

Kiptelaya Lyudmila – doctor of technical sciences, Full Professor, Kharkiv State University of Food and Trade, Professor of processes, devices and automation of food production; tel.: 067-568-2789; e-mail: Kiptelaya@ukr.net.

Загорулько Олексій Євгенович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський державний університет харчування та торгівлі, доцент кафедри процесів, апаратів та автоматизації харчових виробництв; тел.: 050-568-2789; e-mail: panamari_@mail.ru.

Загорулько Алексей Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент, Харьковский государственный университет питания и торговли, доцент кафедры процессов, аппаратов и автоматизации пищевых производств; тел.: 050-568-2789; e-mail: panamari_@mail.ru.

Zagorulko Aleksey – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Kharkiv State University of Food and Trade, an assistant professor of processes, devices and automation of food production; tel.: 050-568-2789; e-mail: panamari_@mail.ru.

УДК 678.05:004.2

І. О. КАЗАК

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЧИСЕЛЬНОГО МЕТОДУ ЕЙЛЕРА В ІНЖЕНЕРНІЙ ПРАКТИЦІ МАШИНОБУДІВЕЛЬНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

В статті розглядається застосування чисельного методу Ейлера для отримання рішень диференційної моделі процесу нестационарної теплопередачі, дослідження стійкості та збіжності отриманих рішень на прикладі алгоритмізації і програмування у Фортрані в середовищі MSDev із застосуванням методу Ейлера. Процес теплопередачі часто зустрічається в інженерній практиці машинобудівельних спеціальностей, тому його дослідження при різних умовах із застосуванням методу Ейлера є дуже актуальним.

Ключові слова: диференційна модель, метод Ейлера, чисельний, диференційні рівняння, програма, нестационарна, процес, теплопередача, машинобудівельні спеціальності, функція.

Вступ. Завжди було і остається у сучасний час актуальним питанням дослідження для інженерів-механіків хімічного машинобудування вирішення інженерної задачі процесу теплопередачі для тепломеханічного обладнання хімічних виробництв і будівельних підприємств, яку нами пропонується розв'язати на базі звичайних диференційних рівнянь за методом Ейлера. Це пов'язано з тим, що процес теплопередачі відбувається кризь в теплообмінному обладнанні хімічних виробництв і будівельних підприємств, в наслідок чого і підлягає дослідженню в інженерній практиці машинобудівельних спеціальностей.

Мета роботи. Метою даної роботи являється застосування чисельного методу Ейлера для отримання рішень диференційних моделей процесу нестационарної теплопередачі за допомогою розробленої програми у Фортрані в середовищі MSDev для дослідження стійкості та збіжності отриманих рішень графічно для подальшого їх аналізу в інженерній практиці машинобудівельних спеціальностей.

Методика експериментів дослідження процесу нестационарної теплопередачі із застосуванням чисельного методу Ейлера. Історично першим і найбільш простим способом чисельного розв'язання звичайних диференціальних рівнянь першого порядку наведеного нижче є метод Ейлера. Він може бути використаний для приближеного рішення звичайних диференційних рівнянь [1 - 5].

Тепер розглянемо наше дослідження детальніше. Нехай дано диференційне рівняння першого порядку з початковими даними $y(x_0)=y_0$, на відрізку $x=x_0 \dots x_n$, у вигляді:

$$y' = f(x, y)$$

Уведемо позначення: $x_i = x_0 + i \cdot h$ та $y_i = y(x_i)$, де $i=0, 1, 2, \dots, n$, h – крок сітки на відрізку $x_0 \dots x_n$.

Згідно методу Ейлера послідовні значення y_i шуканої функції у визначаються виразом:

$$y_{i+1} = y_i + h \cdot f(x, y)$$

Нашою задачею являється скласти математичну модель для визначення температури об'єкту T в залежності від часу t та отримати її вирішення, якщо відомі: K – коефіцієнт теплопередачі; T_0 – початкова температура об'єкту; $T_{cp}(t)$ – закон зміни температури оточуючого середовища, t_{ox} – час спостереження. Такі задачі широко застосовуються у дослідженнях інженерів-механіків з напрямку підготовки «Машинобудування», як у навчальному процесі, так і у професійній діяльності.

