



УДК 629.114.42

DOI: 10.37128/2520-6168-2021-3-5

**РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ПІРОЛІЗНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ З
НАПРАВЛЕНИМ РОЗПОДІЛЕННЯМ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ****Веселовська Наталія Ростиславівна**, д.т.н., професор**Брацлавець Богдан Сергійович**, аспірант**Ялина Ольга Олександрівна**, аспірантка

Вінницький національний аграрний університет

Іскович-Лотоцький Ростислав Дмитрович, д.т.н., професор

Вінницький національний технічний університет

Natalia Veselovska, Ph.D., Professor**Bohdan. Bratslavets**, postgraduate**Olha Yalina**, postgraduate

Vinnytsia National Agrarian University

Rostyslav Iskovich-Lototskyy, Doctor of Science (Engineering), Professor

Vinnytsia National Technical University

Переробка відходів в даний час набуває особливої значущості у всьому світі. Збільшується номенклатура вживаних препаратів, об'єми і ступінь небезпеки відходів, що утворюються в результаті діяльності промислових установ. У зв'язку з цим зростає небезпека епідемії. Тому створення ефективної конструкції топки як основного вузла піролізної установки є актуальною задачею. Призначення топкового середовища – створення в робочій камері необхідних і оптимальних фізичних і хімічних умов для здійснення термотехнологічних, теплотехнічних і механічних процесів і захист вихідних матеріалів і отриманих цільових продуктів від небажаних хімічних процесів.

У якості реагенту відбору тепла застосовуються наступні речовини: повітря, інертні й рециркуляційні гази, вода, пара тощо. При необхідності повільного зниження температури, охолодження матеріалів і продуктів здійснюється разом з піччю. Теплообмін у робочій камері печей є одним з основних процесів, здійснюваних у них, і являє собою цілеспрямований процес переносу теплоти в хіміко-термічній пічній системі «матеріал-середовище-футеровка», що обумовлено спеціально створюваним і виникаючим при протіканні термотехнологічних процесів полем температур між елементами системи для зміни їх внутрішньої енергії. За рахунок теплообміну забезпечуються хімічні й фізичні перетворення вихідних матеріалів, а також протікання мікробіологічних і колоїдних процесів. Процеси теплообміну в установці для утилізації відходів протікають у складних умовах і характеризуються рядом специфічних особливостей. Одна з основних особливостей – висока інтенсивність теплопередачі. Іншою особливістю теплових процесів є нестационарне температурне поле в робочій камері печі. Теплообмін у робочій камері печі здійснюється трьома видами – теплопровідністю, конвекцією й тепловим випромінюванням, будь-якою їхньою комбінацією або всіма видами одночасно, однак один вид теплообміну завжди переважає над іншими в повному обсязі або в певній зоні печі.

Ключові слова: конструкція, піролізна установка, утилізація, відходи, теплові потоки

Ф. 14. Рис. 6. Літ. 8.

1. Постановка проблеми

Утилізація сміття – одна з важливих проблем сучасної цивілізації. У нашій країні 90% відходів піддаються похованню (депонуванню) на полігонах, хоча це пов'язане із транспортними витратами й відчуженням більших територій. Крім того, полігони часто не відповідають елементарним санітарно-гігієнічним вимогам і є вторинними джерелами забруднення навколишнього середовища. Але, якщо від більшості відходів ще можна порівняно безпечно звільнитися шляхом депонування, то, наприклад, медичні відходи підлягають обов'язковій переробці. Вони значно відрізняються від інших відходів тим, що вони дуже небезпечні для людини, через наявність у їхньому складі збудників різних інфекційних захворювань, токсичних, але й нерідко й радіоактивних речовин.

Промислові установки для утилізації відходів – це високотемпературні термотехнологічні процесори (пристрої) з робочою камерою, обгороджені від навколишньої атмосфери, призначені для одержання цільових продуктів за рахунок здійснення фізичного, хімічного або колоїдного перетворення вихідних матеріалів при тепловому впливі.

