

Р. Д. Іскович-Лотоцький<sup>1</sup>  
 Я. В. Іванчук<sup>1</sup>  
 Я. П. Веселовський<sup>1</sup>

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СПРЯЖЕНОГО ТЕПЛООБМІНУ В УСТАНОВЦІ ДЛЯ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

Описано практичне застосування програмного комплексу FlowVision 3.09.05 для дослідження теплообмінних процесів під час розробки та вибору раціональних параметрів теплообмінних апаратів камери охолодження піролізної установки для утилізації відходів. У цьому програмному комплексі методом скінченних об'ємів розраховано розподіл температури певних зон і площин теплообмінного апарата і камери охолодження піролізної установки для утилізації відходів, що дозволило оцінити енергоефективність розробленої конструкції теплообмінного апарата і камери охолодження піролізної установки для утилізації відходів.

**Ключові слова:** моделювання, метод скінченних об'ємів, температура, розподіл, теплообмінник.

### Вступ

В розробці теплообмінних апаратів піролізних установок для утилізації відходів однією з головних проблем є створення ефективних конструкцій, до яких висуваються високі техніко-економічні вимоги. Особлива увага приділяється зниженню утворення токсичних речовин у процесі охолодження продуктів згоряння, формуванню оптимального температурного поля на виході з камери охолодження і стінок теплообмінного апарата.

Огляд останніх джерел і публікацій [1, 2] показав, що сьогодні знаходить широке застосування математичне моделювання термодинамічних процесів в теплообмінних апаратах і робочих камерах піролізних установок, за допомогою якого можна глибоко і в повному обсязі дослідити вплив конструктивних і режимних факторів на основні характеристики теплообмінних апаратів і робочих камерах піролізних установок, що дозволить намітити конкретні шляхи їх поліпшення, істотно знизивши при цьому обсяги експериментальних досліджень.

Метою досліджень є моделювання методом скінченних об'ємів в програмному комплексі FlowVision 3.9.03 процесу спряженого теплообміну для отримання розподілу температури поверхонь теплообмінного апарата і площин камери охолодження піролізної установки для утилізації відходів, щоб визначити можливість проектування даного типу конструкції за допомогою автоматизованих систем проектування.

### Результати дослідження

Кафедрою металорізальних верстатів і устаткування автоматизованого виробництва Вінницького національного технічного університету спільно з ТОВ НВП «Гідравліка Вінниця-Сервіс», розроблено піролізну установку (рис. 1) [3, 4], яка дозволяє ефективно утилізувати медичні відходи з мінімальними економічними і технологічними витратами і подальшим ефективним використанням теплової енергії [5, 6].

