

m/c^2 ; q – густина теплового потоку, Вт/м²; v_r – зведена до діаметра каналу швидкість газу, м/с; x – поздовжня координата, м; Δh_{fg} – питома теплота пароутворення, Дж/кг; Δ_e – еквівалентна пісочна шорсткість міжфазної поверхні, м; v_p, v_r – кінематичні коефіцієнти в'язкості рідини та газу, м²/с; v_{p20} – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини при 20 °С, м²/с; ρ_p, ρ_r – густини рідини та газу, кг/м³; σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідини, Н/м; $Re_r = v_r d / \nu_r$ – число Рейнольдса газового потоку; $Re_{de} = 4\Gamma / \nu_p$ – число Рейнольдса плівки; $Re_s = \Gamma / \nu_p$ – модифіковане число Рейнольдса плівки; Γ – об'ємна щільність зрошення плівки, м²/с;

$$Ga_s = \left[\frac{\sigma}{g(\rho_p - \rho_r)} \right] / (\nu_p^2 / g)^{1/3} - \text{число Галілея плівки};$$

$$We = v_r^2 \rho_r d / \sigma - \text{число Вебера}; We_* = \sigma \left[\rho_p g \left(\frac{\nu_p^2}{g} \right)^{2/3} \right]^{-1} - \text{моди-}$$

фіковане число Вебера плівки; $\Delta_e^* = \Delta_e / \ell_0$ – безрозмірна

$$\text{еквівалентна шорсткість міжфазної поверхні}; \ell_0 = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_p - \rho_r)}} -$$

постійна Лапласа, м; $\tau_i^* = \frac{\tau_i}{\rho_p g (\nu_p^2 / g)^{1/3}}$ – безрозмірнісне до-
тичне напруження на міжфазній поверхні, Н/м².

УДК 636.087.62.002.237

В.С. ГУЦЬ, доктор технічних наук
Л.В. ПЕШУК, доктор сільськогосподарських наук
О.А. КОВАЛЬ, кандидат технічних наук
Національний університет харчових технологій

НАУКОВІ ЗАСАДИ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЛІНІЙ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ВІДХОДІВ М'ЯСНОГО ВИРОБНИЦТВА

Досліджено перспективні напрями модернізації ліній перероблення відходів м'ясного виробництва. Показано можливості застосування при цьому методів математичного моделювання.

Исследованы перспективные направления модернизации линий переработки отходов мясного производства. Показаны возможности применения при этом методов математического моделирования.

При заборі тварин і виробництві напівфабрикатів, ковбас, консервів, медичних препаратів та іншої продукції на м'ясокомбінатах отримують значну кількість сировини, яка вважається відходами виробництва, тобто не може бути використана на харчові цілі. Залежно від технічної можливості підприємства та економічної доцільності повної переробки сировини й одержання м'ясних виробів відповідного асортименту кількість її коливається в межах 12...30 % від живої маси тварин у м'ясожировому виробництві (при виробництві м'яса на кістках) та 2...10 % – при виробництві напівфабрикатів і ковбас.

Чим менше за продуктивністю підприємство, тим складніше організувати повну переробку відходів виробництва. Це пов'язано насамперед з тим, що немає досконало енергозбереженого обладнання, яке б забезпечило комп-

ЛІТЕРАТУРА

1. Исследование сопротивления в пристенной области газо-жидкостного изотермического потока при дисперсно-кольцевом режиме течения / А.Я. Диденко, Г.П. Дубровский, В.А. Леонов // Вопросы теплофизики ядерных реакторов. – М.: Атомиздат. – 1971 – Вып. 3. – С. 23–31.
2. Чен Пе-Фу, Ибеле. