

Повишаване енергийната ефективност при дестилация на вода чрез използването на термопомпена инсталация

Константин КОСТОВ¹, Станимира ГИНДЕВА¹, Росен КРЪСТЕВ²

konstankostov@tu-sofia.bg, stanimira_gindeva@abv.bg, rosen20103@gmail.com

¹ТУ – София, Инженерно – педагогически факултет Сливен, катедра „Механика, машиностроене и топлотехника“, гр. Сливен, бул. “Бургаско шосе” №59

²ТУ – София, Факултет Компютърни системи и технологии, катедра „Информационни технологии в индустрията“, София, бул. „Климент Охридски“ №8

Резюме

В тази статия се предлага практическа схема за енергийно ефективна технология за дестилиране на вода. Разработката се отнася за ефективно получаване на дестилирана вода под вакуум, чрез използването на термопомпена инсталация. В публикацията е направено описание на уредбата и са анализирани нейните възможности. Представен е математически модел, описващ процесите на пренос на топлина и маса, който позволява съставянето на топлинен баланс на инсталацията. Възможността за определяне на рационални работни параметри на дестилационната система, ще позволи постигане на максимална икономия на енергия в процесите на обезсоляване на водата. Предложената експериментална уредба се явява основа за по – нататъшно изследване и физическо моделиране на процесите на топлообмен. Тя може да се използва, като прототип за създаване на промишлени инсталации за обезсоляване на вода с помощта на термопомпи.

Ключови думи

енергийна ефективност, дестилиране на вода, термопомпа

Въведение

Водата и енергията са най-ценните ресурси в настоящото време, при нарастване на населението и недостигът на вода и енергия става все по-забележим и тясно свързан [1].

Пречистването на водите от солите в съдържанието им, се разглежда като обещаваща технология, която може надеждно да осигури прясна вода.

Съществуват различни методи за пречистване на водата, които мога да бъдат разделени на няколко групи според естеството на протичащите процеси.

Химичните методи за пречистване на водата се основават на реакции на окисление-редукция и неутрализация. В резултат на взаимодействието на различни реагенти със замърсителите възниква реакция, която води до получаване на неразтворима утайка, разлагане на газообразни или поява на безвредни компоненти.

Физичните методи се основават на съответните физични процеси, засягащи водата и наличните замърсители. Обикновено тези

методи се използват за отстраняване на неразтворими, големи замърсители. Понякога те засягат и разтворени вещества и биологични обекти. Основните физични методи за почистване на водата са термичният метод, утаяването, филтрирането и UV обработка.

Дестилацията е най – старият и често използван процес в химическата промишленост, който представлява повече от 90% от процесите на разделяне. Тя остава един от най – важните методи за термично разделяне и най-сигурният дадено вещество да се пречисти от други компоненти. Освен това се прилага за отделяне на летливи от нелетливи компоненти. Независимо от това, въпреки многобройните, добре известни предимства и широко разпространената употреба, нейният основен недостатък са значителните енергийни разходи. Общата ниска топлинна ефективност на процеса може да генерира до повече от 50% от оперативните разходи на инсталацията. Изчислено е, че процесите на дестилация представляват около 10% ÷ 15% от световното потребление на енергия [2].

Очистването на водата, чрез дестилация при понижено налягане, намира все по – голямо приложение с развитието на технологиите и използването на възобновяеми енергийни източници.

Цел на изследването

Целта на настоящата работа е разработването на енергоефективна инсталация за получаване на дестилирана вода под вакуум, чрез използването на термомпена инсталация.

Формулиране на проблема

В настоящата работа сме си поставили за цел да проектираме експериментална уредба с възможности за определяне на рационални работни параметри, което ще позволи постигане на максимална икономия на енергия в процесите на обезсоляване на водата.

Постановка на задачата

Разглежда се създаването на експериментална уредба и методика за провеждане на експерименти. Разработването на математически модел описващ процесите на топлообмен, протичащи в инсталацията, ще позволи бързо и лесно определянето на разхода на енергия за дестилация на вода с помощта на термомпена.

Изложение

Обект на изследване е процеса на обезсоляване на солена вода, посредством вакуумна дестилация. Въз основа на съвременните теоретични концепции за процесите на топлообмен и процесите, свързани с фазов преход от течност към газ, е разработена лабораторна установка, принципна схема на която е показана на фиг.1.

Инсталацията е така проектирана, че използва и двете термични страни на термомпата. Тава позволява повишаване на енергийната ефективност на системата. Освен това за да се повиши ефективността на използваните в системата топлообменници, те са подобрени чрез добавяне на надлъжни ребра. От една страна те служат за увеличаване на якостта, а от друга повишават интензитета на топлопреминаване. Така проектирани и конструирани, топлообменниците са енергоефективни и са с малък специфичен размер.

