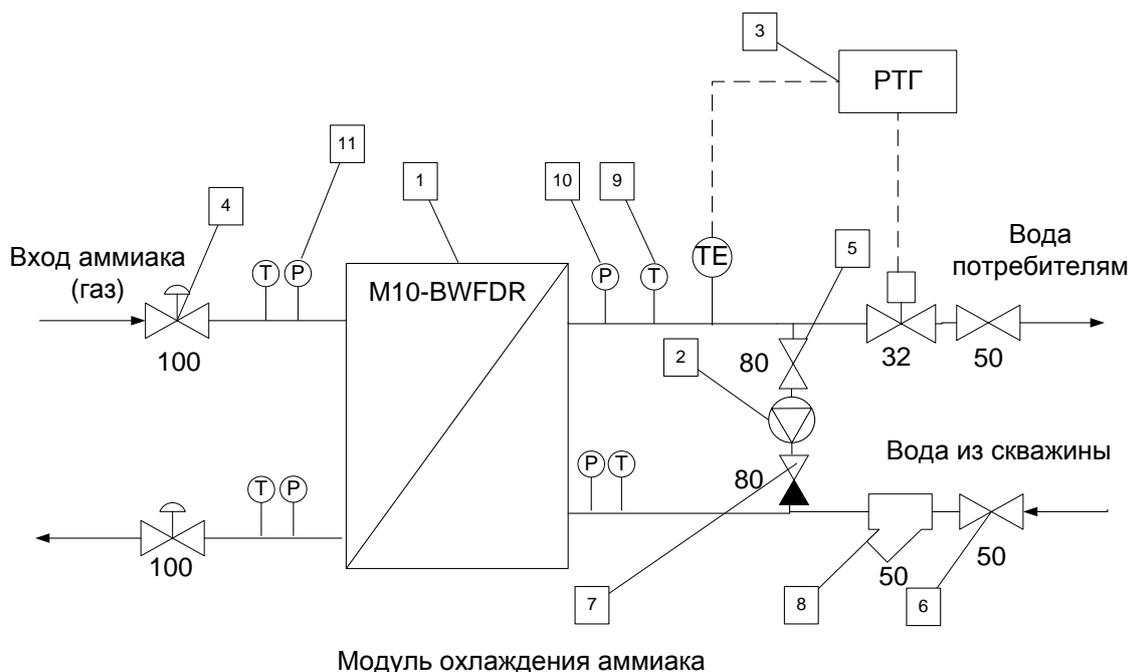


Рисунок 5

Потенціал тепла, яке можна отримати при охолодженні аміака від температури нагнетання компресора 100–120 °С до температури конденсації 28–30 °С становить приблизно 483 кВт. Температура нагрітої води со скважини може становити від 50 °С до 75 °С.

Дане тепло можна використовувати в трьох напрямках:

- приготування гарячої води для технологічних потреб;
- приготування гарячої води для теплоснабження і гарячого водоснабження;
- підігрів сирової води, поступаючої на водопідготовку котельної підприємства.

Теплоту в циклі охолодження можна утилізувати двома способами: використовувати всю теплоту конденсації для нагріву води (або повітря) до відносно низької температури конденсації, або нагрівати в спеціальному пароохладителі менше кількість води до температури, близької до фактичної температури хладагента (в ПТО різниця температур може досягати 1–2 °С). Використання енергії конденсації з температурою до 35 °С практично безкорисно для потреб підприємства, тому був вибраний варіант використання одноцільової теплонасосної установки охолодження пара хладагента[10].

В результаті розрахунків, виконаних з допомогою відповідного програмного забезпечення, на позицію охолодження газообразного аміака був вибраний тепло-

обменный модуль на базе полусварного ПТА М10-BWFDR с толщиной пластины 0,6 мм. В системе автоматики теплообменного модуля предусмотрена установка автоматического регулятора температуры РТГ-32 производства АО "Содружество-Т". Общий вид модуля в сборе приведен на рис. 6.

Мероприятия по модернизации существующей холодильной установки были разработаны таким образом, что монтаж и пусконаладка теплообменного оборудования не должны были влиять на работу аммиачного отделения и котельной, т.е., нет необходимости в остановке производства или изменении технологических режимов работы завода. Совместно с НПП «ХОЛОД» была разработана проектно-конструкторская документация реконструкции компрессорно – конденсаторного отделения сыродельного завода. На рис. 7 показано размещение модульной установки в существующую схему холодильной установки.

