DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-008-7.1-5

МОДИФІКАЦІЯ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ МАГНЕТРОНІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Колесниченко Н. О.

ВСТУП

Існують особливості взаємодії мікрохвильового електромагнітного поля з полярними діелектриками, наприклад, об'ємний нагрів матеріалу й локальний нагрів. Унаслідок цього мікрохвильова обробка здатна приводити до нових ефектів і появи унікальних властивостей матеріалів[1][2][3]. Мікрохвильові технології привабливі тим, що дозволяють отримувати якісно нові матеріали, чого неможливо досягти іншими методами термічної обробки. У зв'язку із цим зрозумілий інтерес до використання мікрохвильового нагріву, який особливо сильно проявився останнім часом. Відповідно, посилився інтерес до конструювання промислових мікрохвильових пристроїв, що пов'язано зі значним здешевленням комплектувальних елементів для мікрохвильової техніки. Мікрохвильовий (діелектричний) нагрів із використанням енергії змінного електромагнітного поля мікрохвильового діапазону має перспективи використання в різних галузях промисловості[4][5].

[1] Okeke C., Abioye A.E., Omosun Y. Microwave heating application in food processing. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 2014. Vol. 9 (4). P. 29–34.

[2] Bykov Yu.V., Egorov S.V., Eremeev A.G., etc. Abrication of Metal-Ceramic Functionally Graded Materials by Microwave Sintering. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2012. Vol. 3. Issue 3. P. 261–269.

[3] El-Naggar S.M., Mikhaiel A.A. Disinfestation of stored wheat grain and flour using gamma rays and microwave heating. *Journal of Stored Products Research*. 2011. Vol. 47. Issue 3. P. 191–196.

[4] Puligundla P., Abdullah S.A., Choi W., Jun S., Oh S.E., Ko S. Potentials of Microwave Heating Technology for Select Food Processing Applications – a Brief Overview and Update. *Food Process Technology*. 2013. Vol. 4. Issue 11. P. 2–9.

[5] Бурдо О.Г., Сиротюк И.В., Альхури Ю., Левтринская Ю.О. Микроволновая энергия как фактор интенсификации тепломассопереноса и формирования полиэкстракта. *Problemele energeticii regionale*. 2016. Vol. 1 (36). P. 59–71.

Доцільність застосування мікрохвильового нагріву зумовлена низкою показників, серед яких можна назвати[6]:

– можливість миттєвого керованого нагріву або локального нагріву;

– економія площ, що відводяться для зберігання, або обладнання, що випливає зі значного скорочення циклу обробки;

– зменшення усушки й втрат в процесі обробки;

– вища якість оброблюваної продукції;

– значне зменшення теплових втрат у навколишнє середовище й зниження її забруднення;

– висока бактерицидна дія мікрохвильової енергії;

– безінерційність нагріву і можливість повної автоматизації процесу.

Однак впровадження мікрохвильових технологій гальмує те, що деякі важливі технічні питання не розв'язані. До одного з таких питань належить проблема забезпечення теплового режиму генератора мікрохвильової енергії. Водночас проблемі забезпечення теплового режиму магнетрона слід приділяти велику увагу, тому що під час підвищення температури поверхні анодного блоку вище допустимої генератор швидко виходить із ладу. Анодний блок – це основна частина магнетрона. Анодний блок складається з мідного циліндра з порожнинами в центрі, які є кільцевою системою об'ємних резонаторів. Електронний коефіцієнт корисної дії магнетрона, що визначає ефективність перетворення енергії електронного потоку в енергію високочастотних коливань, досить високий (до 80 %), проте практично вся решта виділяється у вигляді тепла на анодному блоці, викликаючи його розігрів. Для його охолодження на поверхні малопотужних магнетронів, які випускаються для мікрохвильових печей, встановлюють ребристі радіатори. Є певний інтерес застосування таких магнетронів для промислових установок, для чого слід зробити систему охолодження надійнішою. Малопотужні магнетрони, які випускаються промисловістю, розраховані на побутові мікрохвильові печі. Під час використання їх у промислових установках такі магнетрони часто перегріваються та виходять із ладу. Водночас доцільність їх використання пов'язана з тим, що вони досить надійні (в разі дотримання теплових режимів) і значно дешевше магнетронів із

[6] Mujumdar S. Arun. Handbook of Industrial Drying. 4th Edition – CRC Press. Taylor Francis Group, 2014. 1348 p.

