

Multifunctional Heat Pump Installation for Dairy Plants

Sit M.L., Sit B.M.

Institute of Power Engineering of the ASM
Chisinau, Republic of Moldova

Abstract. The article presents the installation based on the approach using the integration of the carbon dioxide heat pump in pasteurization and cooling installation for milk and in installations for preparing of hot and "icy" water. The scheme differs from the prototype by the use of additional heat exchangers and of their connection to the main elements of the installation. A proposed technique of elements connection in the heat pump installation permits to compensate the effect of temperature of cold water supply source, which is low-grade heat source for the heat pump, on the quality the work of the installation. The design of the installation enables to compensate the impact of seasonal variation of water temperature. The installation ensures the COP = 5.3.

Keywords: heat pump, pasteurization and cooling of milk, carbon dioxide, thermodynamic cycle.

Instalație cu pompa de căldură multifuncțională pentru fabricii de procesare a laptelui

Șit M.L., Șit B.M.

Institutul de Energetică al AȘM
Chișinău, Republica Moldova

Rezumat. Pe bază de abordare bazată pe utilizare de integrare a pompei de căldură ca elementul de bază în instalație de pasteurizare și răcire a laptelui și instalațiilor pentru prepararea apei calde și apei de "gheață" este elaborată instalație de pasteurizare și răcire a laptelui pentru produsele lactate cu pompa de căldură cu dioxid de carbon. Schema se diferă de cunoscute datorită introducerii circuite suplimentare între schimbătoare de căldură, precum și cu metoda de legătura lor cu elementele principale ale instalației. O metodă de conexiune a elementelor de instalație permite: de a compensa efectul temperaturii apei din sursa rece, care este sursă de căldură cu potențial termic scăzut pentru pompa de căldură asupra calitatea de funcționare a instalației și obține simultan atât apă caldă pentru prelucrare a sanitară de echipament și apă de "gheață" pentru necesitățile tehnologice. Designul instalației dă posibilitatea compensa influența schimbărilor sezoniere de temperatură a apei asupra calitatea de funcționare. În instalație COP mediu eate egal cu 5,3.

Cuvinte-cheie: pompa de căldură, instalație de pasteurizare și răcire a laptelui, lapte, dioxid de carbon, ciclul termodinamic.

Многофункциональная теплонасосная установка для молочных заводов

Шит М.Л., Шит Б.М.

Институт энергетики Академии Наук Молдовы
Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. На основании подхода, использующего интеграцию теплового насоса в схему пастеризационно-охладительной установки для молока и установок для получения горячей и «ледяной» воды, разработана схема пастеризационно - охлаждающей установки для молочных продуктов с тепловым насосом на диоксиде углерода. Схема отличается от известных схем вводом дополнительных теплообменных аппаратов, и способом их связи с основными элементами установки. Способ связи элементов в установке позволяет: компенсировать влияние температуры источника холодного водоснабжения, являющегося источником низкопотенциальной теплоты для теплового насоса, на качество работы установки, одновременно получать как горячую воду для санитарной обработки оборудования и пр., так и «ледяную» воду для технологических нужд. Конструкция установки позволяет компенсировать влиянию сезонного изменения температуры воды на ее качество работы. В установке обеспечивается расчетный COP=5,3.

Ключевые слова: тепловой насос, пастеризационно-охладительная установка, молоко, термодинамический цикл, диоксид углерода.

Введение

Энергетическая безопасность и борьба с изменениями климата являются целями социально-экономического развития государства. Повышение энергоэффективности в молочной промышленности является целью работы, как

разработчиков оборудования, так и эксплуатационного персонала. Для снижения потребления как электрической, так и тепловой энергии при пастеризации и охлаждении молочных продуктов предлагается интегрировать теплонасосные