Складемо математичну модель на прикладі визначення температури $T=T(t)$ об'єкту досліджень у будь-який момент часу $t>0$ за умови відомої температури оточуючого середовища $T_{серед}=T_{серед}(t)$, яка представлена диференційним рівнянням:

$$dT/dt = K \cdot (T - T_{серед}),$$

де T – температура об'єкту, °C; $T_{серед}$ – температура оточуючого середовища, °C; K – коефіцієнт теплопе-

редачі, $\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$; dT/dt – відношення диференціалів зміни температури об'єкту у часі; $K=K(t)$ – досліджуваний коефіцієнт нестационарної теплопередачі (може бути константою), що залежить від умов оточення, форми та властивостей самого об'єкту [6, 7].

Застосування методу Ейлера дозволяє чисельно проінтегрувати вихідне диференційне рівняння за рахунок переведення його до дискретного аналогу – си-

© І. О. Казак. 2015

стеми алгебраїчних рівнянь, причому, дуже зручної для рішення методом підставлення. Тоді позначення:

$$T \rightarrow y; t \rightarrow x; dT/dt \rightarrow dy/dx = y'; dT/dt \rightarrow dy/dx;$$

$$f(T, t) = K \cdot (T - T_{cp}) \rightarrow f(x, y); \text{початкові умови: } T(t_0) = T_0.$$

Згідно методу Ейлера для визначення T_i : $T_{i+1} = T_i + h \cdot K \cdot (T_i - T_{серед_i})$.

Проілюструємо вивчення розрахунків за методом Ейлера на прикладі, коли згідно завдання: $t=0 \dots 10$; $t_0=0$; $T_0=0$; $K=12$; $T_{cp}=2+t$.

Перший крок: $i=0$; $T1=0+h \cdot 12 \cdot (2+0)$.

Другий крок: $i=1$; $t1=t_0+h$; $T2=T1+h \cdot 12 \cdot (2+t1)$, і т.п.

Як видно з прикладу, для отримання рішення необхідно виконати забагато обчислювальних дій. Такі дії можна виконати за допомогою ЕОМ у Фортрані в середовищі MSDev [8, 9]. Далі наведемо розроблені нами програми для розрахунку досліджуваного процесу нестационарної теплопередачі із застосуванням чисельного методу Ейлера. Перша програма PROGRAM EULER розраховує у циклі температуру середовища TCP і температуру об'єкта дослідження у процесі теплопередачі T у залежності від часу t при заданих вихідних параметрах: кроку дослідження H, коефіцієнті теплопередачі K і початковій температурі T0.

```
PROGRAM EULER
REAL K
DATA H, K, T0 /0.01,12.,0./
WRITE (*,*) ' Нестационарна теплопередача '
WRITE (*,*) ' Метод Ейлера. '
WRITE (*,*)
WRITE (*,*) t Значення Tсеред(t) Значення T(t)
TCP=2.
WRITE(*,*)TT, TCP, T0
T=T0
DO 1 I=1, 1000
TT=TT+H
TCP=2.+TT
T=T+H*(T-TCP)
1 WRITE(*,*)TT, TCP, T
STOP
END.
```

Нижче наведені програма PROGRAM EulerT і інші програми робочого проекту, де у програмі SUBROUTINE Euler застосовується метод Ейлера.

```
PROGRAM EulerT
```

! Масиви для результатів роботи функції пошуку мин. и макс.

```
DIMENSION mLocMaxT1(1), mLocMaxT2(1),
mLocMaxT3(1),&
mLocMinT1(1), mLocMinT2(1), mLocMinT3(1),
mLocMaxTcp(1), mLocMinTcp(1)
```

Allocatable :: T1(:), T2(:), T3(:), Tcp(:) ! Динамічні масиви

```
OPEN(1,file='EulerTin.txt') ! Файл вихідних даних
```

```
READ (1,*) ! Перша строка не містить даних
```

```
READ (1,*) TauMax, mMax, T0, aK1, aK2, aK3 !
```

Вихідні дані

```
CLOSE(1) !Файл не потрібен - закриваємо
```

```
ALLOCATE(T1(mMax), T2(mMax), T3(mMax),
```

```
Tcp(mMax)) ! Виділимо
```

```
Dtau=TauMax/(mMax-1) ! Крок
```

```
CALL SolveTcp(mMax, Dtau, Tcp) ! Розраховуємо
```