високою вихідною потужністю. Крім того, рівномірний розподіл мікрохвильової енергії легше досягти застосуванням декількох магнетронів малої потужності, ніж одного потужного. Проблема підтримки стійкого теплового режиму магнетронів із вихідною потужністю до 1 кВт у процесі їх тривалого застосування в установках промислового призначення може бути розв'язана шляхом заміни системи повітряного охолодження (далі – СПО) на систему рідинного охолодження (далі – СРО). Водночас необхідна заміна ребер, установлених на анодному блоці, на сорочку охолодження, щільно підігнану до поверхні анода. Перехід на СРО повинен супроводжуватися тепловими конструкторськими розрахунками, результатом яких є визначення робочих параметрів системи. Актуальність роботи пов'язана з тим, що модернізація системи забезпечення теплових режимів (далі – СЗТР) магнетронів, які випускаються, малої потужності дотепер часу не проводилася, оскільки їх застосування обмежувалося умовами роботи домашніх мікрохвильових печей. Для нетривалої роботи в домашніх умовах система повітряного охолодження є кращою, але в разі використання у виробництві не гарантує надійності підтримки необхідного температурного режиму.

1. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

У роботі[7] запропоновано метод модифікації системи охолодження серійних магнетронів, які використовуються в побутових і промислових мікрохвильових печах. Модифікація полягає в переході з повітряної системи охолодження на водяну. Показано, що рідинне охолодження може бути організовано навивкою тонкостінної мідної трубки безпосередньо на корпус приладу або установкою водяного радіатора у вигляді моноблока.

Однак не наведено результати теплових розрахунків розроблених систем. Без надійних залежностей, які дозволяють оцінити режимні параметри роботи СРО, конструювання не буде завершеним. Питання конструювання та пов'язаності частин мікрохвильових пристроїв викладені в роботі Д. Позара[8].

[7] Тихонов В.Н., Иванов И.А., Крюков А.Е., Тихонов А.В. Бюджетные генераторы для микроволновых плазмотронов. *Прикладная физика*. 2015. № 5. С. 102–106.

[8] Pozar D.M. Microwave Engineering. 4-rd edition. New York : Wiley, 2012. 756 p.

Представлені дані дозволяють встановити фундаментальні концепції конструювання мікрохвильових пристроїв. Однак системам охолодження та їх модернізації приділяється не досить уваги. У статті А. Уолла[9] розглядаються особливості перетворення електричної енергії в енергію мікрохвильового поля та результати моделювання частотних характеристик магнетронів у безперервному режимі. Дослідження частотних характеристик магнетронів та їх аналіз показує, що флуктуація частоти в магнетронних генераторах пов'язана з електронно-хвильовим механізмом взаємодії, режимом роботи приладу, умовами й особливостями його експлуатації та іншими факторами. Це підкреслює важливість застосування надійної системи забезпечення теплового режиму магнетрона. У разі відхилення від вимог до підтримки стабільної температури анодного блоку зсувається робоча точка магнетрона за вихідною частотою. Зрушення робочої точки призводить до погіршення ефективності роботи магнетрона як джерела енергії. Крім того, в разі перегрівання зменшується термін служби магнетрона.

Важливість розробки надійної СЗТР відзначається в статті В.І. Азаренкова й А.С. Куценка[10]. Указується, що вплив зміни температури на надійність апаратури проявляється, по-перше, в зміні (оборотному й незворотному) електричних параметрів і характеристик виробів, по-друге, – залежно від показників надійності виробів від температури. Одним із головних етапів проєктування, визначальним напрямом всієї розробки системи забезпечення теплових режимів є вибір способу охолодження магнетронів[11]. Представлені результати експериментальних досліджень можливої нестабільності частоти в магнетронах, включаючи результати дослідження впливу температури анодного блоку на частоту генерації. Установлено, що підвищення температури анодного блоку від 20 °С до 60 °С призводить до зниження частоти генерації магнетрона на 0,1 %. Стабілізація

[9] Wall Alan. The Radar System – Technical Principles. *Radar and ARPA Manual*. 2014. Published by Elsevier Ltd. P. 29–137.

[10] Азаренков В.И., Куценко А.С. Методика и алгоритм инженерного расчета температурного режима радиоэлектронной аппаратуры. *Вісник національного технічного університету ХПІ*. 2013. № 2 (976). С. 22–28.

[11] Чурюмов Г.И., Экезли А.И. Моделирование частотных характеристик магнетрона с двумя выводами энергии. *Прикладная радиоэлектроника*. 2012. Том 11. № 1. С. 63–71.

температури анодного блоку сприяє стабілізації частоти. Дослідження системи охолодження малопотужного магнетрона з використанням теплообміну з природною конвекцією відбиті в роботі Й. Лі й Дж. Лі [12]. Виявлено визначальний вплив температури на дрейф потужності магнетрона.

