

ДО ПИТАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ СТІРЛІНГА В СУШИЛЬНИХ УСТАНОВКАХ

Дзісь Віктор Григорович к.т.н., доцент
Дячинська Олена Миколаївна завідувач лабораторією
Вінницький національний аграрний університет
Dzis V.
Dyachynska O.
Vinnytsia National Agrarian University

Анотація: описано принцип роботи сушарки з тепловим насосом Стірлінга.

Ключові слова: вологість, температура, точка роси, тепловий насос Стірлінга.

Вступ та постановка задачі

Переважає більшість сушильних установок працюють за відкритим термодинамічним циклом. В таких сушильних установках теплоносії виносить вологу за межі сушильної камери, що супроводжується забрудненням атмосфери, безповоротними втратами теплоти та зменшенням к.к.д. Деякі сушильні установки мають утилізатори або регенератори відпрацьованої теплоти, які частково повертають відпрацьоване тепло у сушильну камеру. Для сушіння деревини запропонована сушарка з тепловим насосом та повною рециркуляцією відпрацьованого сушильного агента [1, 2]. Сучасний розвиток холодильної та мікропроцесорної техніки дає можливість суттєво поліпшити енергетичні показники сушильних установок та принципово змінити процес сушіння, а саме відокремити вологу від теплоносія і вивести її з сушильної камери без втрати високоенергетичного теплоносія.

Сушильні установки відкритого типу мають низьку енергетичну ефективність, тому дослідження шляхів удосконалення сушильних установок та розробка нових з метою підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів є актуальною задачею.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо малогабаритну сушильну установку з тепловим насосом, яка працює за замкненим термодинамічним циклом. За типом робочого тіла теплові насоси, для помірних температур, поділяють на абсорбційні (робоче тіло аміак-вода, бромистий літій-вода), парокompresійні (робоче тіло – фреон) та газові (робоче тіло – водень, гелій, неон, азот, метан, повітря) [3,4,5,6,7,8]. Абсорбційні теплові насоси досить чутливі до перепадів температури, тому їх найчастіше використовують у системах кондиціонування повітря. Парокompresійні теплові насоси екологічно небезпечні та мають високу вартість, тому їх застосування в сушильних установках недоцільне. Газові екологічно безпечні і мають досить високі термодинамічні характеристики. В основу роботи газових теплових насосів покладено зворотній цикл Стірлінга (рис. 1), який складається із двох ізотерм та двох ізохор [3]. Реальний термодинамічний цикл роботи теплового насоса Стірлінга (рис. 1б) далекий від ідеального (рис. 1а).

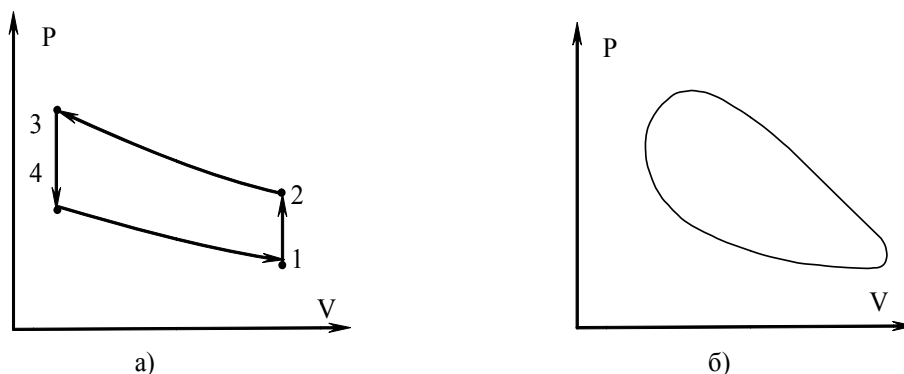


Рис. 1. Цикл Стірлінга

В реальних умовах роботи на енергетичні показники впливають «мертві об'єми», сили



в'язкого тертя при протіканні робочого тіла через регенератор, гідравлічний опір при русі у порожнинах, величина теплового пограничного шару, теплообмін у регенераторі, втрати теплоти у термодинамічних процесах циклу та їх неідеальність. Всі перераховані фактори зменшують енергетичні показники роботи теплового насоса.

