



ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ НА ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА ДЛЯ ВИНОДЕЛИЯ, ПТИЦЕВОДСТВА И МОЛОЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ШИТ М.Л., АНДРОНАТИЙ Н.Р., ИОЙШЕР А.М., ТИМЧЕНКО Д.В., ШИТ Б.М.

Институт энергетики Академии Наук Молдовы

Реферат. Рассмотрены новые схемы применения тепловых насосов в виноделии, птицеводстве, молочной промышленности, а также термодинамические циклы и экономическая эффективность этих теплонасосных установок.

Ключевые слова: пищевая промышленность, тепловые насосы, диоксид углерода.

CARBON DIOXIDE HEAT PUMPS FOR VINE, POULTRY AND DAIRY INDUSTRY

SIT Mikhail, ANDRONATY Nikolai, IOISHER Anatoly, TIMCHENKO Dmitry, SIT Boris

Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova

Abstract. New schemes of heat pumps use in winemaking, poultry and dairy industry are studied. Heat pumps thermodynamic cycles and heat pump stations economic efficiency data are shown as well.

Keywords: food industry, heat pumps, carbon dioxide.

POMPELE DE CĂLDURĂ PE DIOXID DE CARBON PENTRU VINIFICAȚIE, AVICULTURĂ ȘI INDUSTRIA DE PRELUCRARE A PRODUSELOR LACTATE

ȘIT Mihail, ANDRONATI Nicolai, IOIȘER Anatolii, TIMCENCO Dumitru, ȘIT Boris

Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei

Rezumat. Sunt examinate schemele nouă de utilizare a pompelor de căldură în vinificație, avicultură și în industrie de prelucrare a produselor lactate. De asemenea sunt studiate cicluri termodinamice și eficiență economică a instalațiilor cu pompele de căldură.

Cuvinte-cheie: industria alimentară, pompele de căldură, dioxid de carbon.

1. ВВЕДЕНИЕ

Снижение потребления энергии в агропромышленном комплексе является жизненно важным для Республики Молдова. Одним из путей решения этой задачи является использование низкопотенциальной теплоты, вырабатываемой на различных стадиях технологических процессов производства продукции. На примерах трех отраслей рассмотрим применение тепловых насосов.

2. ПРИМЕНЕНИЕ ТНУ В ВИНОДЕЛИИ

В виноделии при производстве вина широко используются процессы брожения, криомацерации, охлаждения вина и охлаждения помещений для хранения вина.

В условиях острого энергетического кризиса следует обратить особое внимание на переход к снижению энергоемкости пищевых продуктов. Такой переход невозможен без привлечения в технологии современного энергетического оборудования – теплонасосных установок (ТНУ). Именно эти установки позволяют решать энерготехнологические задачи на передовом уровне.

В связи с тем, что при брожении и обработке вин теплом ТНУ должна работать при переменной

тепловой нагрузке и при переменных температурных уровнях работы конденсатора (или газоохладителя для случая ТНУ на диоксиде углерода) теплового насоса возникает задача разработки термодинамических циклов и системы управления, обеспечивающих высокий коэффициент тепловой эффективности изделия. Кроме того, в связи с необходимостью перехода на природные хладагенты, необходимо использовать в ТНУ в качестве рабочего тела диоксид углерода, а работа ТНУ при использовании диоксида углерода на переменных режимах испарителя и газоохладителя мало исследована. Использование теплонасосной установки (ТНУ) рассмотрим при проведении таких операций, как брожение, обработка вина теплом и холодом, криомацерация и мацерация мезги. Одновременно с криомацерацией при температуре 2-5°C можно проводить термомацерацию при температуре 40-75°C и, при необходимости, подогревать бродящее сусло при низких температурах окружающего воздуха. Одновременно с брожением сусла при температуре 12-16°C при брожении по «белому» способу можно проводить обработку кагора при температуре 60-65°C. Среди технологических процессов, в которых можно использовать ТНУ на винодельческих заводах, по мере развития сезона переработки винограда, можно указать на следующие:

криомацерация и термомацерация мезги, отстой сусла, брожение сусла, экстракция сахара из выжимок, обработка вина холодом, хранение вина на холоде. Параллельно с криомацерацией на заводах по производству вина может производиться термомацерация при температуре 60-70 °С в такого же типа резервуарах для изготовления сухого вина в течение 0,5 часа и для кагора в течение 12 часов. После нагрева мезги ее необходимо охладить в потоке до 28°С при температуре хладагента 4-10°С. Обычно для этого используется холодная вода. Теплоту воды, используемой для охлаждения мезги, можно использовать в тепловом насосе для получения воды для санитарных и технических нужд вместо использования для этого котельной. После завершения криомацерации тепловой насос может быть использован для охлаждения сусла в емкости с рубашкой или в потоке до 10-14°С. Тепло, выделяющееся при этом процессе, может быть использовано для мойки и дезинфекции высвобождающихся емкостей. Режим работы испарителя при этом 5 °С, а газоохладителя 65 °С.

ТНУ состоит из двухступенчатого компрессора 1 (1-1 и 1-2 – ступени компрессора), охладителя газа второй ступени 2, газоохладителя 3, переохладителя газа 4, регулирующего клапана давления компрессора 5, ресивера 6, регуляторов расхода через первый и второй испарители 7,11, промежуточных емкостей 8 и 12, регулирующих клапанов давления испарителя 9, 13, испарителей 10,14 (один испаритель (поз.10) используется в системе управления брожением, а другой (поз.14) в технологическом процессе криомацерации), инжектора (смесителя) 15, с регулируемым приводом 16, аккумулятора 17 (он же отделитель жидкости), перегревателя газа перед первой ступенью компрессора 18. Особенностью схемы является то, что регуляторы расхода газа через испарители расположены перед регуляторами давления испарителей, и то, что перепад давления на них больше зависит от расхода, чем перепад давления на регуляторах давления. Схемы ТНУ для виноделия приведены на рис.1. и рис.2. В режиме охлаждения вина (при температуре испарителя -8 °С и одновременного получения горячей воды (или нагрева виноматериала) до температуры 65 °С установка (рис.1) имеет COP=4,3. Это значение величины COP – для случая использования одного испарителя (для обработки виноматериалов холодом), а при использовании двух испарителей (второго для обслуживания установок для брожения), когда второй испаритель имеет более высокую температур кипения, COP установки будет выше [1, 2].

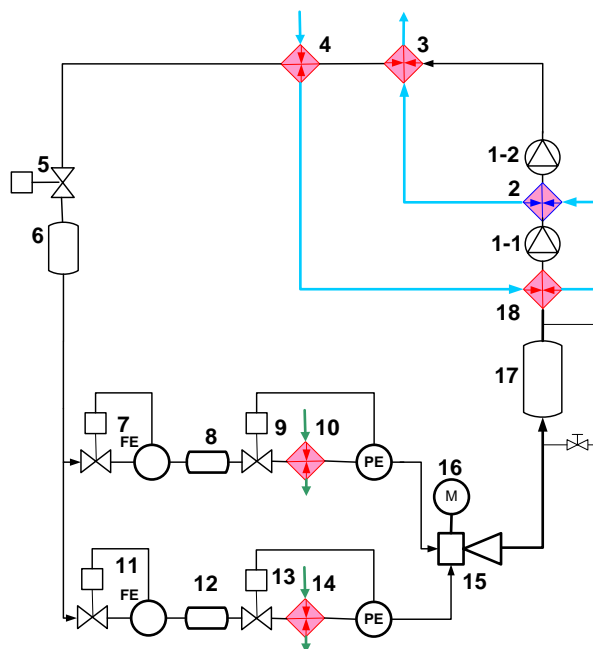


Рис.1. Схема двухрежимной ТНУ для виноделия

Ресиверы 6, 8,12 служат для обеспечения надежной работы клапанов 5, 7, 11 в жидкой среде. Эжектор 15 служит для смешивания газов на выходе испарителей 10 и 14.

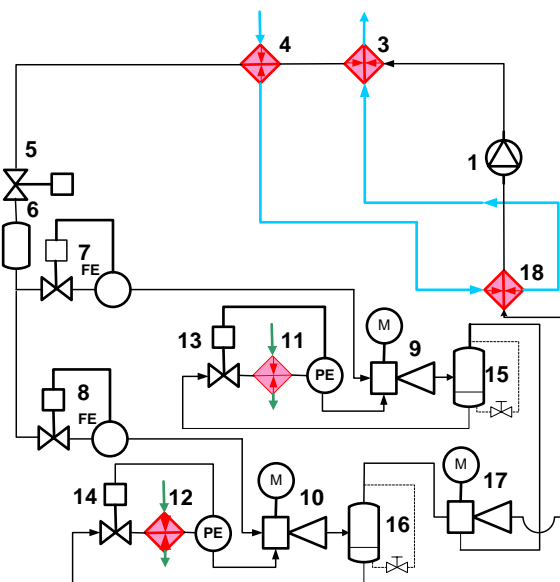


Рис.2. Схема ТНУ с эжекторами в контурах циркуляции испарителей

Рассмотрим пример ориентировочного расчета дисконтированного срока окупаемости установки с номинальной мощностью газоохладителя 200 кВт, COP=4,35, номинальной мощностью испарителя 145 кВт, в зависимости от годового времени эксплуатации установки при заданных тарифах на газ и электрическую энергию. Приближенным расчет является, так в каждом конкретном случае необходимо знать время работы второго испарителя (предназначенного для охлаждения резервуаров с сусликом, участия в процессе криомацерации и т.д). Электрическая мощность, потребляемая газовым

котлом на 200 кВт, принята равной 5 кВт, мощности насосов для перекачки воды не учитываются. Холодильный коэффициент серийной холодильной установки принят равным 4,3. Результат расчета приведен на рис.3.

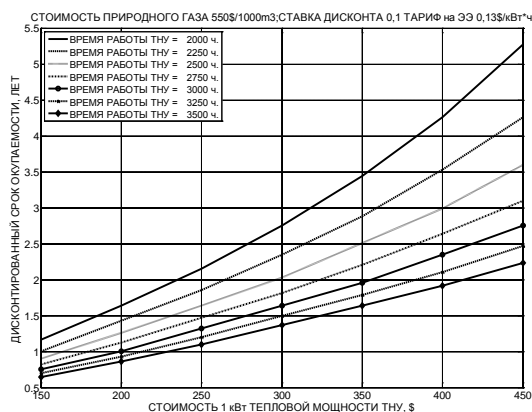


Рис.3. Зависимость дисконтированного срока окупаемости от периода эксплуатации ТНУ

Из рассмотрения графика следует, что при существующих ценах на рынке на ТНУ, применение их в виноделии в условиях Республики Молдова рационально.