Можливості вдосконалення СПО розглядаються в статті Д. Парка й інших[13]. Показано, що зменшення товщини ребра з 0,6 мм до 0,5 мм приводить до зниження ваги на 16,7 % та інтенсифікації теплообміну. Однак дані поширюються на магнетрони, які працюють у складі домашніх мікрохвильових печей. У зв'язку з доцільністю переходу на СРО під час проєктування промислових установок виникає необхідність розрахунку коефіцієнта тепловіддачі від поверхні анодного блоку до теплоносія. У процесі організації рідинного охолодження анодного блоку теплоносій циркулює в кільцевому каналі. У статті В.П. Александренкова[14] розрахунково-аналітичним методом визначено ефективність інтенсифікації тепловіддачі в кільцевому каналі в разі центрального теплопідводу. Водночас у роботі не враховується закручування потоку всередині кільцевого каналу. У роботі Е.А. Болтенка й інших[15] експериментальним шляхом одержано, що під час використання інтенсифікаторів різної форми на опуклій поверхні, що обігрівається, спостерігалося значне збільшення ефективності теплоз'єму. Коефіцієнт тепловіддачі в 1,8 раза вище, ніж для гладких кільцевих каналів. Це говорить про необхідність коректного підбору розрахункових формул, що зображують реальні умови протікання теплообмінних процесів.

[12] Lee Yong-Soo, Lee Jong-Soo. A study on the cooling system of low power magnetron by using the natural convection heat transfer. *4th IEEE International Conference on Vacuum Electronics.* 2003. P. 134–135.

[13] Park Ho Dong, Seo Eung Ryeol, Lee Myoung Keun Kwon Chang Seon. A study on thermal fluid flow of magnetron cooling for microwave oven. *Journal of Mechanical Science and Technology*. April 2019. Vol. 33. Issue 4. P. 1915–1923.

[14] Александренков В.П. Исследование эффективности интенсификации теплоотдачи в кольцевом канале при центральном теплоподводе. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2012. Vol. 4. С. 43–50.

[15] Болтенко Э.А., Варава А.Н., Дедов А.В., Захаренков А.В., Комов А.Т., Малаховский С.А. Исследование теплоотдачи и гидравлического сопротивления в кольцевом канале с интенсификаторами теплообмена. *Теплоэнергетика*. 2015. Vol. 3. С. 22–28.

Було виявлено[16], що, хоча існують різні залежності для визначення коефіцієнта тепловіддачі в кільцевих каналах, область їх застосування не досить добре узгоджується з умовами тепловіддачі в сорочці охолодження магнетронів.

Малопотужні магнетрони, які випускаються промисловістю, призначені для домашніх мікрохвильових печей і працюють нетривалий час у комфортних умовах. Система повітряного охолодження в такому випадку оптимальна. Водночас здійснюються спроби переходу до мікрохвильових технологій термообробки матеріалів, які стають все популярнішим у світі. Для реалізації мікрохвильових технологій необхідно надійне й ефективне обладнання. Ці питання розв'язуються застосуванням розосереджених малопотужних магнетронів, укомплектованих системою охолодження, що не допускає засмічення теплопередавальної поверхні й стрибків температури.

Усе це дає підстави стверджувати, що доцільна заміна СПО на СРО для промислових мікрохвильових установок. Оскільки мікрохвильова промислова техніка знаходиться в стадії розробки, конструкторські розрахунки СРО дотепер не проводилися. Основним завданням модернізації системи охолодження є проведення дослідження теплообміну в кільцевому каналі сорочки охолодження анодного блоку й оцінка працездатності СРО.

2. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є аналітичне вивчення функціонування рідинної системи охолодження анодного блоку магнетрона з вихідною потужністю 1,0 кВт. Це дасть можливість здійснити модернізацію системи охолодження з подальшим використанням магнетронів у промислових мікрохвильових пристроях.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

– проаналізувати вплив термічних опорів теплопровідності контактних плям і повітряного зазору, що виникають під час монтажу сорочки охолодження, на теплопередачу від поверхні анодного блоку до теплоносія;

– отримати залежність для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі від поверхні анодного блоку до теплоносія, що циркулює в сорочці охолодження, та провести розрахунок режиму охолодження

[16] Dirker J., Meyer P. Josua. Convective Heat Transfer Coefficients in Concentric Annuli. *Heat Transfer Engineering*. March 2005. Vol. 26. Issue 2. P. 38–44.