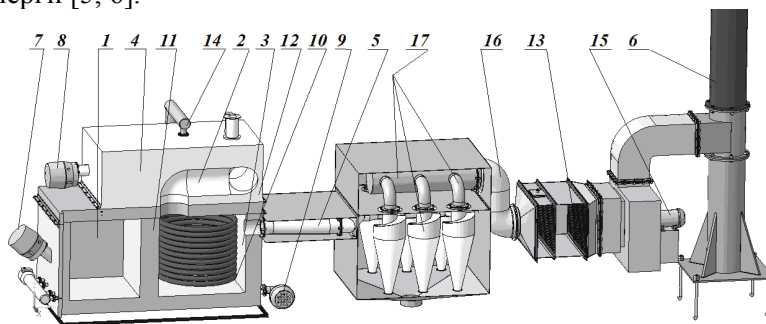


Рис. 1. Модель піролізної установки для утилізації відходів

Запропонована піролізна установка містить камеру спалювання 1, допалювання 2 та охолодження 3, розташованих під одним загальним сподом печі 4, системи циклонів 5 і димохідної труби 6, з'єднані між собою трубопроводами 16 і 17 і утворюють єдину систему направлення газового потоку. Причому об'єм камери спалювання 1 в шість разів більше об'єму камери допалювання 2, яка має тороїдальную форму. У камерах спалювання 1 і допалювання 2 встановлені інжекторні пальники 7 і 8, відповідно. Для подачі повітря в камери спалювання 1 і допалювання 2 використано нагнітальний вентилятор 9, а в камері охолодження 3 розміщений теплообмінний апарат для нагріву води 10 системи комунального обігріву. Між камерами спалювання 1, допалювання 2 і камерою охолодження 3 виконані перегородки 11 і 12, відповідно. Газопроводи 14 під'єднані до інжекторних пальників 7, 8 камер спалювання 1 і допалювання 2. Димохідна труба 6 забезпечена вентилятором 15 і з'єднана з системою циклонів 17 через систему фільтрів 13 трубопроводами 16 і 17. Для подачі сміття до камери спалювання 1 передбачено стрічковий транспортер, а сама камера спалювання містить вікно завантаження і вікно вивантаження золи.

Піролізна установка працює таким чином. В камеру спалювання 1 через стрічковий транспортер подаються відходи і запалюється інжекторний пальник 7. Досягнувши заданої температури в камері спалювання 1, що контролюється термopарою, запалюється інжекторний пальник 7 в камері допалювання 2. У порожнині камер спалювання 1 і допалювання 2, нагнітальним вентилятором 9 подається потік повітря, яке надходить з повітряозабірною люка камери охолодження. Розігрітий газовий потік, спрямовується з камери спалювання 1, в камеру допалювання 2 і допалюється за допомогою горизонтально встановленого інжекторного пальника 8. Далі в камері охолодження 3 газовий потік нагріває воду, яка протікає через теплообмінний апарат 10 системи комунального обігріву, після чого газовий потік надходить по трубопроводу в систему циклонів 17 і в систему фільтрів 13, де відбувається додаткове його очищення. Із системи циклонів 17 і системи фільтрів 13 вентилятор 15 подає газовий потік в димохідну трубу 6. На основі розробленої моделі установки для утилізації відходів вибрані і об'єднані оптимальні розміри камер спалювання 1, допалювання 2 та охолодження 3 (рис. 1), а також була розроблена раціональна компоновальна схема розташування систем грубої (система циклонів 5) і тонкої очистки (система фільтрів 13) відпрацьованих димових газів [1, 6].

Будь-яке моделювання вимагає наявності моделі. Тому на основі технічного креслення піролізної установки в CAD-системі, а саме в програмному комплексі тривимірного твердотільного моделювання Компас 3D-V14, розроблено об'ємну модель основного теплообмінного вузла піролізної установки. В моделі розміщені камера охолодження 1 і теплообмінний апарат 2 (рис. 2а). На рис. 2б показані вихідні дані для подальшого розрахунку. Конструкція теплообмінного вузла вибрана з урахуванням умов експлуатації, що вимагає періодичної очистки поверхні теплообмінника.