Tcp()

```
CALL Euler(mMax, Dtau, T0,aK1, T1) ! Розрахо-
```

вуємо T1()

```
CALL Euler(mMax, Dtau, T0,aK2, T2) ! Розрахо-
```

вуємо T2()

CALL Euler(mMax, Dtau, T0,aK3, T3) ! Розрахо-

вуємо T3()

```
T1max=MAXVAL(T1) ! Макс. T1
```

```
T2max=MAXVAL(T2) ! Макс. T2
```

```
T3max=MAXVAL(T3) ! Макс. T3
```

```
T1min=MINVAL(T1) ! Мин. T1
```

```
T2min=MINVAL(T2) ! Мин. T2
```

```
T3min=MINVAL(T3) ! Мин. T3
```

```
TcpMax=MAXVAL(Tcp) !Макс. Tcp
```

```
TcpMin=MINVAL(Tcp) !Мин. Tcp
```

```
mLocMaxT1=MAXLOC(T1) ! Индекс Макс. T1
```

```
mLocMaxT2=MAXLOC(T2) ! Индекс Макс. T2
```

```
mLocMaxT3=MAXLOC(T3) ! Индекс Макс. T3
```

```
mLocMinT1=MINLOC(T1) ! Индекс Мин. T1
```

```
mLocMinT2=MINLOC(T2) ! Индекс Мин. T2
```

```
mLocMinT3=MINLOC(T3) ! Индекс Мин. T3
```

```
mLocMaxTcp=MAXLOC(Tcp) ! Индекс Макс. Tcp
```

```
mLocMinTcp=MINLOC(Tcp) ! Индекс Мин. Tcp
```

```
WRITE(*,*) '*****Input data:'
```

```
WRITE(*,*) ' TauMax=',TauMax,' mMax=',mMax,'
```

T0=,T0

```
WRITE(*,*) ' aK1=',aK1,' aK2=',aK2,' aK3=',aK3
```

```
WRITE(*,*) '*****Output data:'
```

```
OPEN(2, file='EulreTout.txt')
```

```
WRITE(2,*) '*****Input data:'
```

```
WRITE(2,*) ' aK1=',aK1,' aK2=',aK2,' aK3=',aK3
```

```
WRITE(2,*) ' TauMax=',TauMax,' mMax=',mMax,'
```

T0=,T0

```
WRITE(2,*) '*****Output data:'
```

```
WRITE(2,*) ' T1max=', T1max, ' mLoc-
```

MaxT1=',mLocMaxT1

```
WRITE(2,*) ' T2max=', T2max, ' mLoc-
```

MaxT2=',mLocMaxT2

```
WRITE(2,*) ' T3max=', T3max, ' mLoc-
```

MaxT3=',mLocMaxT3

```
WRITE(2,*) ' T1min=', T1min, ' mLoc-
```

MinT1=',mLocMinT1

```
WRITE(2,*) ' T2min=', T2min, ' mLoc-
```

MinT2=',mLocMinT2

```
WRITE(2,*) ' T3min=', T3min, ' mLoc-
```

MinT3=',mLocMinT3

```
WRITE(2,*) ' TcpMax=', TcpMax, ' mLoc-
```

MaxTcp=',mLocMaxTcp

```
WRITE(2,*) ' TcpMin=', TcpMin, ' mLoc-
```

MinTcp=',mLocMinTcp

```
WRITE(2,*)
```

```
Tau=0.
```

```
WRITE(*,*) ' m Tau Tcp T1 T2 T3!' шапка
```

```
WRITE(2,*) ' m Tau Tcp T1 T2 T3!' шапка
```

```
DO m=1, mMax
```

```
WRITE(*,10) m, Tau, Tcp(m), T1(m), T2(m),
```

T3(m) ! На екран

```
WRITE(2,10) m, Tau, Tcp(m), T1(m), T2(m),
```

T3(m) ! До файлу

```
Tau=Tau+Dtau
```

```
ENDDO
```

```
10 FORMAT(2x, i5, F12.7, 4F12.2)
```

```
CLOSE(2)
```

```
DEALLOCATE(T1, T2, T3, Tcp)
```

```
END PROGRAM EulerT
```