установки (ТНУ) в схемы пастеризационно-охладительных установок (ПОУ) [1-9]. Однако, надо признать, что работы в этом направлении еще не достигли уровня достаточного для внедрения в промышленность, хотя внимание к ним обращено, начиная с 1980 г. (см. библиографию к [2-8]). В [6] приведена схема, где ТНУ используется для получения ледяной воды на испарителе и горячей воды 85°C на конденсаторе с последующей подачей воды на пастеризационно-охладительную установку. Недостатком такой схемы является ограничение по температуре входного молока (10°C), а также низкий COP из-за высокой разности температур между испарителем и конденсатором. Кроме того, расположение испарителя в баке для ледяной воды требует использования дополнительного насоса для обеспечения ее циркуляции, что увеличивает электрическую мощность, потребляемую установкой. Схема охлаждения молока в [6] имеет КПД более низкий, чем схема с прямым охлаждением молока в испарителе. Задачей, поставленной в исследовании, является создание теплонасосной пастеризационно-охладительной установки с возможностью параллельного получения горячей и ледяной воды, в которой стоимость энергозатрат ниже, чем в установках, не использующих тепловые насосы. Нами рассматривается режим пастеризации и охлаждения молока с температурами на входе и выходе 4°C и с температурой пастеризации 78°C, который дополняет схемы ПОУ с ТНУ [10,11], в которой объединены ПОУ и установка для производства горячей и ледяной воды и которая может работать в широком диапазоне температур источника холодного водоснабжения.

1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Поставленная цель достигается за счет создания интегрированной установки, в которой производится как пастеризация и охлаждение молока, так и получение одновременно горячей и ледяной воды посредством интегрирования элементов этих в теплонасосную парокомпрессионную установку. Схема установки, в которой приведены входные и выходные

энергетические и технологические потоки приведена на рис.1.

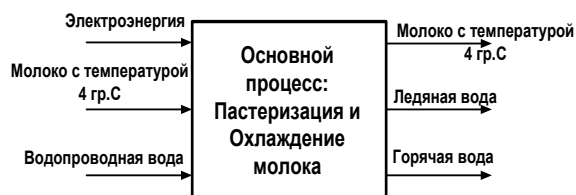


Рис.1. Схема установки

Гидравлическая схема установки приведена рис.2. Установка (рис.2) состоит из следующих основных элементов: компрессора, двух газоохладителей, четырех испарителей (из которых могут использоваться только три в зависимости от температуры водопроводной воды), двух рекуперативных теплообменников, двух эжекторов, предназначенных для повышения давления на входе в компрессор, регулирующих клапанов давления и расхода. На рис.2 красным цветом показаны номера аппаратов, черным цветом – номера точек на схеме, рис.1, цифры в кружках – значения температур. Она отличается от описанных в [1-3] наличием: теплообменника 15, который использует часть теплой воды для стабилизации температуры водопроводной воды на входе в испаритель 11, испарителя 13, который охлаждает водопроводную воду до требуемой температуры на входе в испаритель 11, газоохладителя 20 для приготовления горячей воды. Условия, которым должны соответствовать теплота, отдаваемая газоохладителем молоку, и теплоты, поглощаемые испарителями в зависимости от температуры водопроводной воды, выражены уравнениями (1-6)