3. ПРИМЕНЕНИЕ ТНУ В ПТИЦЕВОДСТВЕ

Анализ потребности в энергии птицеводческих предприятий в зависимости от вида и возраста птицы, климатических условий, теплотехнических характеристик ограждающих конструкций помещений показал, что на долю обеспечения микроклимата приходится от 40 до 75 % ее годового потребления. В связи с этим в условиях возрастающего дефицита энергоресурсов важнейшей задачей является разработка оборудования, способного реализовать энергосберегающие технологии создания микроклимата. В работе Э. Майляна «Микроклимат в бройлерном производстве» отмечается, что вентиляция в помещении птичника должна составлять 0,8...1,0 м³/кг. живого веса птицы в час, температура воздуха от 33...35 оС до 20оС при относительной влажности воздуха 55...75% до 50...65% в зависимости от возраста птицы (0...14 дней, 29-40 дней). При повышении температуры наружного воздуха уровень вентиляции должен повышаться – для удаления избыточного тепла, выделяемого бройлерами. В настоящее время в птичниках применяют нагрев воздуха, как с помощью калориферов, так и с помощью газогенераторов. Принцип действия системы второй системы воздушного отопления заключается в прямом сжигании природного газа в потоке чистого воздуха, забираемого снаружи птичника и подаваемого в рабочее помещение. Одним из основных факторов, влияющих на эффективность птицеводческого производства, является создание оптимальных условий для выращивания и содержания птицы. Оптимальное управление микроклиматом позволяет

увеличить сохранность птицы, повысить привесы, значительно экономить энергоресурсы и уменьшать расходы на обслуживание и эксплуатацию оборудования

(<http://www.reserv.ru/mods/fullarticle/11.html>).

Типовым решением для вентиляции птичников является применение рекуперативных теплообменников с незамерзающим теплоносителем и последующим подогревом приточного воздуха. Недостатком такого решения является обледенение вытяжного теплообменника при отрицательных температурах вытяжного воздуха и невысокая эффективность рекуперативного теплообменника. Все известные способы предотвращения обмерзания, кроме повышения температуры притока, тем или иным образом снижают тепловую мощность, отбираемую от вытяжного воздуха, чтобы обеспечить соблюдение уровня предельной температуры вытяжного воздуха. При этом по мере снижения температуры приточного воздуха увеличивается величина тепловой мощности для нагрева этого воздуха не только из-за роста разности температур, но и вследствие снижения допустимой эффективности рекуперации. Применение ТНУ в системах рекуперации повышает эффективность рекуперации, снижает расходы на обогрев птичников. Схема использует в качестве основы схемы, разработанные в [3-5] и отличается от них повышенным COP и снижением возможных потерь хлористого кальция из-за его уноса в контактный теплообменник за счет выполнения промежуточного контура в виде двух отдельных контуров, причем мощность промежуточного контура с хлористым кальцием в 3,5-4 раза ниже мощности контура с пропиленгликолем. Вытяжной вентиляционный воздух 2, подаваемый вентиляторами 12 из помещения, после прохождения общего короба, проходит через рекуперативный теплообменник 4, контактный теплообменник 9 и удаляется из здания (рис.3). На схеме (рис.3) позицией 9.1. обозначен резервуар для сбора промежуточного теплоносителя (ПТ), протекающего через теплообменник 9. Чистый приточный воздух 1 забирается снаружи здания, проходит через поверхностный теплообменник 3, теплообменник 10 и вентиляторами 11 подается в помещение. Первый контур промежуточного теплоносителя включает в себя насос 19, регулирующий клапан 19.1, промежуточный резервуар 9.1 и вторичные линии теплообменников 8, 9, 4. Второй контур промежуточного теплоносителя включает в себя насос 18, промежуточный резервуар 3.1 и регулирующий клапан 18.1, вторичные линии теплообменников 7, 4, 3, 10, 6, делительный клапан 18.2. Предполагается, что промежуточные резервуары 3.1. и 9.1. расположены выше соответствующих насосов 18 и 19.1. Теплообменник 10 нагревает приточный воздух до необходимой температуры за счет теплоты, вырабатываемой в газоохладителе 6. В качестве промежуточного теплоносителя в этом контуре может быть использован 25% раствор полиэтиленгликоля в воде.

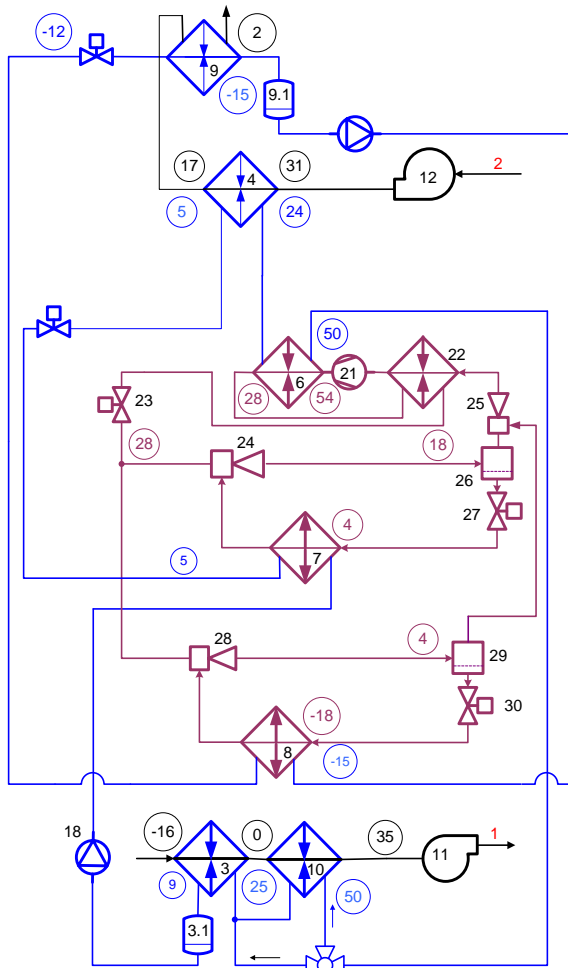


Рис.3. Схема установки утилизации удаляемого из птичника воздуха с тепловым насосом (в холодном периоде года)

В газоохладитель 6 поступает промежуточный теплоноситель, нагретый в теплообменнике 4 за счет воздуха, удаляемого из помещения. Первый испаритель 7 теплового насоса отбирает теплоту от промежуточного теплоносителя, прокачиваемого насосом 18 из поддона 3.1 теплообменника 3. Через теплообменник 3 проходит промежуточный теплоноситель (нагретый в газоохладителе 7), который нагревает входной воздух. В теплообменнике 9 вытяжной воздух при непосредственном контакте с промежуточным теплоносителем отдает ему свою теплоту. Влага, конденсирующаяся при охлаждении воздуха, поглощается незамерзающим гигроскопическим промежуточным теплоносителем. Поэтому теплообменник не замерзает даже при охлаждении вытяжного воздуха до температуры ниже 0°C. Тепловой насос увеличивает количество теплоты, передаваемой от вытяжного воздуха к приточному воздуху путем увеличения разности температур между промежуточным теплоносителем и воздухом в контактном теплообменнике 3 и теплообменнике 9. В тепловом насосе регулируется количество теплоты, передаваемой от вытяжного воздуха к приточному воздуху за счет регулирования степени охлаждения

вытяжного воздуха и коэффициента тепловой эффективности теплового насоса. Промежуточный теплоноситель, охлаждаемый во втором испарителе 8 теплового насоса до более низкой температуры, отбирает от вытяжного воздуха большее количество теплоты, а промежуточный теплоноситель, нагретый до более высокой температуры в газоохладителе 6, отдает приточному воздуху большее количество теплоты, нагревая его в теплообменнике 10 до более высокой температуры.

Проходя через теплообменный аппарат 10 промежуточный теплоноситель (ПТ) охлаждается, передавая свою теплоту приточному воздуху. Затем он проходит контактный теплообменник 3, и теплообменник 7 (первый испаритель теплового насоса), где охлаждается до более низкой температуры, и подается теплообменник 4, в котором он далее охлаждается, отбирая теплоту вытяжного воздуха. Изменением производительности ТН можно изменять количество теплоты, передаваемой от вытяжного воздуха к приточному воздуху и по сигналу датчика температуры поддерживать заданный температурный режим в помещении. Во входном теплообменном аппарате 3 при контакте с приточным воздухом промежуточный теплоноситель отдает ему теплоту поглощенную из вытяжного воздуха. Так обеспечивается подогрев приточного воздуха. Тепловой насос увеличивает количество теплоты, передаваемой от вытяжного вентиляционного воздуха к приточному воздуху путем увеличения разности температур между промежуточным теплоносителем и воздухом в контактном теплообменном аппарате 3. Снижение температуры воздуха после теплообменника 3 компенсируется подогревом его в теплообменнике 10. Исключение обледенения теплообменника 9 обеспечивается за счет выбора температурного режима работы теплообменника и выполнения его как теплообменника оросительного типа. Для регулирования концентрации промежуточного теплоносителя необходимо иметь отдельный контур добавления концентрированного хладагента или воды (не показан). Установив насосы с регулируемым приводом в промежуточных контурах, а также изменяя площади теплообмена теплообменников 3 и 10, и расход хладагента через теплообменники 3, 10 теплового насоса становится возможным компенсировать изменение температуры на входе в птичник. Применив микроканальные теплообменники в качестве теплообменников 3, 4, 10 получим устройство с малым габаритом и высокой эффективностью. Контур, образованный элементами поз. 3, 4, 6, 10, использует в качестве теплоносителя полипропиленгликоль и обслуживает приблизительно 80% мощности передаваемой воздуху для его нагрева. Контур, образованный аппаратами поз. 8, 9 использует в качестве теплоносителя хлористый кальций и передает приблизительно 20% мощности к нагреваемому воздуху. Такое решение позволяет сократить затраты теплоты для выпаривания раствора хлористого кальция с целью восстановления его концентрации из-за разбавления влагой из воздуха, а

также снизить количество добавляемого хлористого кальция из-за его возможного уноса.

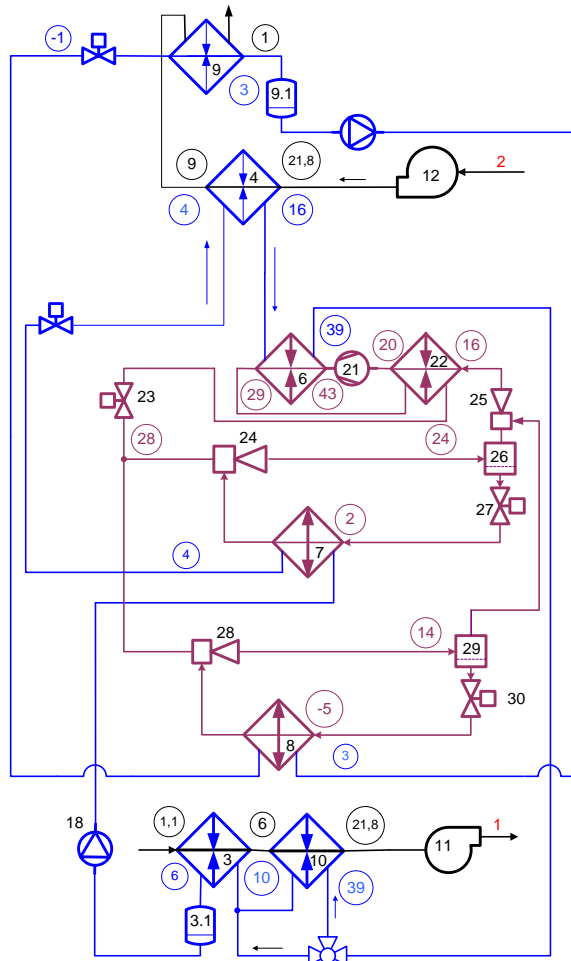


Рис. 4. Схема установки для рекуперации теплоты при работе в переходном периоде года

Дисконтированный срок окупаемости установки при стоимости 1 кВт тепловой мощности оборудования до 700 долл. за 1 кВт не более 5 лет при стоимости газа 550 долл. за 1000 м³ и тарифе на электрическую энергию 0,13 долл. за 1 кВт час.

3. ТЕПЛОВОЙ НАСОС В СОСТАВЕ ПАСТЕРИЗАЦИОННО-ОХЛАДИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ (ПОУ) ДЛЯ МОЛОКА

Рассмотрены две схемы ТНУ:

- схема ПОУ с ТНУ для климатических условий, при которых температура водопроводной воды изменяется от 4 °С до 24 °С (в этой схеме использовано два испарителя, включенных параллельно);
- схема ТНУ с использованием детандера и вихревой трубы при одном испарителе.

Особенностью первой схемы является не только получение экономического эффекта за счет разницы в цене на природный газ и электрическую энергию, но и получение дополнительно горячей воды для технологических или санитарных целей. Особенностью второй схемы является возможность получения, кроме дополнительной тепловой, еще и дополнительной электрической энергии при тех же

затратах энергии на привод компрессора, что и в первой схеме. Вторая схема более сложная и дорогостоящая. Также, применение вихревой трубы в этой схеме требует проведения определенных исследовательских работ.

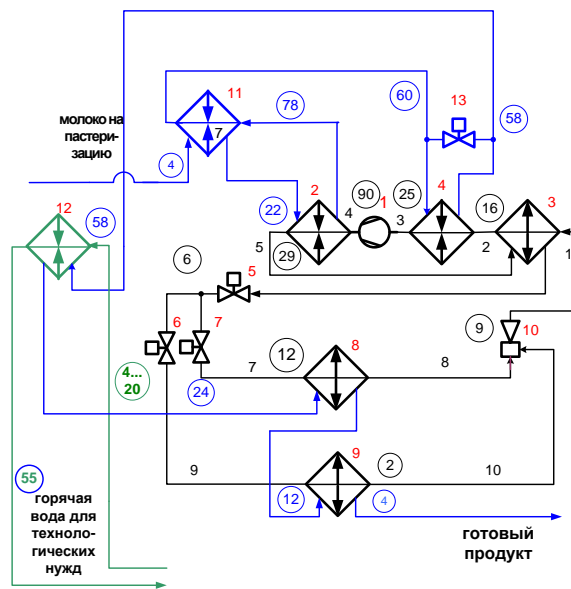


Рис. 5. Пастеризационно - охладительная установка с тепловым насосом

Установка с двумя испарителями (рис.5) состоит из компрессора 1, газоохладителя 2, рекуперативного теплообменника рабочего тела 3, теплообменника дополнительного подогрева рабочего тела 4, регулирующих клапанов 5, 6, 7 испарителей 8 и 9, эжектора 10, рекуперативного теплообменника на линии подачи холодного молока 11 и теплообменника подогрева воды для технологических нужд 12. Регулирующий клапан 13 служит для температурного регулирования режима работы теплообменника поз.4. Выдерживатель молока после пастеризации на схеме явно не показан и размещен между аппаратами 2 и 11. Зеленые линии на рис. 1 обозначают трубопроводы горячей воды для технологических или санитарных нужд. Синими линиями показаны трубопроводы подачи молока, линии черного цвета – трубопроводы хладагента. Числа черного цвета в кружках обозначают температуры сред, числа синего цвета в кружках - нумерация аппаратов в соответствии со схемой, числа черного цвета – точки соответствия схемы ТНУ и схемы термодинамического цикла. Схема работает следующим образом. Молоко поступает через рекуперативный теплообменник 11 на газоохладитель 2, где нагревается до 78°С. далее молоко после теплообменника 11 поступает на теплообменник 4, где охлаждается рабочим телом, подогревая его, и поступает далее на теплообменник 12 и испарители 8 и 9, где охлаждается до 4 °С. После теплообменника 11 можно получить (при расходе молока 2,78 л/с) до 360 кВт тепловой мощности для нагрева водопроводной воды. Теплообменник 12 должен быть выполнен с переменной поверхностью

теплообмена. Регулирование расходов и давлений на испарителях показано в виде одного регулирующего вентиля (конструктивно узел регулирования расходов должны быть выполнен в виде двух регуляторов - одного регулятора расхода и второго - регулятора давления [2]).

В схеме установки по рис. 5 производится дополнительный подогрев хладагента перед компрессором (с целью повышения COP). Для рассматриваемого варианта исходных данных COP=4,65. Нами рассматривался вариант схемы с двухступенчатым компрессором и охлаждением промежуточного теплообменника (между двумя ступенями компрессора) водой, с последующим подогревом этой воды в дополнительном теплообменнике, связанном с рекуперативным теплообменником молока 12. В этом случае можно получить значение COP=5,24, но так как нам пока не известны двухступенчатые компрессоры на диоксиде углерода, выпускаемые промышленностью, то этот вариант подробно не рассматривается. Термодинамический цикл работы установки в соответствии со схемой на рис.5 в h, p – диаграмме представлен на рис.3.

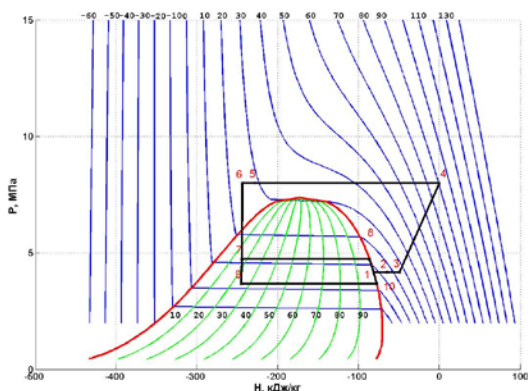


Рис. 6. Термодинамический цикл работы установки по схеме на рис.5

Вторым вариантом схемы является схема с подогревом воды с помощью вихревой трубы (рис.7) и генерацией дополнительной электрической энергии с помощью детандера. Аналог теплового насоса для этой схемы, см. [7]. Этот вариант, хотя и является более сложным и дорогостоящим, обладает рядом существенных преимуществ. Здесь поз.9 - трехпоточная вихревая труба, поз.10,11, - теплообменники для подогрева воды для санитарных и других нужд предприятия. Установка работает следующим образом. Компрессор 1 подает газ на газоохладитель 3. Газоохладитель 3 связан с первичным контуром рекуперативного теплообменника 2, который через регулирующий клапан 4 и вторичную цепь теплообменника 5 связан с детандером 6, который нагружен через теплообменник охлаждения газа (он одновременно

выполняет функцию нагрева воды для технологических целей) на вихревую трубу 9. Вихревая труба 9 через регулирующий клапан 14 связана с испарителем 10. Горячий поток из вихревой трубы поступает в теплообменник 11, который служит для нагрева воды для технологических нужд завода. С выхода холодного потока вихревой трубы поступает приблизительно 70% общего расхода хладагента. Теплообменник 12 служит для подогрева газа, поступающего на вход компрессора с использованием теплоты молока, выходящего из рекуперативного теплообменника 2.

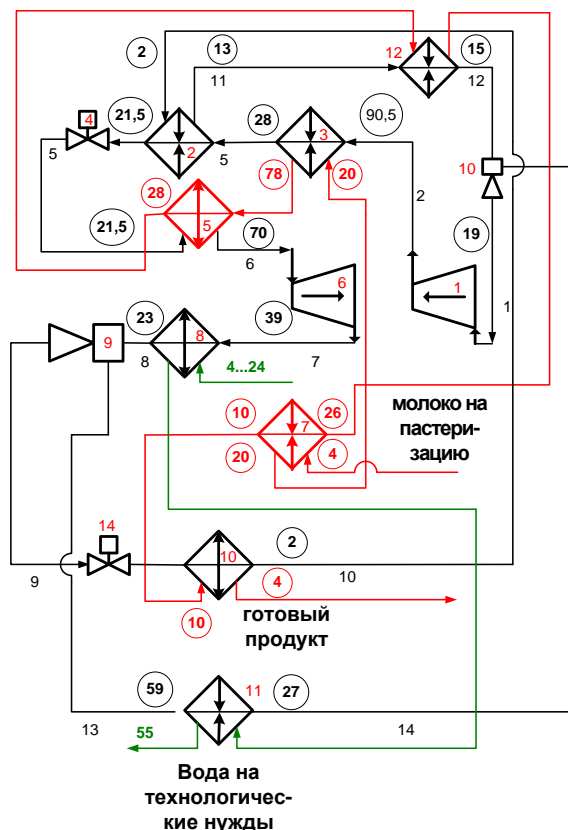


Рис. 7. Принципиальная схема установки для пастеризации - охлаждения молока с тепловым насосом с детандером и вихревой трубой

Если предположить, что путем конструктивных решений удастся охладить газожидкостную смесь на выходе из вихревой трубы на 9,6°С (с 22,6°С до 12°С), и на выходе горячего газа из вихревой трубы можно получить температуру до 60°С, то в рассматриваемом случае станет возможным (при том, что на испаритель будет подано 35% от массового расхода компрессора) получить до 100 кВт дополнительной тепловой мощности для получения воды для технологических целей. Объем электрической энергии, генерируемой генератором детандера, составляет около 20% от энергии, потребляемой компрессором.

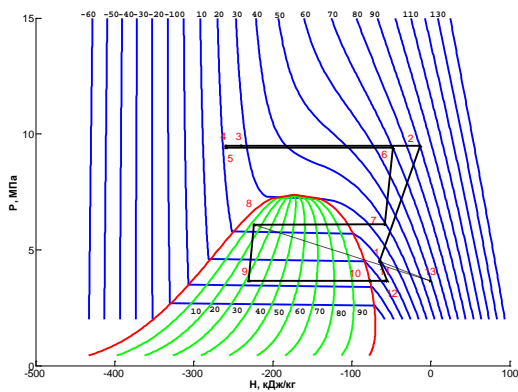


Рис. 8. Термодинамический цикл работы установки по рис.7

Зависимость дисконтированного срока окупаемости установки (рис.7) в зависимости от тарифов на электрическую энергию, цены на природный газ и стоимости 1 кВт тепловой мощности установки при $COP=4,3$ и различном годовом периоде эксплуатации установки приведен на рис.9 [6].

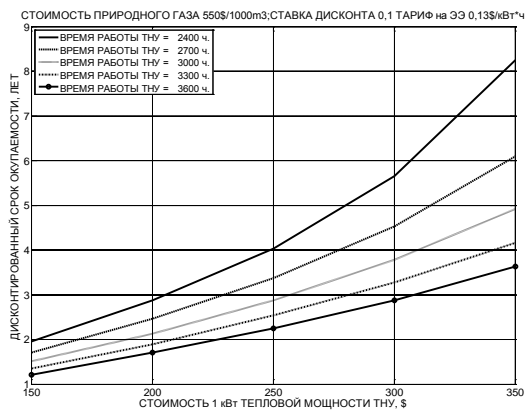


Рис.9. Дисконтированный срок окупаемости теплонасосной установки рис.5

Из рассмотрения рис.9 следует, что при определенных условиях эксплуатации и сложившихся в Республике Молдова ценах на энергоресурсы, использование таких установок является экономически выгодным.

6. ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ

Рассмотрим систему автоматического управления (САУ) газоохладителем (ГО) с регулируемым параметром - температурой продукта на выходе из ГО (рис.5). Регулирующими воздействиями являются: температура газа на входе в компрессор 1, изменяемая уровнями давления в испарителях 8 и 9, расход хладагента. Режим работы испарителя установки регулируется путем изменения расхода воды через рекуперативный теплообменник, 12, и регулирующим клапаном 7. Режим работы компрессора 1 регулируется регулятором давления 5, установленным после газоохладителя 2. Для компенсации возмущений по расходу молока, регулируют скорость

вращения электропривода компрессора, с целью поддержания постоянного соотношения расходов газа и продукта. Давление газоохладителя и испарителей регулируется по схемам, предложенным, например, в [2].

Рассмотрим процесс стабилизации режима работы установки при изменении температуры газа после компрессора. Например, пусть по каким-то причинам изотропический КПД компрессора увеличился. При этом температура на выходе компрессора уменьшилась. Предполагаем, что расход хладагента и молока постоянны. Рассмотрим объект управления с двумя выходами: температурой молока на выходе теплообменника подогрева воды и температурой на выходе компрессора. Количество управлений также может быть равно трем: это расход молока на теплообменник 4 и расход воды на теплообменник подогрева воды 12 и изменение поверхности теплообмена теплообменника. Критерием качества работы системы стабилизации является требование нахождения в допуске температуры молока на выходе из газоохладителя. Система управления температурой газа перед газоохладителем является внутренним контуром каскадной системы управления стабилизации температуры молока после газоохладителя. Структурная схема рассматриваемой системы, с учетом сказанного выше, имеет вид:

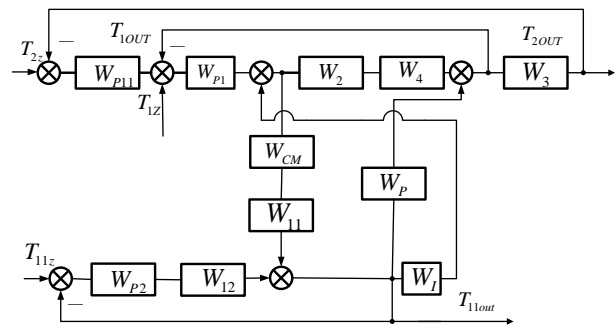


Рис.10. Структурная схема системы регулирования температуры пастеризации и стабилизации температурного режима испарителя ТНУ рис. 5