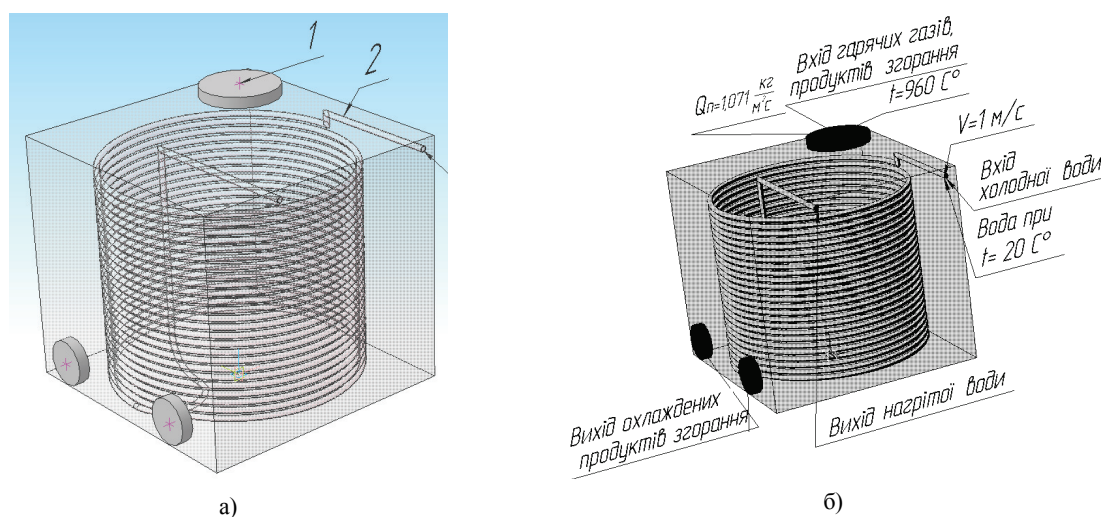


Рис. 2. Розрахункова CAD-модель геометричної області теплообмінного вузла піролізної установки і граничні умови для розрахунку теплообмінних процесів

За допомогою створеної реальної об'ємної моделі піролізної установки для утилізації відходів обрані раціональні технологічні параметри експлуатації установки для утилізації відходів. Для оцінки впливу конструктивних і технологічних параметрів на процеси, що відбуваються в теплоо-

бмінному апараті і камері охолодження піролізної установки використовувалася САЕ-система, а саме програмний комплекс FlowVision 3.09.05 [7], що дозволяє моделювати методом скінченних об'ємів складний рух рідини і газу, включаючи течії з сильною закруткою, горінням, а також спряжений теплообмін.

Так як розрахунок проводиться методом скінченних об'ємів, то для подальшого розрахунку після імпорту CAD-моделі в САЕ-систему, а саме в програмний комплекс FlowVision 3.09.05, необхідно побудувати скінченно-об'ємну розрахункову сітку з урахуванням течії поблизу стінок, які мають різні лінійні розміри. Початкову розрахункову сітку вважаємо рівномірною по всій розрахунковій області, а для отримання адекватних результатів розрахунку виконуємо адаптацію по стінках (рис. 3).

Розрахунок спряженого процесу теплообміну базуватиметься на рівняннях Нав'є–Стокса для гарячих газів в камері охолодження і для охолоджувальної води в теплообміннику, де розрахунок базуватиметься на моделі турбулентної нестисливої речовини на основі стандартної  $k$ - $\epsilon$  моделі турбулентності, де турбулентна в'язкість  $\infty_{t,г,г}$  визначається залежністю [8–10]:

$$\infty_{t,г,г} = C_{\infty} \rho_{г,г} \frac{k_{г,г}^2}{\epsilon_{г,г}},$$

де  $k_{г,г}$  — турбулентна енергія для гарячих газів в камері охолодження і для охолоджуючої води,  $\epsilon_{г,г}$  — швидкість дисипації турбулентної енергії для гарячих газів в камері охолодження і для охолоджуючої води [8–10],  $\infty_{t,г,г}$  — турбулентна в'язкість для гарячих газів в камері охолодження і для охолоджуючої води,  $\rho_{г,г}$  — густина нестисливої речовини для гарячих газів в камері охолодження і для охолоджуючої води,  $C_{\infty} = 0,09$ .

Розрахункову модель розглядаємо, як малостисливу речовину для гарячого газу і як нестисливу — для охолоджувальної води, у вигляді:

1) рівняння Нав'є–Стокса [10]

$$\frac{\partial \mathbf{V}_{г,г}}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}_{г,г} \otimes \mathbf{V}_{г,г}) = -\frac{\nabla P}{\rho_{г,г}} + \frac{1}{\rho_{г,г}} \nabla \left[ (\infty_{г,г} + \infty_{t,г,г}) \left( \nabla \mathbf{V}_{г,г} + (\nabla \mathbf{V}_{г,г})^T \right) + S_{г,г} \right],$$

де  $\mathbf{V}_{г,г}$  — вектор швидкості елементарного об'єму гарячих газів в камері охолодження і охолоджуючої води,  $\infty_{г,г}$  — кінематична в'язкість для гарячих газів в камері охолодження і для охолоджуючої води,  $S_{г,г} = \left( 1 - \frac{\rho_{hyd}}{\rho_{г,г}} \right) \mathbf{g} + B + \frac{R}{\rho_{г,г}}$ ,  $\rho_{hyd}$  — густина повітря,  $\rho_{г,г}$  — поточна густина гарячих газів в камері охолодження і охолоджуючої води,  $B$  — обертальні сили (Коріоліса і відцентрові),  $R$  — сили опору.