Установка для утилізації відходів являє собою складний агрегат, що складається із камери спалювання й допоміжного устаткування, причому всі елементи пічної установки взаємно пов'язані в роботі. До цих елементів відносяться: піч – реактор, установки для спалювання палива або агрегати перетворення електричної енергії в теплову; частини що сполучаються; прилади для керування гідравлічним режимом установки для утилізації відходів.

Теплообмін випромінюванням відбувається при квантовому переході атомів і молекул зі стаціонарних станів з більшою енергією в стаціонарні стани з меншою енергією. Для безперервного випромінювання тіло повинне одержувати енергію ззовні. Тому що переходи атомів і молекул з одного стану в інше носять різний характер, випромінювання має різні довжини хвиль. Теплове випромінювання є одним з видів електромагнітних коливань із довжиною хвиль від 0,4 до 40 мкм. Тепловіддача випромінюванням у промислових печах відіграє домінуючу роль.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Установка для утилізації відходів являє собою складний агрегат, що складається із камери спалювання й допоміжного устаткування, причому всі елементи пічної установки взаємно пов'язані.

Твердими відходами хімічних виробництв є паперові мішки, дрантя, дерев'яна тара й інші відходи, які просочені хімічними речовинами. Спалювання твердих відходів проводиться в установках для утилізації відходів, двокамерна з перевальною стінкою, Конструкція найбільш простої установки для утилізації відходів для спалювання твердих відходів [1, 2, 3], отриманих у результаті діяльності лікувально-профілактичних установ (інсинератор) представлена на рисунку 1.1.

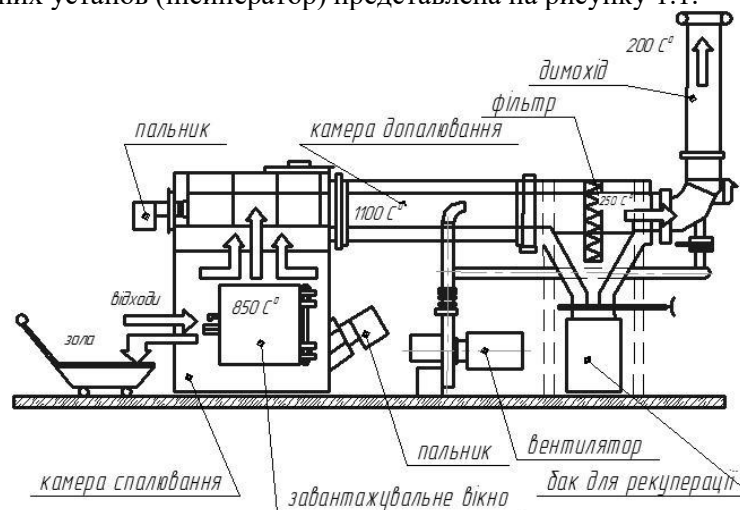


Рис. 1. Установка для утилізації відходів

Інсинератор «Muller» виробництва «Cronpe» (Франція) належить до типу інсинераторів, принцип дії яких базується на застосуванні двоступінчастої схеми піролізного спалювання відходів (900C0) і високотемпературного допалювання залишкових токсичних газів (до 1200C0) у сукупності із двоступінчастою системою газоочищення.

При розробці ефективної піролізної установки для утилізації медичних відходів неможливо не вирішувати проблему вторинного використання тепла відпрацьованих газів, оскільки зниження витрат палива, що забезпечується використанням вторинних енергетичних ресурсів, зменшує шкідливі викиди і знижує забруднення навколишнього середовища і підвищує загальний ККД установки. Тому, використання ефективного теплообмінного вузла з метою удосконалення конструкції піролізної установи для утилізації відходів є актуальною задачею.

3. Мета дослідження

Метою роботи є уніфікація та модернізація піролізної установки для ефективної утилізації відходів, в умовах підвищених санітарно-гігієнічних норм і вимог екологічної безпеки із використанням засобів автоматизації.