Обозначения на рис. 10: $W_4(p)$ - передаточная функция теплообменника, поз.4, см. рис. 5, по каналу "расход жидкости в первичной цепи, температура хладагента на выходе вторичной цепи"; $W_2(p)$ - передаточная функция компрессора по каналу «температура хладагента на выходе из компрессора» - «температура хладагента на входе в компрессор»; $W_3(p)$ - передаточная функция газоохладителя по каналу «температура продукта на выходе из газоохладителя» – «температура хладагента на входе в газоохладитель»; $W_{p1}(p)$ - передаточная функция регулятора контура стабилизации температуры продукта на выходе из газоохладителя (с учетом динамики регулирующего клапана) – регулятора подчиненного контура каскадной системы; $W_{CM}(p)$ - передаточная функция звена, связывающего расход молока и температуру молока на входе в

теплообменник подогрева водопроводной воды; $W_{11}(p)$ - передаточная функция теплообменника по каналу «температура первичного теплоносителя на входе» – «температура вторичного теплоносителя на выходе теплообменника»; $W_{12}(p)$ - Передаточная функция теплообменника по каналу «расход первичного теплоносителя – температура вторичного теплоносителя на выходе теплообменника»; $W_{p2}(p)$ - передаточная функция регулятора контура стабилизации температуры продукта на выходе из теплообменника подогрева водопроводной воды (с учетом динамики регулирующего клапана); $W_p(p)$ - Передаточная функция, связывающая перегрев хладагента после испарителя и изменение нагрузки; W_{p11} - передаточная функция регулятора главного контура каскадной системы; W_I - передаточная функция, связывающая температуру до испарителя и перегрев хладагента после этого испарителя; T_{1z} - задание по температуре продукта на выходе из газоохладителя; T_{1out} - температура продукта на выходе из газоохладителя; T_{11z} - задание по температуре продукта на входе в первый испаритель; T_{2z} - задание по температуре пастеризации молока; T_{2out} - температура молока на выходе газоохладителя. Вид передаточных функций теплообменных аппаратов описан в работе [2]. Для стабилизации режима системы добавлена обратная связь по температуре перегрева хладагента после первого испарителя. Детальное исследование систем управления для разработанных схем будет являться предметом дальнейших работ.

8. ВЫВОДЫ

1. Применение разработанных схем тепловых насосов на диоксиде углерода для ряда отраслей пищевой промышленности позволяет существенно снизить потребление природного газа на предприятиях промышленности, и установки с предложенными схемами могут иметь приемлемые сроки окупаемости инвестиций.

2. В схему системы регулирования температуры продукта необходимо ввести систему стабилизации температуры хладагента после компрессора, контур стабилизации температуры на входе в первый по ходу продукта испаритель, и обратную связь по температуре перегрева хладагента после первого испарителя.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шит М.Л., Балануцэ А.П., Шит Б.М. *Теплоносная установка на диоксиде углерода с испарителями, работающими на разных температурных уровнях и при переменной тепловой нагрузке*. Problemele Energeticii Regionale 2(10) 2010, с. 47-58.
- [2] Шит М.Л., Журавлев А.А., Шит Б.М. *Управление газоохладителем теплового насоса на диоксиде углерода при работе в непрерывном режиме*. Труды Одесской национальной Академии Пищевых технологий, вып.35, т.2., 2009 г. с. 241-246.
- [3] Бондаренко С.П., Гренишен Н.Т. *Установка кондиционирования воздуха*. Авт. Свид. СССР № 1121549, МКИ, F24F, 3/147, опубл. 30.10.1984.
- [4] Гренишен Н.Т. *Установка кондиционирования воздуха*. Авт. Свид. СССР № 1314201, МКИ, F24F, 3/147, опубл. 21.10.1985.
- [5] Адаменко А.И. *«Установка для кондиционирования воздуха»*. Авт. Свид. СССР № 1268896, МКИ, F24F, 3/147, опубл. 07.11.1986.
- [6] Шит М.Л., Иойшер А.М., Шит Б.М. *Тепловой насос на диоксиде углерода в сверхкритическом цикле для пастеризационно-охладительной установки*. Problemele Energeticii Regionale 2(19) 2012.
- [7] Sit B., Timcenco D., Sit M *Transcritical CO₂ Heat Pump with Expander- Ejector Cycle*. Problemele Energeticii Regionale 1(12) 2010. p.69-74.

Шит Михаил Львович – к.т.н., зав. Лабораторией «Энергетической эффективности и систем управления» Института энергетики АНМ. Область научных интересов: тепловые насосы на диоксиде углерода, автоматическое управление технологическими процессами в энергетике, промышленности, сельском хозяйстве. E-mail: mihail_sheet@yahoo.com

Иойшер Анатолий Матусович – к.ф.-м.н., зав. лабораторией Микропроводов и нитевидных наноструктур Института "ELIRI" (Кишинев). Область научных интересов: нанотехнология, сенсоры, производство тепла и холода с помощью вихревых труб и термоэлектрических тепловых насосов. E-mail: amyosher@gmail.com.

Шит Борис Михайлович – инженер-программист Института энергетики АНМ. Область научных интересов: тепловые насосы на диоксиде углерода, автоматическое управление технологическими процессами в энергетике, промышленности, сельском хозяйстве. E-mail: boris@fld.rambler.ru.