2) конвективного теплообміну для гарячих газів в камері охолодження і для охолоджувальної води в теплообміннику

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_{x,г,г} \frac{\partial t}{\partial x} + w_{y,г,г} \frac{\partial t}{\partial y} + w_{z,г,г} \frac{\partial t}{\partial z} = a_{г,г} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right),$$

де  $w_{x,г,г}$ ,  $w_{y,г,г}$ ,  $w_{z,г,г}$  — проекції швидкості елементарного об'єму гарячих газів в камері охолодження і охолоджуючої води на координатні осі,  $a_{г,г}$  — коефіцієнт температуропровідності елементарного об'єму гарячих газів в камері охолодження і охолоджуючої води,  $\partial t$  — зміна температури,  $\partial \tau$  — зміна часу.

3) променевого дифузійного теплообміну [11]

$$\nabla \frac{1}{3\beta(\mathbf{r})} \nabla E(\mathbf{r}) - k(\mathbf{r})(E(\mathbf{r}) - E_b(\mathbf{r})) = 0,$$

де  $\beta$  — коефіцієнт ослаблення променю;  $k$  — коефіцієнт поглинання газів продуктів згорання,  $\mathbf{r}$  — радіус-вектор поверхні променевого теплообміну;  $E$  — густина потоку випромінювання поверхні продуктів згорання;  $E_b$  — густина потоку випромінювання поверхні теплообмінника.

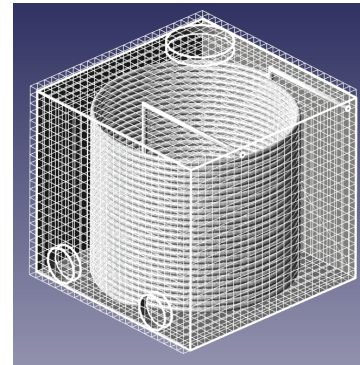


Рис. 3. Схема установки початкової розрахункової сітки

## 4) теплопровідності для сталевих стінок теплообмінника

$$\left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = \frac{c\rho}{\lambda} \cdot \frac{dt}{d\tau},$$

де  $c$  — теплоємність матеріалу (сталь);  $\rho$  — густина матеріалу (сталь),  $\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності матеріалу (сталь).

В FlowVision передбачено два способи задання кроку розрахунку динамічних задач: в секундах і числом CFL (Куранта–Фрідрікса–Леві) [7]. Для цієї стаціонарної задачі вибрано постійний крок за часом, враховуючи 1/10 пролітної часу для характерного розміру задачі. В цьому випадку характерний розмір — довжина труби теплообмінника  $L_m = 90$  м і довжина відстані від входу в охолоджувальну камеру до виходу  $L_k = 1,4$  м. Пролітний час — час, необхідний гіпотетичній частинці, що рухається з середньою швидкістю потоку  $V \approx 1$  м/с (швидкість часток води і гарячих газів вважаємо приблизно рівними між собою), подолати характерний розмір: а) для теплообмінника —  $\tau_m = 0,1(L_m/V) = 0,1(90/1) = 0,9$  с; б) для камери охолодження —  $\tau_k = 0,1(L_k/V) = 0,1(1,4/1) = 0,14$  с. В нашому випадку для отримання адекватних результатів розрахунку взято  $\tau = 0,1$  с.

За результатами розрахунків, на базі обчислювальна комплексу СКІТ-4 Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова (м. Київ), отримано розподіл температури гарячих газів в характеристичних площинах в камері охолодження (рис. 4).