$$G_2 = G_{11} + G_{13} + G_8 + G_9 - G_{20}, \quad (1)$$

$$G_2 = G_{m2} c_m \Delta t_{m2} / \Delta h_2, \quad (2)$$

$$G_8 \Delta h_8 = G_{m8} c_{cm} \Delta t_{m8}, \quad (3)$$

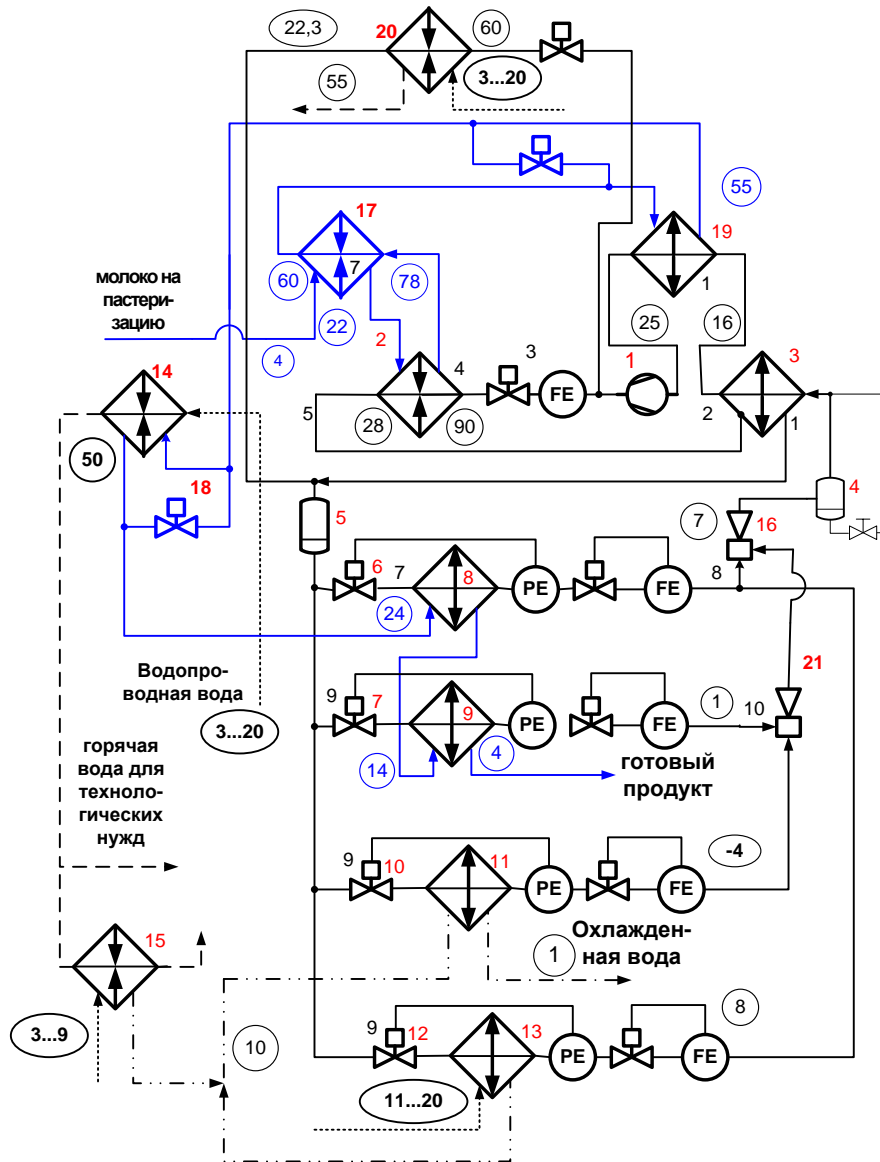
$$G_9 \Delta h_9 = G_{m9} c_{cm} \Delta t_{m9}, \quad (4)$$

$$G_{11} \Delta h_{11} = G_{w11} c_w \Delta t_{w11}, \quad (5)$$

$$G_{13} \Delta h_{13} \eta_{13}^{-1} = G_{w13} c_w \Delta t_{w13}, \quad (6)$$

Индексы при обозначениях расходов, перепадов энтальпий, теплоемкостей, разностей температур указывают на номер теплообменного аппарата, через который

протекает та или иная среда (хладагент, вода, молоко).



1. Компрессор. 2. Газоохладитель. 3. Рекуперативный теплообменник. 4. Маслоотделитель. 5. Резервуар. 6, 7, 10, 12 – регулирующие клапаны давления. 8, 9, 1, 13 – испарители. 14. Теплообменник приготовления горячей воды. 15. Теплообменник для стабилизации температуры воды на испаритель 11 (стабилизация режима работы газоохладителя 2. 16, 21 – эжекторы. 17. Рекуперативный теплообменник в линии подачи молока на пастеризацию. 18. Регулятор температуры молока перед испарителем 8. 19. Теплообменник для повышения COP установки. 20. Газоохладитель приготовления горячей воды.

Рис.2. Схема установки (без вторичного контура узла приготовления ледяной воды)

Режим работы испарителей определяется из условия недопущения попадания жидкости в компрессор, т.е. обеспечения минимального перегрева пара после испарителя. В газоохладитель 2 поступает столько хладагента, сколько это необходимо из условий поддержания необходимого температурного режима нагреваемой среды.

Это вытекает из условий теплового баланса. На рис. 4 приведена схема термодинамического цикла установки в координатах «давление – энтальпия». При построении графика были введены упрощения, связанные с определением точных температур внутри эжекторов.