Робочим тілом високоефективних теплових насосів Стірлінга служить гелій або водень, які мають високу теплопровідність та низьку в'язкість [4,5,6]. В [9,10,11] доведено, що для помірних температур і частот до 10 с^{-1} використання в теплових насосах Стірлінга альтернативних гелію робочих тіл (азот і метан) може дозволити створити машини, які не поступаються за ефективністю гелієвим та водневим холодильним машинам. Теплові насоси для криогенних температур високотехнологічні, їх вартість досить висока. Для робочих температур $5...60^\circ\text{C}$ конструкція теплових насосів значно спрощується, і відповідно їх вартість зменшується.

Принциповою відмінністю теплових насосів Стірлінга від інших типів теплових насосів є те, що робоче тіло теплового насоса Стірлінга в процесі всього циклу не змінює свого фазового стану, що дозволяє використовувати низькопотенціальну теплоту навколишнього середовища при температурі нижче 0°C . Їх широко застосовують в криокулерах, холодильниках, в системах тепlopостачання та кондиціонування житлових будинків [5,6,7,8].

Перспективним є застосування теплових насосів Стірлінга в сушильних установках замкнутого типу з повною регенерацією теплоти (рис. 2).

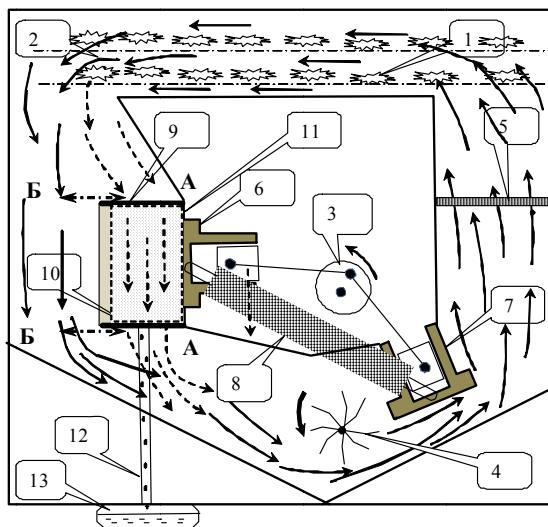


Рис. 2. Сушильна установка. 1–матеріал для сушіння, 2–сушильна камера, 3 – електродвигун приводу теплового насоса, 4– вентилятор, 5– допоміжний нагрівач, 6 – холодна частина теплового насоса, 7– гаряча частина теплового насоса, 8 – регенератор теплового насоса, 9, 10 – заслінки, 11 – холодильна камера з акумулятором холоду, 12 – магістраль для відведення конденсату за межі установки, 13 – ємність збору конденсату

При кімнатній температурі T_K матеріали 1 для сушіння (фрукти, овочі, насіння, зерно, олійні культури) завантажуються у сушильну камеру 2. Електродвигун 3 установки приводить в рух механізм теплового насоса. Вентилятор 4 створює у сушильній установці круговий напрямлений повітряний потік, який забезпечує активне вентилявання у сушильній камері 2. Електричним нагрівачем 5 сушильна установка виводиться на заданий робочий температурний режим. При досягненні необхідної для сушіння температури електричний нагрівач вимикається. Тепловий насос Стірлінга перекачує тепло із холодної частини 6 до гарячої частини 7. У гарячій частині теплового насоса повітря (теплоносій) нагрівається, потім потрапляє у сушильну камеру установки. Проходячи робочу камеру, повітря нагріває завантажену сировину, відбирає від неї частину вологи. В режимі нагріву (заслінки 9, 10 холодної камери 11 знаходяться в положенні А) вологе повітря циркулює по великому контуру за межами холодної камери. При охолодженні холодної камери на $15...35^\circ\text{C}$ нижче точки роси та досягненні вологості повітря $85...95\%$ заслінки 9 і 10 переводяться в положення Б. Одночасно зменшується швидкість потоку повітря вентилятором 4. Потік зволоженого повітря потрапляє у холодної камери 11 установки, де охолоджується. Частина вологи конденсується в холодної камері, конденсат відводиться за межі установки через магістраль 12.



Теплота відібрана від вологого теплоносія перекачується тепловим насосом від його холодної частини до гарячої. При досягненні холодною частиною насоса температури близької до точки роси відкриваються заслінки 9, 10 переводяться в положення А, і процес періодично повторюється до досягнення необхідної залишкової вологості завантаженої сировини. Температура сушильної камери, теплоносія, холодної та гарячої частини теплового насоса контролюються датчиками температури, вологість повітря в сушильній камері електронним гігрометром, робота заслінок та процес сушіння керується мікропроцесором.