4. Основні результати дослідження

Теплообмін у робочій камері печі здійснюється трьома видами – теплопровідністю, конвекцією й тепловим випромінюванням, будь-якою їхньою комбінацією або всіма видами одночасно, однак один вид теплообміну завжди переважає над іншими в повному обсязі або в певній зоні печі.

Теплообмін випромінюванням відбувається при квантовому переході атомів і молекул зі стаціонарних станів з більшою енергією в стаціонарні стани з меншою енергією. Для безперервного випромінювання тіло повинне одержувати енергію ззовні. Тому що переходи атомів і молекул з одного стану в інше носять різний характер, випромінювання має різні довжини хвиль. Теплове випромінювання є одним з видів електромагнітних коливань із довжиною хвиль від 0,4 до 40 мкм. Тепловіддача випромінюванням у промислових печах відіграє домінуючу роль [3, 4].

Кількість енергії dQ_φ , випромінюване елементом поверхні df_1 у напрямку df_2 , пропорційно кількості енергії, випромінюваної по нормалі E_n помноженому на величину просторового кута $d\Omega$ і $\cos\varphi$:

$$dQ_\varphi = E_n d\Omega \cos\varphi dF.$$

Загальна формула теплообміну випромінюванням між двома непрозорими тілами, записана на підставі закону Стефана–Больцмана, має вигляд:

$$Q = \varepsilon_n c_0 \varphi_{обл} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 F_{розр} \tau \right].$$

Де Q – кількість теплоти, передане випромінюванням від першого тіла до другого; ε_n – наведений ступінь чорноти системи, що враховує ступінь чорноти обох тіл і їх взаємне розташування; c_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; $\varphi_{обл}$ – середній кутовий коефіцієнт, або коефіцієнт опромінення, що враховує форму, розміри й взаємне розташування поверхонь; T_1, T_2 – температури першого й другого тіла, $F_{расч}$ – умовна розрахункова площа поверхні теплообміну; τ – час теплообміну.

Оцінимо кількість теплоти Q [4-5] яке передається випромінюванням від стінок топки тосковому тілу в т. A в центрі камери згоряння. Розглянемо три види геометричних форм камер згоряння таких, як циліндр, сфера, паралелепіпед і позначимо їхні геометричні розміри на рисунку 2.

Об'єм камери згоряння циліндричної форми (рис. 2, а):

$$V_u = \pi R^2 L. \quad (1)$$

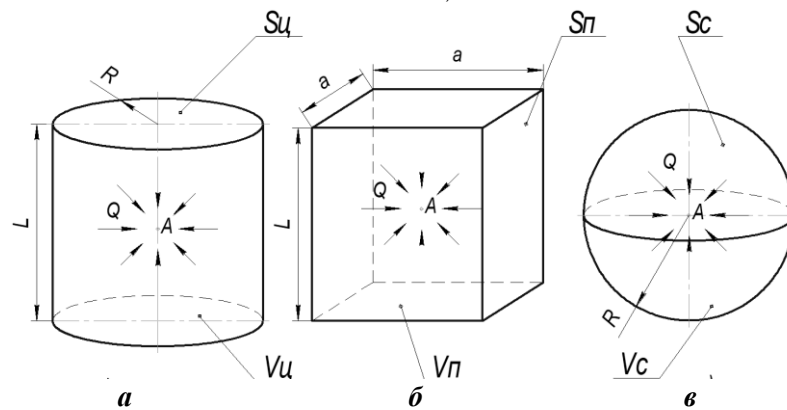


Рис. 2. Геометричні форми камер згоряння топлення

Об'єм камери згоряння форми у формі паралелепіпеда (рис. 2, б)::

$$V_n = a^2 L. \quad (2)$$

Об'єм камери згоряння сферичної форми (рис. 2.1, в):

$$V_c = \frac{4}{3} \pi R^3. \quad (3)$$

Так як продуктивність печі для утилізації відходів однакова, тоді об'єми камер згоряння повинні бути однакові. З рівнянь (2.1), (2.2):