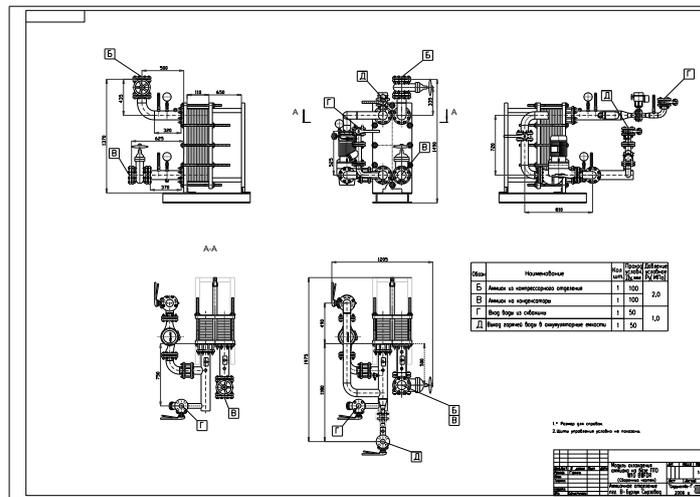


Рисунок 6

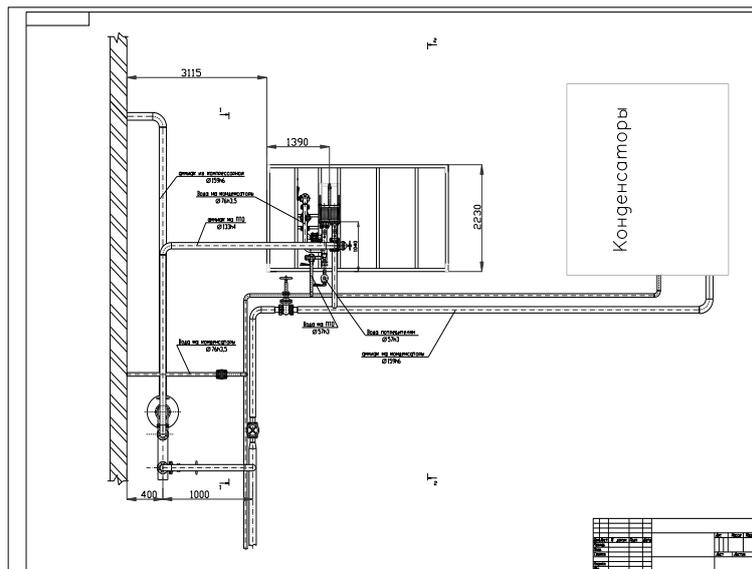


Рисунок 7

Была исследована возможность увеличения теплового потенциала нагреваемого теплоносителя. Это возможно при применении дополнительной компрессии хладагента с целью увеличения температуры конденсации [8]. С помощью программного обеспечения Aspen HYSYS был смоделирован цикл холодильной установки – теплового насоса, где часть потока паров аммиака компримировалась и конденсировалась при давлении 2,7 МПа. (рис. 8).