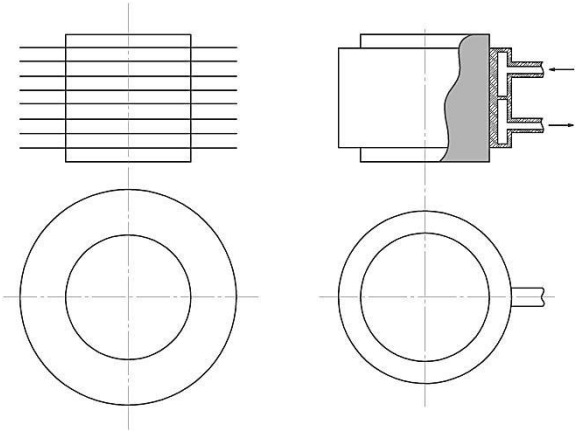
анодного блоку, визначити максимальні температури теплоносіїв в контурі циркуляції відповідно до допустимих значень температури поверхні анодного блоку;

– провести зіставлення теплоносіїв за ефективністю тепловіддачі й запропонувати схемне рішення системи рідинного охолодження для промислової установки.

3. Матеріали та методи дослідження теплообміну в сорочці охолодження анодного блоку

Для організації тепловідведення від поверхні за допомогою СРО потрібно замінити ребра СПО на поверхні анодного блоку, які встановлюються на серійному виробництві магнетронах малої потужності, на сорочку рідинного охолодження. Для забезпечення безаварійної роботи СРО повинна бути забезпечена датчиками тиску, температури й витрати.

На рис. 1 представлена схема анодного блоку магнетрона, що випускається серійно, в первісному вигляді й після заміни СПО на СРО.



а *б*

Рис. 1. Схема анодного блоку магнетрона з елементами системи охолодження: а – магнетрон з елементами СПО; б – модернізований магнетрон із СРО

Робочі рідини (теплоносії) для заправки СРО вибираються за такими критеріями:

– робочий діапазон температур: -20 … + 50°С;
– рідина повинна бути нетоксична;
– відсутність хімічної активності;
– оптимальна вартість;
– доступність.

Відповідно до критеріїв прийнято до розгляду застосування води й 54 % водного розчину етиленгліколю. Вода використовується для роботи за умови температури навколишнього середовища від 2°С до 50°С, а водний розчин етиленгліколю може застосовуватися за умови мінусової температури навколишнього середовища. Теплофізичні властивості цих теплоносіїв добре відомі, що дозволяє проводити надійні теплові розрахунки.

Одним із визначальних питань під час проведення теплових розрахунків був вибір критеріального рівняння для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі. Оскільки подібні канали дотепер не досліджувалися, виникла необхідність виготовлення експериментальної ділянки й проведення експериментів. Схема сорочки охолодження відповідала рис. 1, б. Вимірювання температур проводились на вході й виході каналу за допомогою термопар хромель-алюмель ТП.ХА (К), призначених для контролю температури рідких середовищ. Також вимірювалася температура поверхні анодного блоку в трьох точках, дані по яких потім усереднювалися. Характеристики каналу такі: більший діаметр D_z = 0,072 м; менший d = 0,052 м; довжина h_z = 0,04 м. Діапазон зміни температури теплоносія t = 50 ... 100 °С; об'ємна витрата теплоносія G = $1{,}5\cdot10^{-4}$ … $2{,}5\cdot10^{-4}$ $м^3/с$.

Схема СРО для охолодження одиничного магнетрона наведена на рис. 2.

СРО заправляється теплоносієм перед початком роботи мікрохвильової установки. Після закінчення заправки система автоматики сигналізує про готовність магнетронів до роботи. Після виходу установки в режим, про що сигналізують індикатори на панелі управління, пристрій може бути переведено в автономний режим роботи. Після закінчення роботи пристрою СРО автоматично відключається.

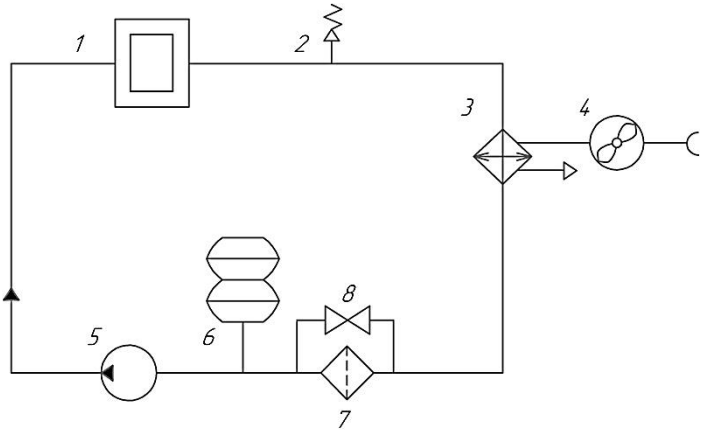


Рис. 2. Система рідинного охолодження мікрохвильового пристрою: 1 – магнетрон, 2 – запобіжний клапан, 3 – повітряно-рідинний теплообмінник, 4 – вентилятор, 5 – насос, 6 – розширювальний бачок, 7 – фільтр механічний, 8 – байпасний вентиль