$$V_u = V_n = \pi R^2 L = a^2 L, \quad a = \sqrt{\pi} R. \quad (4)$$



Так як із закону Стефана-Больцмана, випромінювана теплота пропорційна площі випромінюваної поверхні, тоді визначаємо площу поверхні, яке випромінює тепло камер згоряння циліндричної форми й форми паралелепіпеда камер згоряння:

$$S_{\sigma} = 2\pi R^2 + 2\pi RL, \quad (5)$$

$$S_i = 2a^2 + 4aL.$$

Тоді з рівнянь (2.4) і (2.5) знаходимо коефіцієнт порівняння випромінюваної теплоти поверхні камер згоряння:

$$\xi = S_u / S_n = 2a^2 + 4aL / 2\pi R^2 + 2\pi RL = \sqrt{\pi} \left(\frac{R + L}{R\sqrt{\pi} + 2L} \right). \quad (6)$$

Досліджуємо рівняння (6), для цього побудуємо тривимірний графік залежності коефіцієнт порівняння випромінюваної теплоти поверхні камер згоряння від геометричних розмірів на рисунку 3.

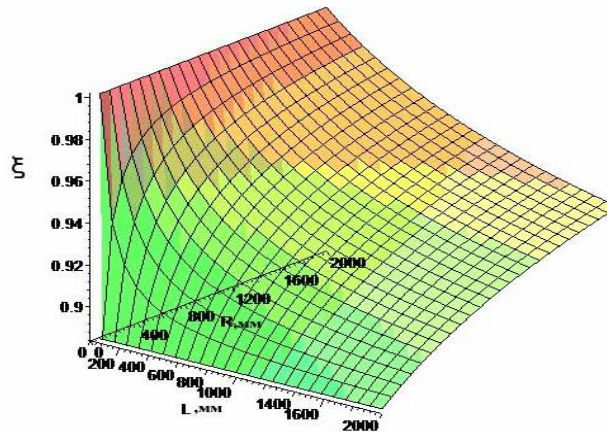


Рис. 3. Коефіцієнт порівняння випромінюваної теплоти поверхні камер згоряння від їхніх геометричних розмірів

З рисунку 2.2 ми бачимо, що $\xi < 1$, тоді при будь-яких значеннях геометричних розмірів камери згоряння площа поверхні, що випромінює тепло, камери згоряння у формі паралелепіпеда буде завжди більше площі поверхні камери згоряння циліндричної форми. Відповідно, із закону Стефана – Больцмана [6-9], випромінювана стінками камери згоряння теплота, завжди буде більше в камері згоряння, яка має форму паралелепіпеда.

Порівняємо кількість теплоти яке передається випромінюванням від стінок топки точковому тілу в т. А, в центрі камери згоряння сферичної форми, і зрівняємо з кількістю теплоти яке передається точковому тілу в т. А в центрі камери згоряння у формі паралелепіпеда.

Так як продуктивність печі для утилізації відходів однакова, тоді об'єми камер згоряння повинні бути однакові. З рівнянь (1), (2), причому приймемо, що $L=a$:

$$V_u = V_n = \frac{4}{3}\pi R^3 = a^3 L, \quad a = \sqrt[3]{\frac{4\pi}{3}} R. \quad (7)$$

Так як із закону Стефана-Больцмана, випромінювана теплота пропорційна площі випромінюваної поверхні, тоді визначаємо площа поверхні випромінюючої тепло, камер згоряння сферичної форми й форми паралелепіпеда, камер згоряння:

$$S_c = 4\pi R^2, \quad (8)$$

$$S_n = 2a^2 + 4aL.$$

Тоді з рівнянь (7) і (8) знаходимо коефіцієнт порівняння випромінюваної теплоти поверхні камер згоряння:

$$\xi = S_c / S_n = 4\pi R^2 / 2a^2 + 4aL = 0,8. \quad (9)$$

З рівняння (9) ми бачимо, що тому що $\xi < 1$, тоді при будь-яких значеннях геометричних розмірів камери згоряння площа поверхні, що випромінює тепло, камери згоряння у формі паралелепіпеда буде завжди більше площі поверхні камери згоряння сферичної форми. Відповідно, із закону Стефана-Больцмана, випромінювана стінками камери згоряння теплота, завжди буде більше в камері згоряння, яка має форму паралелепіпеда.