Проведемо теоретичний аналіз роботи сушильної установки з тепловим насосом Стірлінга та оцінимо ефективність її роботи. Теплові насоси характеризуються коефіцієнтом ефективності, який дорівнює відношенню відведеної теплоти в гарячу частину до затраченої роботи сторонньої сили за один цикл [3]:

$$\eta = \frac{Q_{\text{г}}}{W}, \quad (1)$$

де $Q_{\text{г}}$ – відношення абсолютних температур робочого тіла гарячої і холодної частин.

Теплообмін в циліндрах теплових машин Стірлінга досить складний. Існують різноманітні математичні моделі і алгоритми розрахунку холодильних машин Стірлінга [3]. Більшість із них базуються на системах диференціальних рівнянь, які розв'язуються чисельними методами на ЕОМ [11, 12].

Згідно моделі Шмідта (модель досить проста, реальна ефективність роботи теплової машини складає $\sim 0,3$ від розрахункової) [3], кількість теплоти, що відводиться від гарячої частини за цикл, складає:

$$Q_{\text{г}} = \frac{p_{\text{г}} V_{\text{г}}}{\gamma - 1} \left(\frac{V_{\text{г}}}{V_{\text{д}}} - 1 \right) - \frac{p_{\text{х}} V_{\text{х}}}{\gamma - 1} \left(\frac{V_{\text{х}}}{V_{\text{д}}} - 1 \right), \quad (2)$$

— ;

— ;

– відношення витіснених об'ємів гарячої і холодної частин;
сумарний витіснений об'єм;

— – приведений «мертвий об'єм»; — «відносний мертвий об'єм»; —

«мертвий об'єм» (загальний внутрішній об'єм теплообмінників, регенератора, з'єднувальних каналів і отворів).

Кількість теплоти, що відбирається від холодної частини:

$$Q_{\text{х}} = \frac{p_{\text{х}} V_{\text{х}}}{\gamma - 1} \left(\frac{V_{\text{х}}}{V_{\text{д}}} - 1 \right) - \frac{p_{\text{г}} V_{\text{г}}}{\gamma - 1} \left(\frac{V_{\text{г}}}{V_{\text{д}}} - 1 \right). \quad (3)$$

Потужність приводу теплового насоса при частоті обертання валу :

$$W = \frac{2\pi n}{60} \frac{M}{\eta}. \quad (4)$$

Оцінимо енергетичні та термодинамічні характеристики сушильної установки за моделлю (1-5). Нехай: робоче тіло теплового насоса – азот, тиск – , об'єм кожного циліндра – 400см^3 , «мертвий об'єм» теплового насоса – 200см^3 , зсув фаз між рухами поршнів теплового насоса – $75\text{...}140^\circ$, гранична температура сушіння – 50°C , частота обертання двигуна приводу теплового насоса 600 об/хв. При реальній ефективності моделі Шмідта , маємо (рис. 3, рис. 4).

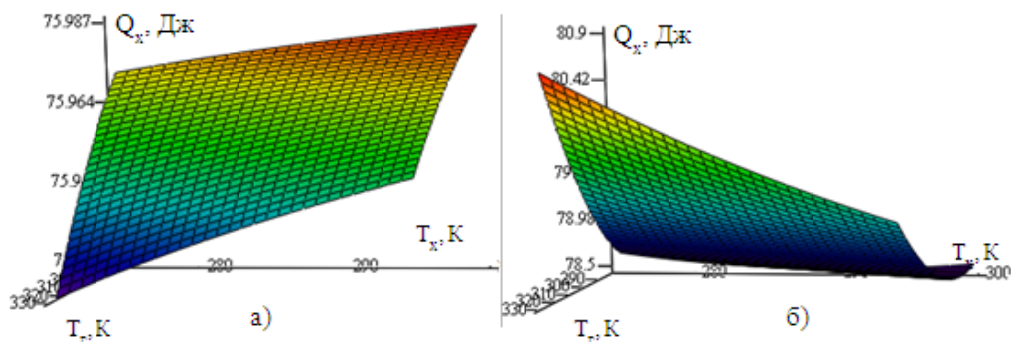


Рис. 3. Залежність $Q_{\text{х}}$ при куту зсуву фазам зміни об'ємів рухів компресорної та розширювальної порожнин: а) 75° , б) 140°