Системата за дестилация се състои от два кръга, единият от които е със затворен кръг, а другият е отворен. Първата верига – термомпенния контур се състои от компресор 1, кондензатор 2, дроселиращо устройство 3 и

изпарител 4. Вторият кръг се състои от воден изпарител 10, охладител на водна пара 6, вакуумна помпа 5 и резервоар за дестилирана вода 7. Изпарението на водата в системата се извършва под вакуум, създаден от вакуумната помпа 5. Топлината, отнета от кондензатора на първия кръг на термомпата, се изразходва за изпаряване на водата в съда 10. Водната пара се охлажда от изпарителя на термомпата с повишена плътност, което минимизира необходимата мощност на вакуумната помпа. През кран 8 излиза чиста вода. Клапан 9 е проектиран да контролира налягането вътре в резервоара за чиста вода. Клапан 11 контролира сензора за концентрация на сол, за да предотврати преминаването на солена вода, когато нейната концентрация надвишава допустимата граница. Вакуумният манометър 12 показва налягането вътре в този контейнер. Солената вода влиза през клапан 13.

Освен посочените елементи инсталацията, е оборудвана с всички необходими датчици за следене и управление на протичащите процеси.

Анализирането на работата на инсталацията и изчисляването на процесите на пренос на топлина и маса се извършва в определена последователност. Максималната теоретична стойност на коефициента на ефективност на топлата и студената страна на термомпата се описва с уравнения (1) и (2):

$$HCOP_{M.T.} = \frac{T_G}{T_G - T_H} \quad (1)$$

$$CCOP_{M.T.} = \frac{T_H}{T_G - T_H} \quad (2)$$

където:

- $HCOP$ е максималният коефициент на преобразуване за отопление;
- $CCOP$ е максималният коефициент на преобразуване за охлаждане;
- T_G е температурата на кондензатора по време на кондензация;
- T_H е температурата на изпарителя по време на изпарение.

Количеството топлина, отведено от кондензатора, може да се определи по зависимости (3) и (4):

$$Q_k = G_f(i_2 - i_3) \quad (3)$$

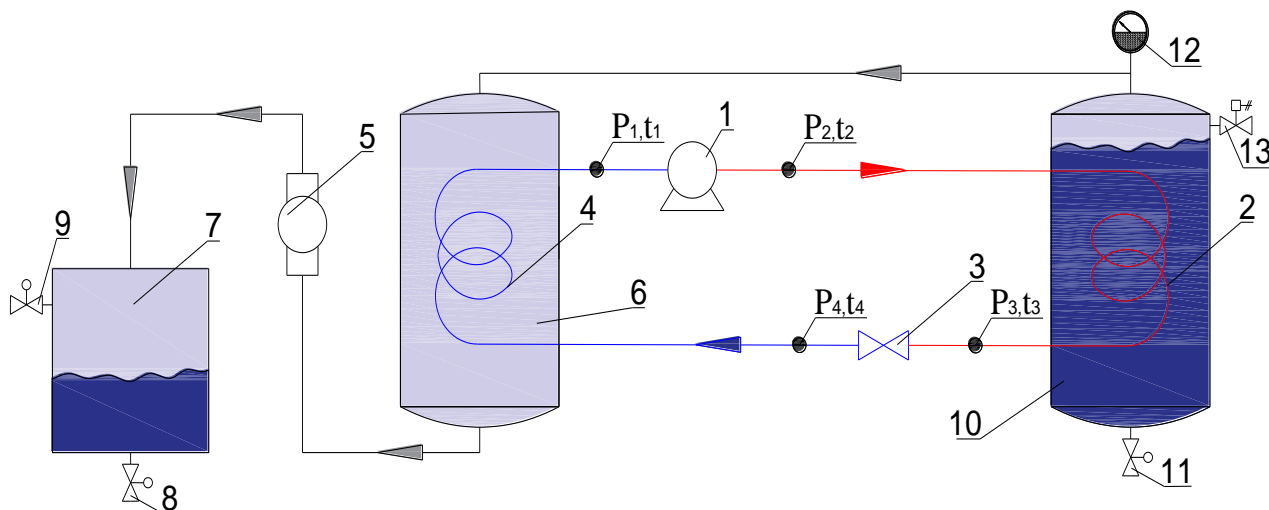
$$Q_k = U_k \cdot F_k \cdot \Delta T_{lk} \quad (4)$$

където:

$$\Delta T_{lk} = \frac{(t_i - t_v) - (t_y - t_v)}{\ln[(t_i - t_v)/(t_y - t_v)]} \quad (5)$$