45

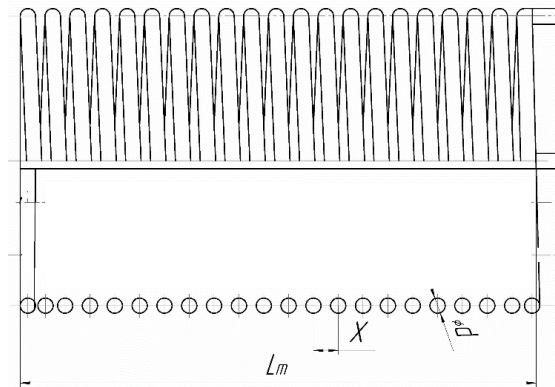


Рис. 6. Розрахункова схема теплообмінного апарата

Конструктивні розміри теплообмінника рівні:

$$D=1,1 \text{ м}, L=0,9 \text{ м}, L_m=0,7 \text{ м}, X=0,03 \text{ м}, d=0,06 \text{ м}. \quad (10)$$

Довжина витягнутого теплообмінника:

$$L_o=220,36 \text{ м} \quad (11)$$

Площа поверхні нагріву теплообмінника:

$$F = \pi d L_o = 3,14 \cdot 0,06 \cdot 220,36 = 41,515 \text{ м}^2 \approx F_{op} = 41,52 \text{ м}^2. \quad (12)$$

При попередніх розрахунках уточнений коефіцієнт теплопередачі теплообмінного апарата:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum r_{cm} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{16,8} + 3,6 \cdot 10^{-4} + \frac{1}{22209,9}} = 16,55 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}. \quad (13)$$

де $\alpha_1 = 16,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ – коефіцієнт тепловіддачі для води при уточненні, $\alpha_2 = 22209,9 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ – коефіцієнт

тепловіддачі для відпрацьованих газів при уточненні, $\sum r_{cm} = 3,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$ – сумарний термічний опір.

Площа поверхні теплообмінника, при коефіцієнті теплопередачі $K=16,55 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$, і при потужності установки для утилізації відходів $N=63275,946 \text{ Вт}$, а також при середньому температурному напорі $\Delta t_{cp} = 325,86 \text{ К}$:

$$F' = \frac{N}{K \cdot \Delta t_{cp}} = \frac{63275,946}{16,55 \cdot 325,86} = 11,73 \text{ м}^2 > F = 41,52 \text{ м}^2. \quad (14)$$

Із рівняння (14) видно, що наша конструкція теплообмінника ефективно підходить по причині високої площі тепловіддачі.

5. Висновки

Аналіз напрямків удосконалення піролізних установок для утилізації відходів показує, що найбільш перспективним напрямком удосконалення є вторинне використання тепла відпрацьованих газів. Що зменшує шкідливі викиди і знижує забруднення навколишнього середовища і підвищує загальний ККД установки.

Список використаних джерел

1. Іскович-Лотоцький Р. Д., Веселовська Н. Р., Іванчук Я. В., Веселовський Я. П. Розрахунок температурних полів в робочих зонах піролізної установки. *Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»)*. Луцьк. 2013. № 42. С. 113–120.
2. Іскович-Лотоцький Р. Д., Іванчук Я. В. Дослідження динаміки процесу роботи універсального гідравлічного віброудраного приводу для розвантаження транспортних засобів. *Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»)*. Луцьк. 2007. № 20. С. 184–187.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука. 1974. 832 с.
4. Клюев В. В., Глазов В. В., Дубровский А. Х. Клюев А. С. Проектирование систем автоматизации технологических процес сов : справочное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1990. 464с.
5. Пістунів І. М. Проектування інформаційних систем. Д.: Національний гірничий університет, 2008. 71с.