4. Аналітичне дослідження роботи системи рідинного охолодження анодного блоку магнетрона

Метою розрахунку є визначення температур теплоносія на вході й виході за умови гранично допустимої температури поверхні анодного блоку магнетрона.

Розглядався магнетрон із вихідною потужністю 1,0 кВт. Водночас споживана потужність N_m = 1200 Вт. Потужність, яку необхідно відвести від анодного блоку, Q = 200 Вт. Допустима температура поверхні анодного блоку t_a=100 °С. Сорочка охолодження кріпиться безпосередньо на анодний блок. Анодний блок і сорочка охолодження виготовлені з міді.

4.1. Оцінка вкладу термічних опорів теплопровідності контактних плям і повітряного зазору

Будь-які дві поверхні, що знаходяться в контакті, незалежно від сили їх стиснення, залишаються віддаленими одна від одної через їх шорсткості. Газ, рідина, різні прокладки можуть заповнювати простір між поверхнями, забезпечуючи наявність між ними контактного теплового опору (далі – КТО). Теплота від однієї з дотичних поверхонь до іншої в загальному випадку може

передаватися теплопровідністю через плями контакту й теплопровідністю через повітряне середовище. Повітряне середовище заповнює простір між виступами й шорсткості поверхонь, що контактують. Контактний термічний опір визначався в такій послідовності.

Термічний опір, що створюється повітряними зазорами:

$$R_v = \frac{\delta}{\lambda_v} = 0,016 \text{ м}^2\cdot\text{К /Вт}, \quad (1)$$

де λ_v = 0,0313 Вт/(м·К) – теплопровідність повітря за умови температури t=90 °С; $\delta = 0,5\cdot10^{-3}$ – товщина зазору, м.

Термічний опір плям контакту:

$$R_m = \frac{C\cdot\sigma_v\cdot S}{\lambda_m\cdot N} = 8,94\cdot10^{-5}, \text{ м}^2\cdot\text{К/Вт}, \quad (2)$$

де С = $1,43\cdot10^{-4}$ – коефіцієнт, м; N = $1,0\cdot10^{4}$ ·– нормальне навантаження, Н; λ_m = 400 – коефіцієнт теплопровідності міді, Вт/(м·К); σ_v = 350– тимчасовий опір матеріалу, МПа; S – номінальна (геометрична) площа контакту, $м^2$.

Сумарний контактний термічний опір:

$$R_\Sigma = \frac{R_v\cdot R_m}{R_v + R_m} = 8,9\cdot10^{-5}, \text{ м}^2\cdot\text{К/Вт}. \quad (3)$$

Виходячи зі знайденого термічного опору, можна визначити стрибок температур у місці контакту:

$$\Delta t = q\cdot R_\Sigma = 3,02\cdot10^3\cdot8,9\cdot10^{-5} = 0,27 \text{ °С}. \quad (4)$$

Перепад температур представляється незначним, проте для уточнення розрахунку теплопередачі контактний опір доцільно враховувати.

4.2. Розрахунок режиму рідинного охолодження анодного блоку магнетрона

У результаті обробки експериментальних даних отримана емпірична залежність (5) для середнього коефіцієнта тепловіддачі в умовах вимушеного руху рідини в кільцевому каналі. Під час охолодження моделі анодного блоку спостерігалися в'язкісні й перехідні режими руху.

$$Nu = \frac{\alpha\cdot d_z}{\lambda_ж} = 0,22\cdot Pe^{0,38}\cdot Ra^{0,1}\left(\frac{Pr_ж}{Pr_{ст}}\right)^{0,25}. \quad (5)$$

де Ra – число Релея, яка розраховується за еквівалентним діаметром каналу; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості теплоносія; Pe – число Пеклі.

Запропонована залежність враховує особливості руху рідини в сорочці охолодження, зокрема, закручування потоку приводить до інтенсифікації теплообміну.