- Q_k , [kW] количеството топлина, отведено от кондензатора;
- G_f , [kg/s] масов разход на хладилен агент;
- i_2, i_3 , [kJ/kg] – енталпията на хладилния агент съответно на входа и на изхода от кондензатора;
- U_k , [W/m²K] - коефициент на топлопреминаване на топлообменника;

- F_k , [m²] - площ на топлообменната повърхност на кондензатора;
- ΔT_{lk} , [°C] – средна логаритмична температурна разлика на кондензатора;
- t_v , [°C] - температура на водата около тръбата на кондензатора;



фиг.1 Схема на инсталацията за дестилиране на вода

Количеството топлина, абсорбирано от изпарителя на термopомпата, може да се определи по формули (6) и (7):

$$Q_e = G_f(i_1 - i_4) \quad (6)$$

$$Q_e = U_e \cdot F_e \cdot \Delta T_{le} \quad (7)$$

където:

$$\Delta T_{le} = \frac{(t_{st} - t_y) - (t_{st} - t_i)}{\ln[(t_{st} - t_y)/(t_{st} - t_i)]} \quad (8)$$

- Q_e , [kW] количеството топлина, погълнато от изпарителя;
- G_f , [kg/s] масов разход на хладилен агент;
- i_1, i_4 , [kJ/kg] – енталпията на хладилния агент съответно на входа и на изхода от изпарителя;
- U_e , [W/m²K] - коефициент на топлопреминаване на топлообменника;
- F_e , [m²] - площ на топлообменната повърхност на изпарителя;
- ΔT_{le} , [°C] – средна логаритмична температурна разлика на изпарителя;
- t_{st} , [°C] - температура на водната пара около тръбата на кондензатора;

Общият коефициент на топлопреминаване може да се определи по зависимост (9):

$$U = \frac{D_0^{-1}}{\frac{1}{\alpha_o D_0} + \frac{\ln(D_0 d_i^{-1})}{2\lambda} + \frac{1}{\alpha_i d_i}} \quad (9)$$

където:

- α_o, α_i , [W/m²K] са съответно коефициентите на конвективен топлообмен от външната и вътрешната страна;
- D_o, d_i , [m] - външен и вътрешен диаметър на тръбата;
- λ [W/m.K] – коефициент на топлопроводност на материала на тръбата;

Количеството електроенергия, консумирана от компресора, може да се определи по формули (10), (11) и (12):

$$N_c = (I \cdot V \cdot \cos\phi) / \eta_c \quad (10)$$

$$N_c = S_f \cdot (P_k - P_e) \quad (11)$$

$$N_c = G_f(i_2 - i_1) / \eta_{isent} \quad (12)$$

където:

- N_c , [W] – мощността, на компресора;
- η_c – КПД на компресора;
- I , [A] – големина на тока;
- V , [W] – големина на напрежението;
- S_f , [m³/s] – обемен разход на хладилен агент;

- $P_k, P_e, [Pa]$ – налягане на хладилния агент в смукателния и нагнетателния тръбопровод;
- $G_f, [kg/s]$ масов разход на хладилен агент;
- $i_1, i_2, [kJ/kg]$ – енталпията на хладилния агент съответно на входа и на изхода от компресора;
- η_{isent} – изоентропиен КПД на компресора;

Масовият поток на хладилния агент се определя по зависимостта (13):

$$G_f = \frac{(I.V.\cos\varphi)\eta_{isent}}{(i_2 - i_1)\eta_c} \quad (13)$$

Масовият разход на водната пара се определя по зависимости (14), (15), (16):

$$Q_c = Q_e \quad (14)$$

$$G_{w.s.}[(i_s + i_w) + (c_w \cdot \Delta T_w)] = G_f(i_2 - i_3) \quad (15)$$

$$G_{w.s.} = \frac{G_f(i_2 - i_3)}{[(i_s + i_w) + (c_w \cdot \Delta T_w)]} \quad (16)$$

където:

- $Q_c, [W]$ е отведената топлина от кондензатора на термopомпата към водата;
- $Q_e, [W]$ топлината, погълната от водата за изпарение;
- $G_{w.s.}, [kg/s]$ - масов дебит на водна пара;
- $\Delta T_w, [^\circ C]$ разлика между температурите на входящата и кипящата вода в изпарителя;
- $i_s [kJ/kg]$ енталпия на наситената водна пара при определена температура;
- $i_w [kJ/kg]$ енталпия на водата при определена температура;

Енталпията на водната пара, постъпваща във вакуумната помпа, може да се определи по формула (17):

$$i_{w.s.} = i_s - \left[\frac{G_f(i_1 - i_4)}{G_{w.s.}} \right] \quad (17)$$

Съдържанието на влага във водните пари, постъпващи във вакуумната помпа, се определя от съотношението (18):

$$d = \frac{i_{w.s.}}{(i_s - i_w)} \quad (18)$$

Обемният разход на водната пара се определя по следната зависимост (19):

$$S = G_{w.s.} \vartheta_{w.s.} \quad (19)$$

където:

- $v_{w.s.}, [m^3/kg]$ - специфичен обем на водната пара, постъпваща във вакуумната помпа. Определя се след преобразуване на зависимост (18).
- $G_{w.s.}, [kg/s]$ - масов дебит на водна пара.