SUBROUTINE SolveTcp(iMax, Dtau, Tcp) ! Розраховуємо Tcp()

```

DIMENSION Tcр(iMax) !Масив Tcр
Tau=0.
DO i=1, iMax
Tcр(i)=FTcр(Tau) ! Заповнюємо масив Tcр за
функцією FTcр(Tau)
Tau=Tau+Dtau
ENDDO
END SUBROUTINE SolveTcр
FUNCTION FTcр(Tau) !Функція температури
середовища
FTcр=32.2-.12*Tau*Tau
END FUNCTION FTcр
SUBROUTINE Euler(iMax, Dx, U0, aK, U) ! Ме-
тод Ейлера
DIMENSION U(iMax)
U(1)=U0 !Початкові умови
x=0.
DO i=2, iMax
x=x+Dx ! Координата
U(i)=U(i-1)+Dx*F(aK,U(i-1),x) ! Формула
Ейлера
ENDDO
END SUBROUTINE Euler
FUNCTION F(aK,T,Tau) ! Права частина діф.
рівняння
F=-aK*(T-FTcр(Tau))
END FUNCTION F
    
```

Обговорення результатів дослідження стійкості та збіжності отриманих рішень для нестационарної теплопередачі методом Ейлера. У проведеному дослідженні результатами являються наступні дії. Створений файл вихідних даних *EulerTin.txt*, які змінюються за завданням:

TauMax mMax T0 aK1 aK2 aK3

12. 6 16. 2 .6 .8

В результаті компіляції розроблених нами вище програм у робочому проекті у Фортрані F90 в середовищі MSDev отримуємо файл результатів розрахунку *EulerTout.txt*:

```

*****Input data:
aK1= 2.000000E-01 aK2= 6.000000E-01 aK3=
=8.000000E-01
TauMax= 12.000000 mMax= 6 T0=
=16.000000
*****Output data:
T1max= 26.319890 mLocMaxT1= 3
T2max= 38.332680 mLocMaxT2= 2
T3max= 45.776900 mLocMaxT3= 2
T1min= 16.000000 mLocMinT1= 1
T2min= 13.158650 mLocMinT2= 6
T3min= 6.889544 mLocMinT3= 5
TcрMax= 32.200000 mLocMaxTcр= 1
TcрMin= 14.920000 mLocMinTcр= 6
m Tau Tcр T1 T2 T3
1 .0000000 32.20 16.00 16.00 16.00
2 2.4000000 31.51 23.44 38.33 45.78
3 4.8000000 29.44 26.32 25.52 14.40
4 7.2000000 25.98 26.16 26.18 36.63
5 9.6000000 21.14 23.75 18.92 6.89
6 12.0000000 14.92 19.51 13.16 22.31
    
```

На рис. 1 наочно демонструється, що для трьох об'єктів з різним коефіцієнтом теплопередачі за умовами дослідження при заданій температурі оточуючого середовища за допомогою математичної моделі для визначення температури об'єкту T в залежності від часу t, отримано для першого об'єкта з температурою T1 – стійке рішення, а для другого і третього об'єктів відповідно з температурами T2 і T3 – нестійкі рішення, тому що вони, як видно за графіками ведуть себе не фізично.

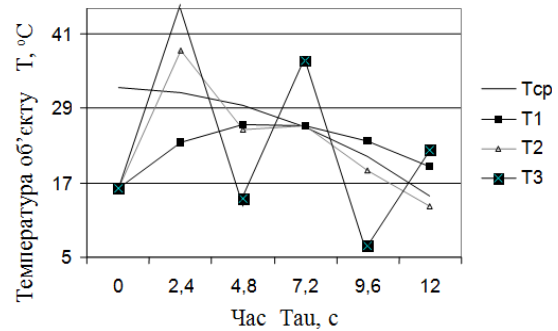


Рис. 1 – Результати розрахунку за програмами зміни температур трьох об'єктів і середовища у часі для процесу теплопередачі

Підвищити точність розрахунків у дослідженнях за методом Ейлера завжди можна шляхом зменшення кроку сітки розрахунків при збільшенні числа вузлів [10].