Отримано, що коефіцієнт тепловіддачі дорівнює α = 2718 Вт/(м^2·К) у разі використання води як теплоносія. Водночас швидкість теплоносія в кільцевому каналі становила w = 0,09 м/с. Коефіцієнт теплопередачі з урахуванням термічного опору анодного блоку дорівнює k = 2189 Вт/(м^2·К). Зміна температури води під час проходження через сорочку охолодження:

$$\delta t = \frac{Q}{Cp \cdot G} = 1,04 \ ^\circ C. \quad (6)$$

Середня температура теплоносія:

$$t_g = t_a - \frac{Q}{K \cdot F} = 88,5 \ ^\circ C, \quad (7)$$

де t_a – максимально допустима температура поверхні анодного блоку, °С.

Тоді температура води на вході в сорочку охолодження складе t′ = 88 °С, а на виході – t′ = 89 °С. Розрахунок дозволяє зробити висновок, що для нормальної роботи магнетрона температура води на вході в сорочку охолодження не повинна перевищувати 90°С.

Під час використання 54 % водного розчину етиленгліколю як теплоносія коефіцієнт тепловіддачі дорівнює α = 1282 Вт/(м^2·К). Зміна температури теплоносія під час проходження через сорочку охолодження $\delta t = 1,2 \ ^\circ C$, коефіцієнт теплопередачі k = 1151 Вт/(м^2·К), середня температура теплоносія $t_g = 76 \ ^\circ C$. Для нормальної роботи магнетрона температура водного розчину етиленгліколю на вході в сорочку охолодження не повинна перевищувати 75°С.

4.3. Зіставлення теплоносіїв за ефективністю тепловіддачі. Схемне рішення СРО для промислової установки

Завдяки кращим теплофізичним властивостям, застосування води як теплоносія найприйнятніше. Розрахунки показали, що під час використання води коефіцієнт тепловіддачі дорівнює α = 2718 Вт/(м^2·К), під час використання 54 % водного розчину етиленгліколю як теплоносія коефіцієнт тепловіддачі дорівнює α = 1282 Вт/(м^2·К). Таким чином, застосування води збільшує

у 2,1 раза інтенсивність тепловіддачі. Коефіцієнт теплопередачі з урахуванням термічного опору анодного блоку під час використання води дорівнює k = 2189 Вт/(м^2·К), під час використання етиленгліколю – k = 1151 Вт/(м^2·К). Коефіцієнт теплопередачі збільшується в 1,9 раза. Однак можлива робота мікрохвильових установок за умови від'ємних температур навколишнього середовища, в такому випадку виникає необхідність застосування водних розчинів етиленгліколю.

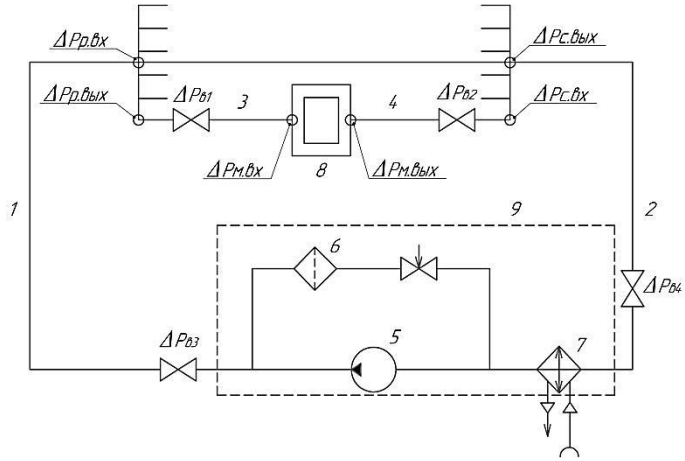


Рис. 3. Схема СРО для мікрохвильового пристрою:
1 – лінія нагнітання, 2 – лінія всмоктування, 3 – вхід у сорочку охолодження магнетрона, 4 – вихід із сорочки охолодження, 5 – насос, 6 – фільтр, 7 – теплообмінник, 8 – магнетрон, 9 – контур СРО

Під час розробки мікрохвильових пристроїв часто виникає необхідність застосування декількох магнетронів залежно від розрахункової споживаної потужності. У такому випадку СРО може об'єднувати у свій контур всі сорочки охолодження за паралельною схемою. Гідравлічна схема СРО, пропонована для забезпечення теплового режиму шести магнетронів, представлена на рис. 3.

Конструктивно СРО може бути виконана з урахуванням можливості легкої заміни деталей і підключення до мікрохвильового пристрою, як показано на розробленій схемі.