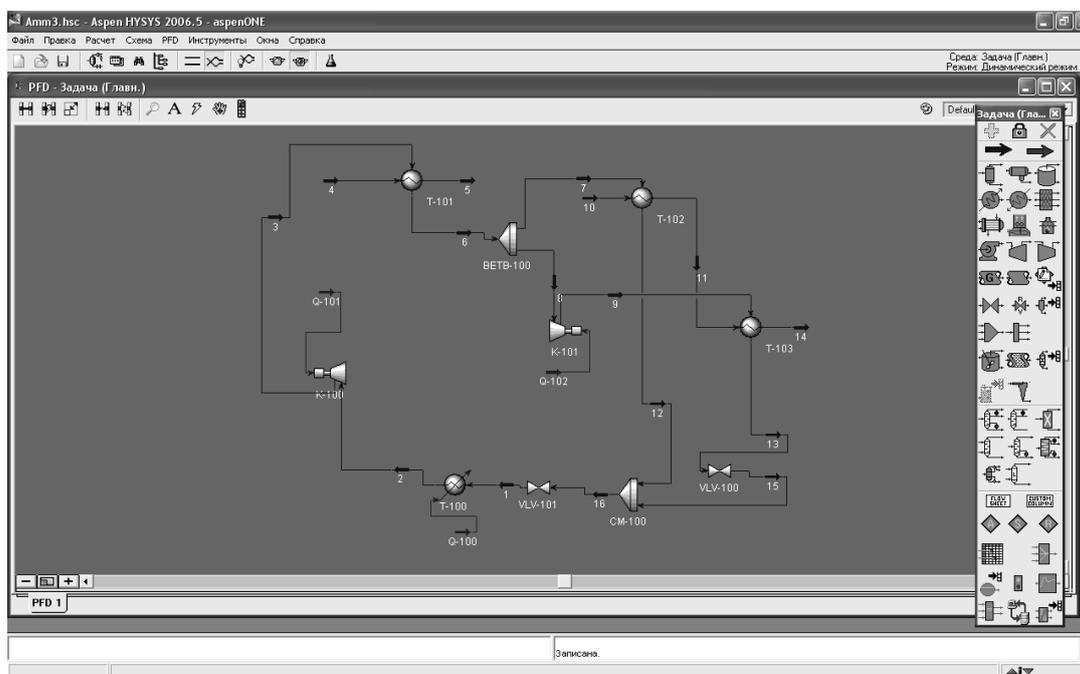


Рисунок 8

Величина тепловой энергии, полученной при конденсации паров аммиака с температурой 61 °С составила 1,150 МВт. Эффективное использование этого тепла позволило бы сократить потребление пара на предприятии до 80 %. Однако это техническое решение связано с увеличением капитальных затрат и необходимости установки нового оборудования, обеспечивающего надежную работу холодильной установки при более высоких значениях давления и температуры хладагента.

Таким образом, можно сделать вывод, что внедрение энергосберегающих мероприятий, в которых используется сбросное тепло холодильной установки является перспективным и актуальным в условиях повышения цен на энергоресурсы. Снижение выработки тепла котельной за счет сжигания топлива позволит уменьшить выбросы продуктов сгорания в окружающую среду. При модернизации холодильных систем предприятий пищевой промышленности, то есть при одновременной выработке тепла и холода, необходимо учитывать индивидуальные технико-экономические факторы для каждого конкретного предприятия, которые будут обуславливать целесообразность внедрения энергосберегающих технологий и оборудования, в том числе и теплонасосных установок.

#### Литература

1. Товажнянский Л.Л., Бухкало С.И., Капустенко П.А., Хавин Г.Л. Основные

технологии пищевых производств и энергосбережение: Учебн. пособие. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005.

2. Общая технология пищевых производств. (под ред. Ковальской Л.П.) М, Колос, 1993, 384 с.

3. Овчаренко В.С., Афонский В.Л. Основные аспекты комплексного подхода к расширению применения аммиачного оборудования в холодильной промышленности // Холодильная техника. – 2001.– №7. – С. 13–15.

4. Перельштейн И.И., Парушин Е.Б. Термодинамические и теплофизические свойства рабочих веществ холодильных машин и тепловых насосов.– М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 232 с.

5. Братута Э.Г., Шерстюк В.Г. Основные аспекты комплексного подхода к расширению применения аммиака в холодильной промышленности. <http://kholod.valor.ua/articles/30.html>

6. A Technical Reference Manual For Plate Heat Exchangers in Refrigeration & Air conditioning Application By Dr. Claes Stenhede/Alfa Laval AB Fifth edition, February 2nd, 2004. Alfa Laval AB.

7. Tovazhnyansky L., Sherstyuk V., Kapustenko P., Khavin G. Perevertaylenko O., Boldyrev S., Garev A. Plate heat exchangers for environmentally friendly heat pumps. Chemical Engineering Transactions. Volume 12, 2007, p. 213–217.

8. Panno G., Auguanno S., Messineo A., Panno D. Ammonia heat pump for energy saving in food industrial processes: the case of cheese factory. IIR Conference: Ammonia Refrigerating Systems, Renewal and Improvement, Ohrid, 2005.

9. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Хавин Г.Л., Арсеньева О.П. Пластинчатые теплообменники в теплоснабжении: Монография – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007.

10. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульянов Л.М., Болдырев С.А., Гарев А.О. Интеграция цикла аммиачного охлаждения в теплосеть сыро-молочного завода. // Інтегровані технології та енергозбереження. Харьков. 2005, №2. С. 92–100

УДК 662.6

Товажнянський Л.Л., Гарєв А.О., Арсеньєва О.П., Перевертайленко О.Ю.

**ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ  
ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ ПЛАСТИНЧАСТИХ ТЕПЛОБМІННИХ АПАРАТІВ  
ПРИ ІНТЕГРАЦІЇ ТЕПЛОНАСОСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
У ПРОМИСЛОВІ ХОЛОДИЛЬНІ ЦИКЛИ**

Було розглянуто питання застосування вискоефективних пластинчатих теплообмінних апаратів, як важливих компонентів промислових холодильних циклів. Розроблено пілотну модульну установку утилізації тепла перегрітих парів аміаку. Одночасне вироблення тепла і холоду дозволяє знизити споживання енергоносіїв та зменшити рівень шкідливих викидів у довкілля.