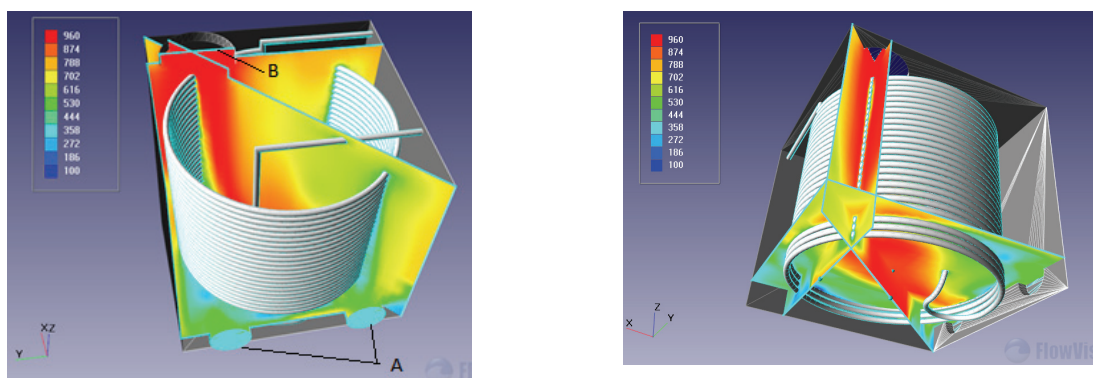


Рис. 4. Розподіл температури в підобласті «Камера охолодження»

Також за результатами розрахунків авторами отримано розподіл температури стінок теплообмінника (рис. 5).

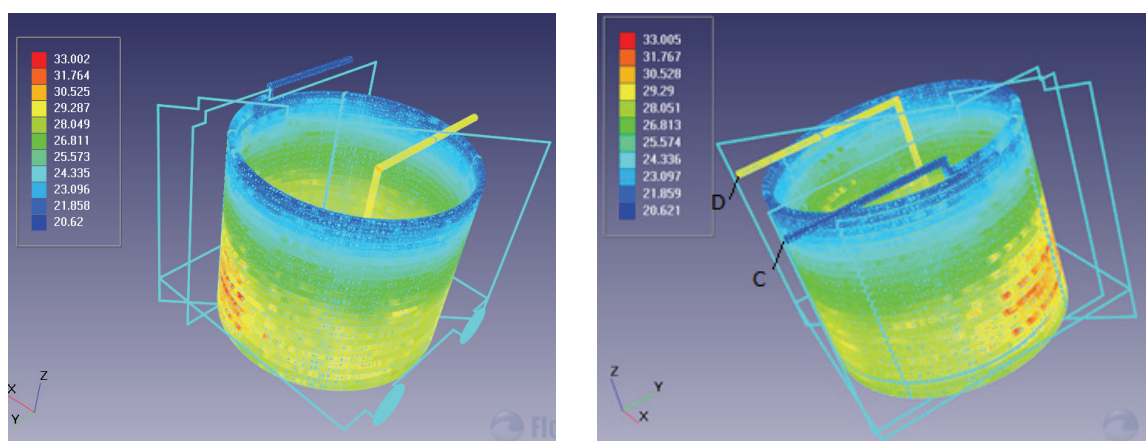


Рис. 5. Розподіл температури в підобласті «Теплообмінник»

Розподіл температури гарячих газів (рис. 4) показує, що середній перепад температури на вході і на виході в характеристичних площинах  $A$  і  $B$  камери охолодження склав близько  $\Delta t = 600$  °С, що не відповідає екологічним нормам температурного забруднення навколишнього середовища [6], і вказує на недостатню ефективність вибраної конструкції теплообмінного вузла.

Результати розподілу температури стінок теплообмінника (рис. 5) показали середню різницю температури охолоджувальної рідини (води) на вході  $C$  і на виході  $D$  з теплообмінника  $\Delta t = 10^\circ\text{C}$ , за нормальної швидкості охолоджувальної рідини  $V = 1\text{ м/с}$ , що дає можливість подальшого конструкторського вдосконалення цієї конструкції.

Тому ухвалили рішення змінити конструкцію теплообмінника, додатково увівши внутрішню спіраль теплообмінника (рис. 6).