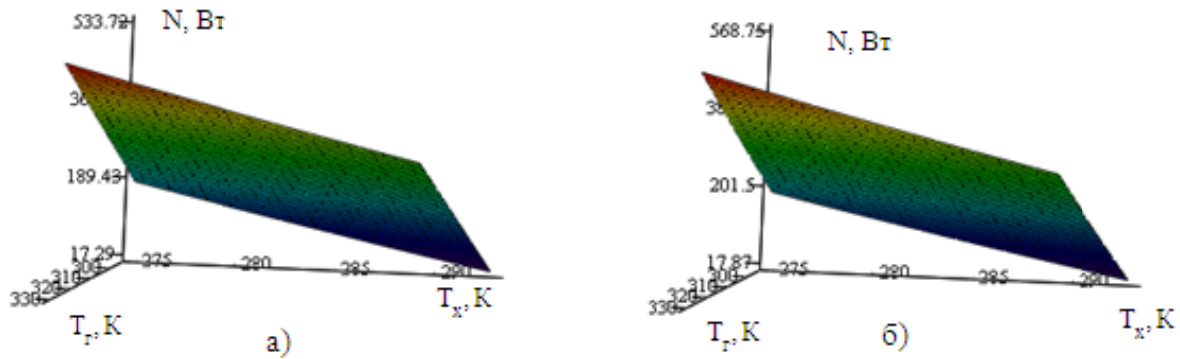


Рис. 4. Залежність при куту зсуву фазам зміни об'ємів рухів компресорної та розширювальної порожнин: а) 75°, б) 140°

Прийmemo, що середнє значення , середня потужність приводу теплового насоса Сушильна установка, в усталеному режимі роботи дає можливість відвести від сушильного матеріалу 1,2 кг вологи за проміжок часу год.

Висновки

Сушарка з тепловим насосом Стірлінга працює за замкненим циклом. Відпрацьоване тепло в сушильній установці не викидається у навколишнє середовище, а тільки „перекачуються” з холодної частини теплового насоса до гарячої, тому її робота з енергетичної точки зору набагато ефективніша, ніж робота звичайної класичної сушильної установки де спостерігається відведення вологи одночасно із теплоносієм за межі сушарки. Завдяки тому, що цикл роботи сушарки замкнений виключається можливість забруднення навколишнього середовища і відкривається можливість працювати з екологічно небезпечними матеріалами, також використовувати для роботи інші сушильні агенти, наприклад азот [13], який має кращі теплофізичні властивості ніж вологе повітря.

Список літератури

1. Безродний М.К. Эффективность применения тепловых насосов в установках сушки древесины / М. К. Безродный, Д.С. Кутра. – Киев: Изд. «Політехніка», 2011. – 240 с.
2. Безродний М.К., Кутра Д.С. Термодинамічна ефективність теплонасосної установки для сушіння деревини з повною рециркуляцією та байпасуванням сушильного агента. «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика». Випуск 4, 2012
3. Уокер Г. Двигатели Стирлинга. – М.: Машиностроение, 1985. – 408с.
4. Кириллов Н.Г. Новые технологии в производстве холода: холодильные машины Стирлинга умеренного холода // Индустрия, №2(28), 2002. – стр. 50-56.
5. Кириллов Н.Г. Результаты экспериментальных исследований холодильной машины Стирлинга умеренного холода. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. №11, 2001. - С. 24 -26.
6. Кириллов Н.Г. Из опыта создания авторефрижераторной установки с холодильным агрегатом Стирлинга. // Вестник Международной академии холода, №1, 2001. – С 35-37
7. Горожанкин С.А. Эффективность тепловых насосов, работающих по циклу Стирлинга // Коммунальное хозяйство городов: Науч.- техн.. сб. Вып.21.– К.: Техника, 2000.–С.109-111.
8. Горожанкин С.А. Теплообмен в цилиндрах машин Стирлинга // Вісник ДонДАБА. Вип.2001-2(27). - 2002. – С.149-153.
9. Кухаренко, В.Н. Об эффективности ГХМ Стирлинга с альтернативными рабочими телами [Текст] / В.Н. Кухаренко, В.В. Кузнецов // Зб. тез доп. Дев'ятої міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології». – 10-12, вересня 2013. – Одеса, Україна. – С.171-173.
10. Кухаренко, В.Н. Способы повышения эффективности ГХМ Стирлинга при умеренных температурах охлаждения [Текст] / В.Н. Кухаренко, В.В. Кузнецов // Зб. тез доп. XXI міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – 15-17, жовтня 2014. – Харків, Україна – Ч. 1. – С. 281.
11. Кузнецов В.В. Теоретичний аналіз характеристик газових холодильних машин при помірних температурах охолодження : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.14 / В. В. Кузнецов; Одес. нац. акад. харч. технологій. - Одеса, 2015. - 21 с.
12. Trandafilov, V.V. Computer simulation of a Stirling refrigerating machine / V.V. Trandafilov, M.G. Khmelniuk // Холодильна техніка та технологія. - 2015. - Т. 51, вип. 5. - С. 92-100.
13. Бекетов В.Г. Парциальное давление водяного пара во влажном газе и относительная влажность //