6. Харченко В. С., Скляр В. В., Тарасюк О. М. Методы моделирования и оценки качества и надежности программного обеспечения. Харьков. 2004. 158с.
7. Кунцевич В. М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации. Киев Наукова Думка. 2006. 260 с.
8. Струтинський В. Б., Веселовська Н. Р., Зелінська О. В. Автоматизація проектування технологічних процесів та систем. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2008. 3(52). С.22–30.

References

- [1] Iskovych-Lototsky, R., Ivanchuk, Y., Veselovska, N., Veselovskyy, R. (2013). Rozrakhunok temperaturnykh poliv v robochyykh zonakh piroliznoyi ustanovky [Calculation of temperature fields in the working areas of the pyrolysis unit] *Naukovi notatky*. 42. 184–187. [in Ukrainian].
- [2] Iskovych-Lototsky, R., Ivanchuk, Y. (2007). Doslidzhennya dynamiky protsesu roboty universal'noho hidravlichnoho vibroudnoho pryvodu dlya rozvantazhennya transportnykh zasobiv [Investigation of the dynamics of the universal hydraulic vibration drive for unloading vehicles] *Naukovi notatky*. 20. 184–187. [in Ukrainian].
- [3] Korn, H., Korn, T. (1974). Spravochnyk po matematyke dlya nauchnykh robotnykov y ynzhenerv. [Mathematics Handbook for Scientists and Engineers]. Moscow: Nauka. [in Russian].
- [4] Kliuev, V. V., Hlazov, V. V., Dubrovskiy, A. X., Kliuev, A. S. (1990). Proektyrovanye system avtomatyzatsyy tekhnolohycheskykh protsessov : spravochnoe posobye, 2-eyzd., pererab. y dop. M: Enerhoatomyzdat, Moscow. [in Russian].
- [5] Pistunov, I. M. (2008). Proektuvannia informatsii nykh system. D.: Natsionalnyi hirnychiy universytet, Ukraine. [in Ukrainian].
- [6] Kharchenko, V. S., Skliar, V. V., Tarasiuk, O. M. (2004). Metodu modelyrovanyia y otsenky kachestva y nadezhnosta prohrannnoho obespechenia. Kharkov. [in Russian].
- [7] Kuntsevych, V. M. (2006). Upravlenye v usloviakh neopredelennosti: harantirovannyye rezultatyv. [in Ukrainian].
- [8] Strutyynskiy, V. B., Veselovska, N. R., Zelinska, O. V. (2008). Avtomatyzatsiia proektuvannia tekhnolohichnykh protsesiv ta system. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*, 3(52), 22–30. [in Ukrainian].

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ПИРОЛИЗНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ В НАПРАВЛЕНИИ РАЗДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ

Переработка отходов в настоящее время приобретает особую значимость во всем мире. Увеличивается номенклатура применяемых препаратов, объемы и степень опасности отходов, образующихся в результате деятельности промышленных учреждений. В связи с этим возрастает опасность эпидемий. Поэтому создание эффективной конструкции топки как основного узла пиролитической установки является актуальной задачей. Назначение топочного среды - создание в рабочей камере необходимых и оптимальных физических и химических условий для осуществления термотехнологических, теплотехнических и механических процессов и защита исходных материалов и полученных целевых продуктов от нежелательных химических процессов. В качестве реагента отбора тепла применяются следующие вещества: воздух, инертные и рециркуляционные газы, вода, пар и др. При необходимости медленного снижения температуры, охлаждение материалов и продуктов осуществляется вместе с печью.