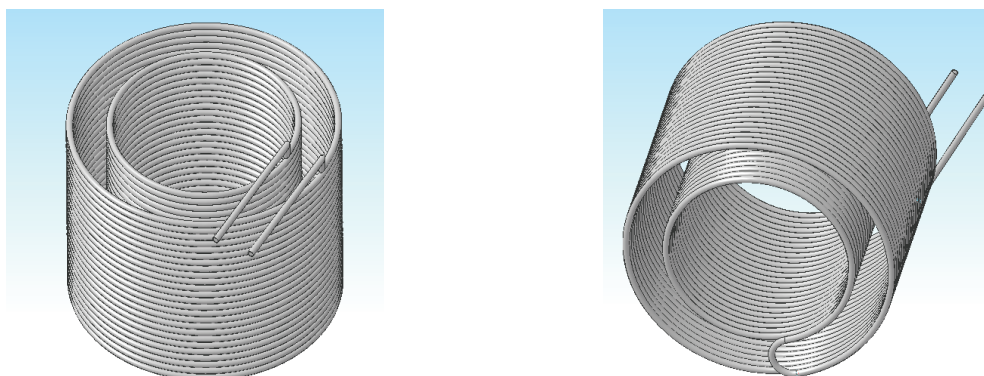


Рис. 6. Модель модернізованої конструкції теплообмінника

За результатами повторних розрахунків отримано нові результати розподілу температури гарячих газів в характеристичних площинах в підобласті «Камера охолодження» (рис. 7).

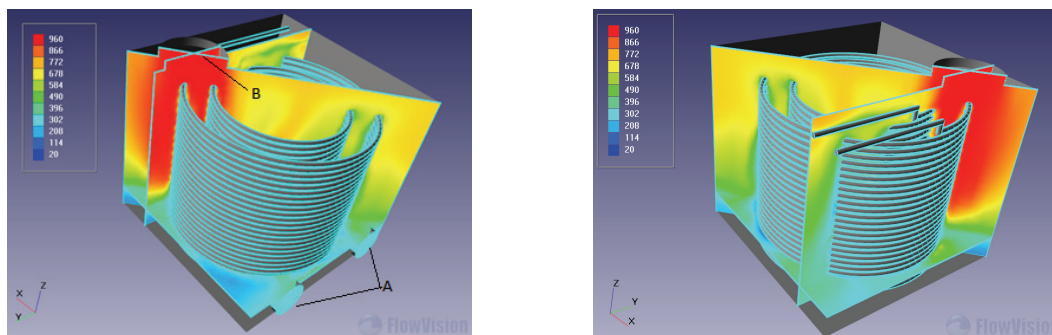


Рис. 7. Розподіл температури в підобласті «Камера охолодження»

Нові результати розподілу температури гарячих газів (рис. 7) показують, що середній перепад температури на вході і на виході в характеристичних площинах  $A$  і  $B$  камери охолодження вже склав близько  $\Delta t = 800^\circ\text{C}$  і на виході отримано температуру викидів згорілих газів в середньому близько  $t = 100^\circ\text{C}$ , що відповідає екологічним нормам температурного забруднення навколишнього середовища [6] і вказує на достатню ефективність вибраної конструкції теплообмінного вузла для утилізації тепла гарячих газів. Але додатково можна зазначити, що основна високотемпературна маса зосереджується в середині теплообмінного апарата, що дозволяє затримати потік гарячих газів продуктів згорання і максимально їх охолодити. А нові результати розподілу температури стінок теплообмінника (рис. 8) показали середню різницю температури охолоджувальної рідини (води) на вході  $C$  і на виході  $D$  з теплообмінника  $\Delta t = 5^\circ\text{C}$ , за нормальної швидкості охолоджувальної рідини  $V = 1\text{ м/с}$ , що дозволяє ефективно використовувати цей теплообмінний вузол в системі комунального обігріву на основі системи бойлерного типу. Рівномірний розподіл температури вздовж стінок теплообмінника свідчить про ефективність вибраної конструкції теплообмінного вузла [12, 13].