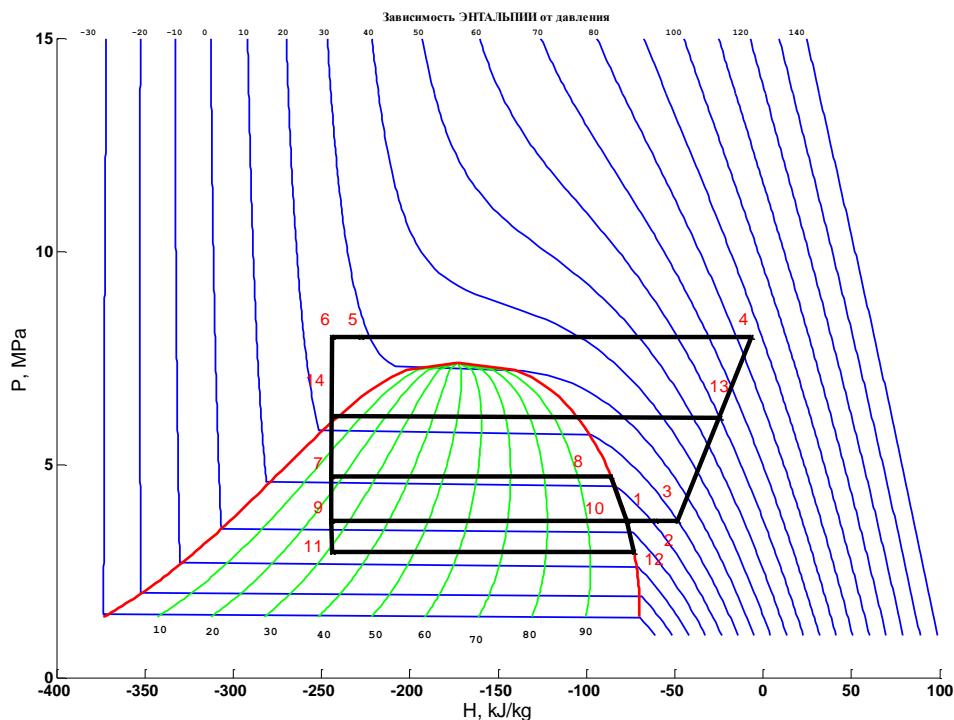


Рис. 3. Термодинамический цикл установки в координатах «давление –энтальпия»

В таблице 1 приведены данные о характерных точках термодинамического цикла

Таблица 1. - Параметры узловых точек термодинамического цикла, на рис.3

№ п/п	$T, ^\circ C$	$P, МПа$	$G, \%$	$h, кДж / кг$	$S, кДж / кг$
1	2.0	3.67	100	-77.179	-0.905
2	11.30	3.67	100	-61.009	-0.847
3	20.0	3.67	100	-48.224	-0.803
4	85.75	8.0	0	-6.775	-0.788
5	29,0	8.0	0	-228.080	-1.484
6	25.0	8.0	0	-244.108	-1.538
7	12.0	4,72	16.60	-244.108	-1.522
8	12.0	4.72	100	-86.032	-0.967
9	2.0	3.67	25.70	-244.108	-1.512
10	2.0	3.67	100	-77.179	-0.905
11	-6.10	2.95	31.0	-244.108	-1.502
12	-6.10	2.95	100	-73.104	-0.861
13	60.0	6.10	0	-24.485	-0.800
14	22.30	6.10	0	-244.108	-1.530

СТАБИЛИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ТЕПЛОБМЕННИКОВ ГОРЯЧЕЙ ВОДЫ

Компенсация возмущений по температуре холодной воды через газоохладитель 20 может осуществляться путем регулирования

ее расхода. Изменение расхода хладагента через газоохладитель 20, вызванное работой контура стабилизации температуры молока на выходе газоохладителя 2 также может компенсироваться изменением расхода водопроводной воды. При этом можно

использовать комбинированную систему стабилизации, рис.4.

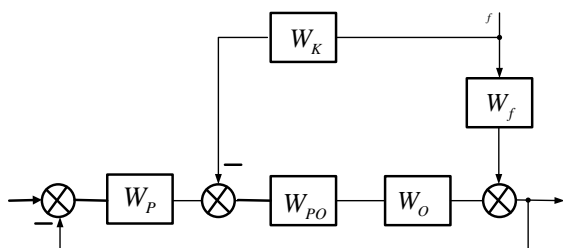


Рис.4. Структурная схема системы управления температурой на выходе газоохладителя поз.2 (рис.1)

Вид передаточных функций и числовые значения коэффициентов для кожухохладевикового газоохладителя, состоящего из семи параллельно включенных по хладагенту и воде блоков, при общем расходе хладагента 5.5 м³/с и расходе воды 5.84 м³/час, давлении газа 9 МПа, температуре хладагента от 30°C до 80°C в каждом из которых длина трубки (материал – сталь) составляет 30м, внутренний диаметр трубки 0,01м, толщина стенки трубки 0.001 м, диаметр навивки трубки – 0.25м. представлены ниже. Необходимо сразу оговориться, что значения коэффициентов существенно зависят от режима работы ТНУ и значительно изменяются в зависимости от параметров цикла ТНУ [8]. Передаточная функция по каналу: «температура воды – расход воды».