Необходимата мощност на вакуумната помпа може да се определи с помощта на уравнение (20):

$$N_{v.p.} = \frac{[S(P_2 - P_1)]}{\eta_{v.p.}} \quad (20)$$

където:

- $P_2 [Pa]$ – барометричното налягане;
- $P_1 [Pa]$ – налягане в смукателната линия на вакуумната помпа (налягане вътре в резервоара за изпаряване на водата);
- $\eta_{v.p.}$ – КПД на вакуумната помпа.

Общата мощност, консумирана от инсталацията, се определя по зависимостта (21):

$$N_{ins} = N_c + N_{w.p.} \quad (22)$$

Резултати и обсъждане

В сравнение с конвенционален дестилатор, се очаква предложената инсталация, да има по – ниска консумация на енергия.

Предварителният анализ показва повишаване на енергийната ефективност на процеса на дестилация, като се очаква намаляване разходите на енергия почти 2 пъти.

Предложеният математически апарат дава възможност за определяне на общата консумация на енергия на системата, която е представена като сума от енергията, консумирана от компресора на термopомпата и вакуумната помпа. При постоянна консумация на енергия от компресора на термopомпата, общата консумация на инсталацията ще зависи от обемния поток на водните пари, преминаващи през вакуумната помпа.

В така предложената система водата ще се изпарява и кондензира в една и съща верига, така че общата вложена енергия, ще включва енергията, необходима и за двата процеса. По този начин енергията за дестилиране ще е право пропорционална на съотношението на налягането в кондензатора и изпарителя.

Изводи

Представената експериментална инсталация, представлява енергоспестяващ метод за обезсоляване на вода с вакуумна термopомпа, което допринася за спестяване на енергийни ресурси. Създаденият експериментален стенд, позволява физическото моделиране на процесите на топлообмен и може да се използва, като прототип за създаване на промишлени инсталации за обезсоляване на вода с помощта на термopомпи. Предложеният математически апарат и провеждането на серия от експерименти, биха позволили определяне на

рационални работни параметри на дестилационната система, с цел постигане на максимална икономия на енергия в процесите на обезсоляване на водата.

Литература

1. C.M.A. Yadav, Water desalination system using solar heat: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 67 (2017), pp. 1308-1330, 10.1016/j.rser.2016.08.058
2. D.S. Sholl, R.P. Lively, Seven chemical separations to change the world, *Nature*, 532 (7600) (2016), pp. 435-437.

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY IN WATER DISTILLATION THROUGH THE USE OF A HEAT PUMP INSTALLATION

Konstantin KOSTOV¹, Stanimira GINDEVA¹, Rosen KRYSTEV²

konstankostov@tu-sofia.bg, stanimira_gindeva@abv.bg, rosen20103@gmail.com

¹ Dept. of Mechanical Engineering, Manufacturing and Thermal Engineering, Faculty of Engineering and Pedagogy of Sliven, Technical University – Sofia, Bulgaria,

² Dept. of Information Technology in industry, Faculty of Computer Systems and Technologies, Technical University – Sofia, Bulgaria,

Abstract

In this article proposes a practical scheme for an energy efficient technology for water distillation. Development refers to is for effectively obtaining water under vacuum distillation, through the use of a heat pump installation. The publication describes the system and analyses its capabilities. A mathematical model is presented, describing the process for the transfer of heat and mass, which allows you to put a balance on the installation. Opportunity for determining the rational working parameters of the distillation system, will allow achieving the maximum savings on energy in the process for demineralizing water. In the so proposed system, the water will evaporate from and condenser in the same circuit, like the total energy input will include the energy required for both processes. According to the starting point of energy for distillation, it is still proportional to the ratio of that put into the condenser and evaporator. The proposed experimental procedure is a real basis for the scientifically researched and physically modelled on the heat exchange process. You can use it, such as a prototype for installation in the industry for demineralization of water with the help of a heat pump. Proposed mathematical apparatus and carried out on a series of experiments, would allow the determination of rational operating parameters for the distillation system, with the goal of achieving maximum energy savings in the process for demineralizing water.

Keywords: energy efficiency, water distillation, heat pump installation