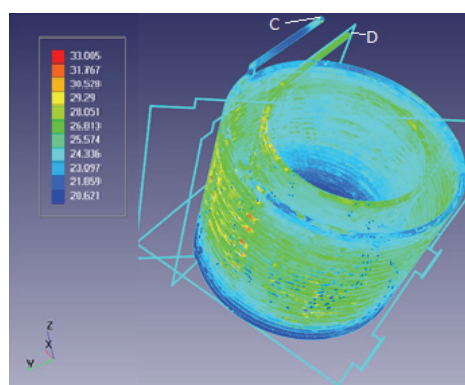


Рис. 8. Розподіл температури в підобласті «Теплообмінник»

## Висновки

Аналізуючи отримані в програмному комплексі FlowVision 3.09.05 результати чисельного мо-

делювання спряженого теплообміну, отримано розподіл температури продуктів згорання в характерних площинах об'єкта моделювання. Це дозволяє оцінити ефективність конструкції камери охолодження і теплообмінника, а саме визначити рівномірність розподілу температури в камері охолодження, що дозволяє визначити зони підвищених температур з метою подальшої термоізоляції стінок. Аналізуючи картину температурного розподілу, зазначимо, що температура на виході з камери охолодження  $t_{в.г.} = 135 \dots 150$  °С відповідає екологічним нормам температурного забруднення навколишнього середовища [6].

Також за результатами чисельних досліджень, а саме значення середньої температури води на виході з теплообмінника  $t_{ox} = 50 \dots 70$  °С, можна зробити висновок про ефективність використання такого теплообмінного вузла в системі комунального обігріву. Розподіл температури вздовж стінок теплообмінного вузла свідчить про рівномірний теплообмін, що дозволяє стверджувати про ефективність цієї конструкції.

Отриманий в результаті чисельного моделювання розподіл температур показав можливість застосування вибраного підходу до проектування, а також дозволив довести енергоефективність розробленої конструкції камери охолодження і теплообмінника на кафедрі галузевого машинобудування, Вінницького національного технічного університету.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Застосування гібридного моделювання при розробці установок для утилізації відходів / [Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, Д. В. Тесовський, Я. П. Веселовський] // Технологічні комплекси : науковий журнал. — 2012. — № 1, 2 (5, 6). — С. 122—126.
2. Моделирование отрывных течений в программном комплексе FlowVision-НПС / С. В. Жлуктов, А. А. Аксенов, С. А. Харченко, и др.] // Вычислительные методы и программирование. — 2010. — Т. 11, № 2, — С. 76—87.
3. Установка для утилизации отходов / [Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, Д. В. Повстенюк, О. Н. Данилюк] // Мир техники и технологий. — 2007. — № 12 (73). — С. 36—37.
4. Пат. 23991 Україна, МПК F 23 G 5/00. Установка для утилізації відходів / Р. Д. Іскович-Лотоцький, П. В. Повстенюк, М. І. Шматалюк, О. М. Данилюк. — № у 200702015; заявл. 26. 02. 2007; опубл. 11. 06. 2007, Бюл. № 8.
5. Пат. 32098 Україна, МПК F 23 G 5/00. Установка для утилізації відходів / Р. Д. Іскович-Лотоцький, В. І. Повстенюк, М. І. Шматалюк, О. М. Данилюк. — № у 200711073; заявл. 08. 10. 2007; опубл. 12. 05. 2008, Бюл. № 9.
6. Установка для утилізації медичних відходів з відбором тепла та охолодженням / [Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, В. І. Повстенюк, Г. В. та ін.] // Збірник наукових праць ВНАУ. — 2011. — № 7. — С. 98—103. — (Технічні науки).
7. FlowVision : Инженерные программы. Программный комплекс FlowVision [Электронный ресурс] / Компания ТЕ-СИС. — Режим доступа : <https://tesis.com.ru/software/flowvision/>. — Назва з екрана.
8. Система моделирования движения жидкости и газа Flow Vision. Версия 2.2. : руководство пользователя. — М. : Тесис, 2005. — 304 с.
9. Wilcox D. C. Turbulence modeling for CFD / D. C. Wilcox // DCW Industries, Inc. — 1994. — 460 p.
10. Ландау Л. Д. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — Изд. 4-е, стереот. — М. : Наука, 1988. — 736 с. — (Теоретическая физика). — Т. VI.
11. Литвинцев К. Ю. Особенности использования конечно-объемного, дискретно-ординатного и диффузионного приближения для уравнения радиационного теплопереноса / К. Ю. Литвинцев // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. — 2008. — Вып. 4 (21). — С. 44—47.
12. Исследование процессов в теплообменнике-утилизаторе теплоты отработанных газов дизельной когенерационной установки транспортного средства методами компьютерной гидрогазодинамики // [А. В. Жаров, А. А. Павлов, В. С. Фавстов, Р. В. Горшков] / Фундаментальные исследования. — 2013. — № 10—15. — С. 3321—3327.
13. Іскович-Лотоцький Р. Д. Моделювання робочих процесів в піролізній установці для утилізації відходів / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, Я. П. Веселовський // Східно-європейський журнал передових технологій. — 2015. — Т. 1, № 8(79). — С. 11—20.