5. Обговорення результатів дослідження процесів теплообміну в сорочці охолодження

Оптимальною системою забезпечення теплового режиму магнетронів, які входять до складу пристроїв для термообробки матеріалів під час безперервної та тривалої роботи, є система рідинного охолодження із замкнутим контуром циркуляції. Пропонована заміна системи повітряного охолодження на рідинне для магнетронів малої потужності дозволить стабілізувати температуру й підвищити надійність роботи пристрою. Водночас передбачається встановлення сорочки охолодження безпосередньо на анодний блок. Для інтенсивного теплообміну необхідно, щоб термічний опір контакту сорочки охолодження та поверхні анодного блоку були максимально знижені. Розрахунки показують, що перепад температур у місці зіткнення поверхонь анодного блоку й сорочки охолодження за умови товщини зазору 0,5 мм і з урахуванням контактного опору не перевищують 0,3°С. Для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі запропонована емпірична залежність (5), отримана за результатами теплових експериментів на моделі. Застосування води як теплоносія збільшує коефіцієнт тепловіддачі у 2,1 раза в порівнянні з 54 % водним розчином етиленгліколю. Це пояснюється відмінністю теплофізичних властивостей. Коефіцієнт теплопередачі з урахуванням термічного опору анодного блоку в 1,9 раза вище для води. Таким чином, застосування води представляється кращим. Однак за умови від'ємних температур навколишнього середовища рекомендується заправляти систему рідинного охолодження водними розчинами етиленгліколю.

Переваги дослідження полягають у максимальному наближенні умов отримання розрахункової залежності до реальних теплових процесів у сорочці охолодження, що дозволяє отримувати певні попередні дані для подібних систем. Також слід зазначити, що запропонована схема СРО передбачає застосування декількох магнетронів, що важливо для забезпечення рівномірності нагріву матеріалу в пристрої. Обмеженням дослідження є те, що розрахунки проведені для магнетрона з вихідною потужністю 1 кВт, в той час, як можливе застосування малопотужних магнетронів з іншими характеристиками.

Надалі доцільно розглянути вплив геометричних характеристик каналу охолодження на інтенсивність тепловіддачі, а також

провести дослідження на натурному зразку з метою коригування розрахункових даних.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз впливу термічних опорів теплопровідності контактних плям і повітряного зазору на теплопередачу від поверхні анодного блоку до теплоносія. За умови товщини повітряного зазору 0,5 мм сумарний контактний термічний опір становить 8,9 10^{-5} ($м^2 \cdot К$) / Вт. За умови щільності теплового потоку $3{,}02 \cdot 10^3$ Вт/ $м^2$ перепад температур складає 0,27°С. Для уточнення розрахунків процесу теплопередачі контактний опір доцільно враховувати.

2. Отримано емпіричну залежність для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі від поверхні анодного блоку до теплоносія, що циркулює в сорочці охолодження. Для забезпечення температурного режиму поверхні анодного блоку температура води на вході в сорочку охолодження не повинна перевищувати 88°С, а водного розчину етиленгліколю – 75°С.

3. Коефіцієнт тепловіддачі в разі використання води як теплоносія за умови швидкості w = 0,09 м/с у кільцевому каналі, площею теплообмінної поверхні $F = 6{,}5 \cdot 10^{-3}$ $м^2$ дорівнює 2718 Вт/($м^2 \cdot К$), що у 2,1 раза вище, ніж у разі використання 54 % водного розчину етиленгліколю. Коефіцієнт теплопередачі з урахуванням термічного опору анодного блоку в 1,9 раза вище для води. Застосування розчинів етиленгліколю обґрунтовано в разі роботи СРО за умови від'ємних температур. Схемне рішення СРО дозволяє об'єднувати в загальний контур циркуляції сорочки охолодження всіх магнетронів, передбачених в установці. Конструктивно СРО може бути виконана з урахуванням можливості легкої заміни деталей.

АНОТАЦІЯ

Розглянуто питання забезпечення теплового режиму анодного блоку магнетрона шляхом заміни системи повітряного охолодження на систему рідинного охолодження. Визначено, що система рідинного охолодження найбільш відповідна для магнетронів, які натепер передбачають систему повітряного охолодження, однак не