Висновки. За допомогою ЕОМ отримана таблиця шуканих значень для 6 вузлів дослідження температури трьох об'єктів у часі за розробленими у робочому проекті програмами розрахунку із застосуванням чисельного методу Ейлера у Фортрані в середовищі MSDev. За результатами дослідження на ЕОМ із застосуванням методу Ейлера стійке рішення отримали тільки для першого об'єкта з температурою T1 і відповідно збіжність його значень температур з реальним фізичним процесом нестационарної теплопередачі.

Список літератури: 1. Самійленко, А. М. Диференціальні рівняння: навч. посіб. [Текст] / А. М. Самійленко, С. А. Кривошия, М. О. Перестук. – К.: Либідь, 2003. – 504 с. 2. Турчак, Л. І. Основы численных методов: учеб. посіб. [Текст] / Л. І. Турчак, П. В. Плотников. – М.: Физматлит, 2003. – 304 с. 3. Формалев, В. Ф. Численные методы. Учебник [Текст] / В. Ф. Формалев, Д. Л. Ревизников. – М.: Физматлит, 2004. – 400 с. 4. Бахвалов, Н. С. Численные методы: учеб. посіб. для студ. физ.-математ. спец. вузов [Текст] / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – М.: Физматлит: Лаборатория Базовых Знаний, СПб.: Невский диалект, 2002. – 632 с. 5. Бахвалов, Н. С. Численные методы в задачах и упражнениях: учеб. посіб. [Текст] / Н. С. Бахвалов, А. В. Лапин, Е. В. Чижевников. – М.: Высшая школа, 2000. – 192 с. 6. Коваленко, І. В. Основні процеси, машини та апарати хімічних виробництв. Підручник [Текст] / І. В. Коваленко, В. В. Малиновський. – К.: Інрес, Воля, 2006. – 261 с. 7. Коваленко, І. В. Розрахунки основних процесів, машин та апаратів хімічних виробництв: навч. посіб. [Текст] / І. В. Коваленко, В. В. Малиновський. – К.: Норіта-плюс, 2007. – 212 с. 8. Мак-Кракен, Д. Численные методы и программирование на Фортране [Текст] / Д. Мак-Кракен, У. Дорн; пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 584 с. 9. Уорд, Т. Фортран и искусство программирования персональных ЭВМ [Текст] / Т. Уорд, Э. Бромхед; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1993. – 351 с. 10. Шахно, С. Застосування прискореного методу Ньютона та різницевого методів до розв'язування задачі пошуку періодичних режимів у нелінійних динамічних системах [Текст] / С. Шахно, Д. Узбізький, Г. Ярмола // Вісник Львівського універ-

ситету. Серія прикладної математики і інформатики. - 2013.- Вип.19. - С.39-46

Bibliography (transliterated): 1. Samijlenko, A. M., Krivoshiya, S. A., Perestuk, M. O. (2003). Diferencialni rivnyannya: navch.posib. Kiev. Libid, 504. 2. Turchak, L. I., Plotnikov, P. V. (2003). Fundamentals of numerical methods: Navch.posib. / L. I. Turchak, P. V. Plotnikov, 304. 3. Formales, V. F., Revision, D. L. (2004). Numerical methods. Textbook, 400. 4. Bakhvalov, N. C., Zhidkov, N. P., Kobel'kov, G. M. (2002). Numerical methods: Navch.posib., 632. 5. Bakhvalov, N. C., Lapin, A. V., Chigonkov, E. V. (2000). Numerical methods in problems and exercises: Navch.posib., 192. 6. Kovalenko, I. V., Malinovsky, V. V.

(2006). Basic processes, machines and apparatuses of chemical productions. The tutorial, 261. 7. Kovalenko, I. V., Malinovsky, V. V. (2007). The calculations of basic processes, machines and apparatuses of chemical productions: Navch.posib., 212. 8. Mac-Kraken, D., Dorn, U. (1977). Numerical methods and programming Fortran, 584. 9. Ward, T., Bromhead, E. (1993). Fortran and the art of programming a personal computer, 351. 10. Sahno, S., Usbsi, D., Yarmola, G. (2013). Application prescoring of Newton's method and finite-difference methods to the solution of the problem of finding periodic modes in nonlinear dynamical systems. Bulletin of Lviv University. Series applied mathematics and Informatics, 19, 41, 39-46.