Рекомендована кафедрою металорізальних верстатів та обладнання автоматизованих виробництв ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 01.02.2016 р.

**Іскович-Лотоцький Ростислав Дмитрович** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри галузевого машинобудування;

**Іванчук Ярослав Володимирович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри галузевого машинобудування, e-mail: [ivanchuck@ukr.net](mailto:ivanchuck@ukr.net);

**Веселовський Ярослав Петрович** — аспірант кафедри галузевого машинобудування.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**R. D. Iskovych-Lototskyi<sup>1</sup>**  
**Ya. V. Ivanchuk<sup>1</sup>**  
**Ya. P. Veselovskyi<sup>1</sup>**

## **Modeling of Installation Conjugate Heat Transfer in Waste Disposal**

<sup>1</sup>Vinnytsia National Technical University

*This article focuses on the practical application of software FlowVision 3.09.05 to study heat transfer processes in the development and debugging of heat exchangers cooling chamber pyrolysis plant for recycling. This software package is the finite volume method were calculated temperature distribution of certain zones and planes of the heat exchanger and cooling chamber pyrolysis plant for waste disposal, which allowed to assess the effectiveness of the developed design of heat exchanger and cooling chamber pyrolysis plant for recycling.*

**Keywords:** modeling, finite volume method, temperature distribution, heat exchanger.

**Iskovych-Lototskyi Rostyslav D.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Mechanical Engineering Industry;

**Ivanchuk Yaroslav V.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Mechanical Engineering Industry, e-mail: ivanchuck@ukr.net;

**Veselovskyi Yaroslav P.** — Post-Graduate Student of the Chair of Mechanical Engineering Industry

**Р. Д. Искович-Лотоцкий<sup>1</sup>**  
**Я. В. Иванчук<sup>1</sup>**  
**Я. П. Веселовский<sup>1</sup>**

## **Моделирование процесса сопряженного теплообмена в установке для утилизации отходов**

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Рісморено практичне застосування програмного комплексу FlowVision 3.09.05 для дослідження теплообмінних процесів при розробці і виборі раціональних параметрів теплообмінних апаратів камери охолодження піролізної установки для утилізації відходів. В цьому програмному комплексі методом кінцевих об'ємів розраховані розподіли температури певних зон і площин теплообмінного апарату і камери охолодження піролізної установки для утилізації відходів, що дозволило оцінити ефективність розробленої конструкції теплообмінного апарату і камери охолодження піролізної установки для утилізації відходів.*

**Ключевые слова:** моделирование, метод конечных объемов, температура, распределение, теплообменник.

**Искович-Лотоцкий Ростислав Дмитриевич** — д-р техн. наук, профессор, заведующий отраслевого машиностроения;

**Иванчук Ярослав Владимирович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры отраслевого машиностроения, e-mail: ivanchuck@ukr.net;

**Веселовский Ярослав Петрович** — аспирант кафедры отраслевого машиностроения