**References**

1. Bezrodnyy M.K. *Effektivnost' primeneniya teplovykh nasosov v ustanovkakh sushki drevesiny* / M.K. Bezrodnyy, D.S. Kutro. - Kiyev: Izd. «Politekhnika», 2011. - 240 s.
2. Bezrodnyy M.K., Kutro D.S. *Termodinamichna effektivnost' teplonasosnoy ustanovki dlya sushki drevesiny s polnym retsirkulyatsiyey i baypasuvannyam sushil'nogo agenta*. «Tekhnicheskaya teplofizika i promyshlennaya teploenergetika». Vypusk 4, 2012.
3. Uoker G. *Dvigateli Stirlinga*. - M.: Mashinostroyeniye, 1985. - 408s.
4. Kirillov N.G. *Novyye tekhnologii v proizvodstve kholoda: kholodil'nyye mashiny Stirlinga umerennogo kholoda*. // *Industriya*, №2 (28), 2002. - str. 50-56.
5. Kirillov N.G. *Rezultaty eksperimental'nykh issledovaniy kholodil'noy mashiny Stirlinga umerennogo kholoda*. // *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye*. №11, 2001. - S. 24 -26.
6. Kirillov N.G. *Iz opyta sozdaniya avtorefrizheratornoy ustanovki s kholodil'nym agregatom Stirlinga*. // *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda*, №1, 2001. - S 35-37
7. Gorozhankin S.A. *Effektivnost' teplovykh nasosov, rabotayushchikh po tsiklu Stirlinga* // *Kommunal'noye khozyaystvo gorodov: Nauch.- tekhn. sb. Vyp.21.- K. : Tekhnika, 2000.-S.109-111.*
8. Gorozhankin S.A. *Teploobmen v tsilindrakh mashin Stirlinga* // *Vestnik DonNASA. Vip.2001-2 (27)*. - 2002. - S.149-153.
9. Kukhareno, V.N. *Ob effektivnosti GKHM Stirlinga s al'ternativnymi rabochimi telami [Tekst]* / V.N. Kukhareno, V. V. Kuznetsov // *Sb. tezisov dop. Devyatoy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sovremennyye problemy kholodil'noy tekhniki i tekhnologii»*. - 10-12, sentyabrya 2013 - Odessa, Ukraina. - S.171-173.
10. Kukhareno, V.N. *Sposoby povysheniya effektivnosti GKHM Stirlinga pri umerennykh temperaturakh okhlazhdeniya [Tekst]* / V.N. Kukhareno, V.V. Kuznetsov // *Sb. tezisov dop. XXI mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Informatsionnyye tekhnologii: nauka, tekhnika, tekhnologiya, obrazovaniye, zdorov'ye»*. - 15-17, oktyabryu 2014 - Khar'kov, Ukraina - CH. 1. - S. 281.
11. Kuznetsov V.V. *Teoreticheskiy analiz kharakteristik gazovykh kholodil'nykh mashin pri umerennykh temperaturakh okhlazhdeniya: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.05.14 / V. Kuznetsov; Odes. nats. akad. pishchu. tekhnologiy*. - Odessa, 2015. - 21 s.
12. Trandafilov, V.V. *Computer simulation of a Stirling refrigerating machine* / V.V. Trandafilov, M.G. Khmelniuk // *Холодильна техніка та технологія*. - 2015. - Т. 51, вип. 5. - С. 92-100.
13. Beketov V.G. *Partsiyal'noy davleniye vodyanogo para vo vlazhnyy gaze i odnositel'naya vlazhnost'* // *Teplofizika vysokikh temperatur, 1999 T. 37. - № 6. - S. 876-880.*

**К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ СТИРЛИНГА В
СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ**

Анотация: описано принцип работы сушарки с тепловым насосом Стирлинга.

Ключевые слова: влажность, температура, точка росы, тепловой насос Стирлинга.

SOME PROBLEMS OF USING STIRLING HEAT PUMPS IN DRYING INSTALLATIONS

Summary: we describe the principle of the dryer with heat pump Stirling.

Keywords: active ventilation, agricultural material, humidity, temperature, yeast-pump of Stirling.