Надійшла (received) 27.05.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Казак Ірина Олександрівна – кандидат педагогічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», асистент кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування; тел.: 050-600-86 – 08 ; e-mail: AsistentIA@meta.ua.

Казак Ірина Александровна – кандидат педагогических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», ассистент кафедры химического, полимерного и силикатного машиностроения; тел.: 050-60-86-08; e-mail: AsistentIA@meta.ua.

Kazak Irina Aleksandrovna - Candidate of Pedagogical Sciences (Ph. D.), National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", assistant at the Department of Chemical, polymer and silicate engineering; tel.: 050-60-86-08; e-mail: AsistentIA@meta.ua.

УДК 641.521:641.53.92.004.15

Ю. М. КОРЕНЕЦЬ, Р. П. НИКИФОРОВ

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ІЧ-СМАЖЕННЯ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ ТВАРИННОГО ПОХОДЖЕННЯ В УМОВАХ ВІДКРИТОГО РОБОЧОГО ПРОСТОРУ

Робота містить опис активного експерименту, проведеного для визначення оптимальних параметрів процесу ІЧ-смаження харчової сировини в умовах відкритого робочого простору. На підставі даних, отриманих в ході експерименту, сформульовано висновки, які мають практичну користь для проведення подальших наукових досліджень у даному напрямку та розробки рекомендацій для реального виробництва.

Ключові слова: ІЧ-обробка, ІЧ-смаження, гриль, грилювання, харчова сировина, відкритий робочий простір, параметр процесу, активний експеримент.

Вступ. Сьогодні ІЧ-обробка вважається одним із перспективних електрофізичних методів теплової обробки харчових продуктів, оскільки дає можливість істотно інтенсифікувати процес: зменшити енерговитрати, підвищити якість виробів та поліпшити санітарно-гігієнічні умови праці [1]. В останні роки у закладах ресторанного господарства (ресторани, кафе, гриль-бари, підприємства швидкого обслуговування, кулінарні цехи) набула значного поширення продукція, виготовлена з використанням ІЧ-обладнання з відкритим робочим простором. Теплова обробка у таких технічних засобах відбувається за умов, які значною мірою відрізняються від традиційних способів теплової обробки харчової сировини. Перша суттєва відмінність – це ускладнений процес передачі теплоти, який супроводжується відбиванням значної частки променистої енергії від поверхонь продукту та апарату і її розсіюванням у робочому та навколишньому середовищі, які не розділені між собою конструктивними елементами апаратів [2, 3]. На відміну від традиційного теплового обладнання для смаження, у якому застосовується контактний нагрів (плити, сковороди, поверхні безпосереднього смаження), та ІЧ-обладнання із закритим робочим простором, де нагрівання продукту здійснюється не лише випромінюванням, але й конвективно гарячим повітрям

або іншим газовим середовищем та кондуктивно від поверхні, на якій розміщується продукт, в основу дії ІЧ-апаратів з відкритим робочим простором покладено безконтактний нагрів продукту ІЧ-променями. По-друге, не розроблені практичні рекомендації щодо більш ефективної реалізації вже існуючих методів обробки харчової сировини: ІЧ-смаження (грилювання) напівфабрикатів з м'яса, риби, овочів. По-третє, як показує практика, існує ціла низка чинників, які утруднюють отримання готової продукції зі стабільно високими якісними показниками. По-четверте, виконання державної програми по забезпеченню населення якісною продукцією, примушує шукати шляхи для урізноманітнення асортименту харчових продуктів.

Таким чином, актуальним науковим завданням є вивчення процесу ІЧ-обробки харчової сировини різних видів за умов відкритого робочого простору з метою розробки практичних рекомендацій до проведення теплової обробки харчової сировини різних видів та вдосконалення існуючих технічних засобів.

Мета роботи. Метою роботи є розробка науково обґрунтованих рекомендацій по здійсненню теплової обробки харчової сировини тваринного походження ІЧ-випромінюванням у відкритому робочому просторі та вимог до технологічних параметрів обладнання, що

© Ю. М. Коренець, Р. П. Никифоров. 2015