розраховані на тривалу роботу в складі промислових мікрохвильових установок. Організація системи рідинного охолодження дозволить магнетрону працювати тривалий час без перегріву й в сприятливих умовах, за яких виключено забивання частинками й пилом поверхні теплообміну й виникнення перегріву поверхні анодного блоку. Основним елементом розроблюваної системи рідинного охолодження є сорочка охолодження, що являє собою кільцевий канал із теплопровідного матеріалу. Сорочка охолодження кріпиться безпосередньо на анодний блок, водночас ступінь стиснення поверхонь і товщина повітряного зазору повинні забезпечити мінімальний сумарний термічний опір. Для визначення коефіцієнтів тепловіддачі отримана емпірична залежність, яка відбиває той факт, що під час охолодження анодного блоку раціональними є в'язкі й перехідні режими руху. Визначено основні теплові характеристики процесу охолодження, що містять коефіцієнт теплопередачі, зміну температури теплоносія, максимально допустиму температуру на вході. Розрахунки проведені для двох видів теплоносіїв: вода й 54 % водний розчин етиленгліколю. Запропоновано схему системи рідинного охолодження, яка передбачає охолодження від 1 до 6 магнетронів. Застосування такого схемного рішення та вибір раціональних розрахункових режимів дозволяє розв'язати проблему підвищення ефективності виробництва й надійності роботи мікрохвильової техніки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Okeke C., Abioye A.E., Omosun Y. Microwave heating application in food processing. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 2014. Vol. 9 (4). P. 29–34.

2. Bykov Yu.V., Egorov S.V., Eremeev A.G., etc. Abrication of Metal-Ceramic Functionally Graded Materials by Microwave Sintering. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2012. Vol. 3. Issue 3. P. 261–269.

3. El-Naggar S.M., Mikhaiel A.A. Disinfestation of stored wheat grain and flour using gamma rays and microwave heating. *Journal of Stored Products Research*. 2011. Vol. 47. Issue 3. P. 191–196.

4. Puligundla P., Abdullah S.A., Choi W., Jun S., Oh S.E., Ko S. Potentials of Microwave Heating Technology for Select Food Processing Applications – a Brief Overview and Update. *Food Process Technology*. 2013. Vol. 4. Issue 11. P. 2–9.

5. Бурдо О.Г., Сиротюк И.В., Альхури Ю., Левтринская Ю.О. Микроволновая энергия как фактор интенсификации тепломассопереноса и формирования полиэкстракта. *Problemele energeticii regionale*. 2016. Vol. 1 (36). P. 59–71.

6. Mujumdar S. Arun. Handbook of Industrial Drying. 4th Edition – CRC Press. Taylor Francis Group, 2014. 1348 p.

7. Тихонов В.Н., Иванов И.А., Крюков А.Е., Тихонов А.В. Бюджетные генераторы для микроволновых плазмотронов. *Прикладная физика*. 2015. № 5. С. 102–106.

8. Pozar D.M. Microwave Engineering. 4-rd edition. New York : Wiley, 2012. 756 p.

9. Wall Alan. The Radar System – Technical Principles. *Radar and ARPA Manual.* 2014. Published by Elsevier Ltd. P. 29–137.

10. Азаренков В.И., Куценко А.С. Методика и алгоритм инженерного расчета температурного режима радиоэлектронной аппаратуры. *Вісник національного технічного університету ХПІ*. 2013. № 2 (976). С. 22–28.

11. Чурюмов Г.И., Экезли А.И. Моделирование частотных характеристик магнетрона с двумя выводами энергии. *Прикладная радиоэлектроника*. 2012. Том 11. № 1. С. 63–71.

12. Lee Yong-Soo, Lee Jong-Soo. A study on the cooling system of low power magnetron by using the natural convection heat transfer. *4th IEEE International Conference on Vacuum Electronics. 2003*. P. 134–135.

13. Park Ho Dong, Seo Eung Ryeol, Lee Myoung Keun Kwon Chang Seon. A study on thermal fluid flow of magnetron cooling for microwave oven. *Journal of Mechanical Science and Technology*. April 2019. Vol. 33. Issue 4. P. 1915–1923.

14. Александренков В.П. Исследование эффективности интенсификации теплоотдачи в кольцевом канале при центральном теплоподводе. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2012. Vol. 4. С. 43–50.

15. Болтенко Э.А., Варава А.Н., Дедов А.В., Захаренков А.В., Комов А.Т., Малаховский С.А. Исследование теплоотдачи

и гидравлического сопротивления в кольцевом канале с интенсификаторами теплообмена. *Теплоэнергетика*. 2015. Vol. 3. С. 22–28.

16. Dirker J., Meyer P. Josua. Convective Heat Transfer Coefficients in Concentric Annuli. *Heat Transfer Engineering*. March 2005. Vol. 26. Issue 2. P. 38–44.

Information about authors:
Kolesnychenko N. O.,
PhD,
Associate Professor at the Department of Technical Support
Odessa Military Academy
10, Fontanska doroha str., Odessa, 65000, Ukraine