$$W_O(p) = k_{42} / ((T_{43}p + 1)(T_{44}p + 1))$$

$$k_{42} = 11,17; T_{43} = 5,35; T_{44} = 0,76.$$

Передаточная функция по каналу возмущения (расходу хладагента) имеет вид:

$$W_{32}(p) = k_1 / (T_{32}p + 1), \quad k_1 = 5,04; T_{32} = 2,2.$$

Можно показать, что при приведенных данных комбинированная система управления при использовании ПИД-регулятора в основном контуре решает задачу компенсации возмущений.

Выводы

1. Применение рассмотренной схемы теплонасосной установки на диоксиде углерода в составе комбинированных пастеризационно-охладительных установки для молочных продуктов, в которую интегрирована установка для нагрева воды и получения ледяной воды для различных

климатических условий позволяет существенно снизить потребление природного газа на предприятиях молочной промышленности, и установка с предложенной схемой может иметь приемлемые сроки окупаемости инвестиций.

2. В схему системы регулирования температуры продукта необходимо ввести: систему регулирования расхода ледяной воды с целью повышения качества системы стабилизации выходной мощности пастеризационно-охладительной установки и приготовления горячей воды в дополнительном газоохладителе установки, систему стабилизации температуры воды на входе в испаритель для приготовления ледяной воды.

Литература (References)

- [1] Becker H., Vuillermoz A., Marechal F., Heat pump integration in a cheese factory. Applied Thermal Engineering, 2012, v43, October 2012, p.118-127.
- [2] Becker H., Marechal F., Vuillermoz A., Process Integration and Opportunities for Heat Pumps in Industrial Processes. International Journal of Thermodynamics, Vol. 14 (No.2), pp.59-70, 2011. doi: 10.5541/ijot.260.
- [3] Söylemez M.S., Operational cost minimization of heat pump for milk pasteurization in dairy. Journal of Dairy Research, 2005, v72, p.482-485.
- [4] Söylemez M.S., Optimum heat pump in milk pasteurizing in dairy. Journal of Food Engineering, V.74, 2006, p. 546-551.
- [5] <http://telemiks.by/geo/food.html>
- [6] Ozyurt O., Comakli O., Yilmaz and Karsh S., Heat pump use in milk pasteurization: an exergy analysis. International Journal of Energy Research. V28, Iss.9, p.833-846, July 2004.
- [7] Vezirishvili O.S., Hvitia M.T. *Kaskadnaia tepolnasosnaia ustanovka dlia ohlazhdenia i pasterizatsii moloka*, [Cascade heat pump station for cooling and pasteurization of milk] Holodilinaia tehnika, № 7, 1990, pp.4-6, (in Russian).
- [8] Sit M.L., Zhuravleov A.A., Sit B.M. *Upravlenie gazooohladiatelem teplovogo nasosa na dioxide ugleroda pri rabote v nepererivnom regime*. [Carbon dioxide gas cooler control at the work in the continuous regime]. Trudi Odesskoi Natsionalnoi Akademii Pischvih tehnologii” iss.35, vol.2., 2009. pp. 241-246 (in Russian).
- [9] Zagurenko A.G., Korotovskikh V.A., Kolesnikov A.A., Timonov A.V., Kardymon D.V. Technical and economic optimization of hydrofracturing design. *Neftyanoie khozyaistvo – Oil Industry*, 2008, no.11, pp. 54-57 (in Russian).

[10] Sit M.L., Sit B.M. *Sistema upravljenia teplovim nasosom v sostave ustanovki dlia pasterizatsii i ohlazhdenia moloka. Ch.I* [Automatic control system for heat pump embedded in installation for

pasteurization and cooling of milk, part I]. *Problems of of the Regional Energetics*, N3(20) 2012, pp.48-57, (in Russian).

Сведения об авторах:



Шит Михаил Львович – к.т.н., в.н.с., лаборатории, «Энергетической эффективности и возобновляемых источников энергии» института энергетики АНМ. Область научных интересов: тепловые насосы, автоматическое управление технологическими процессами в энергетике, промышленности, сельском хозяйстве. E-mail: mihail_sit@mail.ru



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