Теплообмен в рабочей камере печей является одним из основных процессов, осуществляемых в них, и представляет собой целенаправленный процесс переноса теплоты в химико-термической печной системе «материал-среда-футеровка», что обусловлено специально создаваемым и возникающим при протекании термотехнологических процессов полем температур между элементами системы для изменения их внутренней энергии. За счет теплообмена обеспечиваются химические и физические преобразования исходных материалов, а также протекания микробиологических и коллоидных процессов. Процессы теплообмена в установке для утилизации отходов протекает в сложных условиях и характеризуются рядом специфических особенностей. Одна из основных особенностей - высокая интенсивность теплопередачи. Другой особенностью тепловых процессов является нестационарное температурное поле в рабочей камере печи. Теплообмен в рабочей камере печи осуществляется тремя видами - теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением, любой их комбинацией или всеми видами одновременно, однако один вид теплообмена всегда преобладает над другими в полном объеме или в определенной зоне печи.

Ключевые слова: конструкция, пиролитическая установка, утилизация, отходы, тепловые потоки.

Ф. 14. Рис. 6. Лим. 8.

**DEVELOPMENT OF THE DESIGN OF A PYROLYSIS INSTALLATION FOR WASTE DISPOSAL WITH DIRECTED DISTRIBUTION OF HEAT FLOWS**

Waste recycling is now gaining in importance around the world. The range of drugs used, the volume and degree of danger of waste generated by the activities of industrial institutions is increasing. As a result, the risk of epidemics increases. Therefore, the creation of an effective design of the furnace as the main unit of the pyrolysis unit is an urgent task.

The purpose of the furnace environment is to create in the working chamber the necessary and optimal physical and chemical conditions for the implementation of thermotechnological, thermotechnical and mechanical processes and protection of raw materials and obtained target products from unwanted chemical processes. The following substances are used as heat extraction reagent: air, inert and recirculating gases, water, steam, etc. If necessary, a slow decrease in temperature, cooling of materials and products is carried out together with the oven. Heat transfer processes in the waste disposal plant take place in difficult conditions and are characterized by a number of specific features. One of the main features is the high intensity of heat transfer. Another feature of thermal processes is the non-stationary temperature field in the working chamber of the furnace. Heat exchange in the working chamber of the furnace is carried out in three types - thermal conductivity, convection and thermal radiation, any combination of them or all types simultaneously, but one type of heat transfer always prevails over others in full or in a certain area of the furnace.

Key words: construction, pyrolysis plant, utilization, waste, heat fluxes

F. 14. Fig. 6. Ref. 3.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Іскович-Лотоцький Ростислав Дмитрович – доктор технічних наук, професор кафедри «Галузевого машинобудування» Вінницького національного технічного університету (вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21021, e-mail: islord@ukr.net).

Веселовська Наталія Ростиславівна – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: wnatalia@ukr.net).

Брацлавець Богдан Сергійович – аспірант кафедри «Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна).

Ялина Ольга Олександрівна – аспірантка кафедри «Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна).

Искович-Лотоцкий Ростислав Дмитриевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Отраслевого машиностроения» Винницкого национального технического университета (ул. Хмельницкое шоссе, 95, г. Винница, Украина, 21021, e-mail: islord@ukr.net).

Веселовская Наталия Ростиславовна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Машин и оборудования сельскохозяйственного производства» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: wnatalia@ukr.net).

Брацлавець Богдан Сергеевич – аспирант кафедры «Машин и оборудования сельскохозяйственного производства» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина).

Ялина Ольга Александровна – аспирантка кафедры «Машин и оборудования сельскохозяйственного производства» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина).

Rostyslav Iskovich-Lototsky – Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of "Branch Mechanical Engineering" of Vinnitsa National Technical University (95, Khmelnytsky Shose Str., Vinnytsia, Ukraine, 21021, e-mail: islord@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-3920-3019>).

Nataliia Veselovska – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Machines and Equipment of Agricultural Production of Vinnitsa National Agrarian University (3 Soniachna St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: wnatalia@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-9399-6721>).

Bohdan Bratslavets – postgraduate student of the Department "Machinery and Equipment of Agricultural Production" of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna Street, Vinnytsia, 21008, Ukraine). <https://orcid.org/0000-0002-3315-4837>

Olha Yalina – postgraduate student of the Department "Machinery and Equipment of Agricultural Production" of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna Street, Vinnytsia, 21008, Ukraine). <https://orcid.org/0000-0001-6001-6272>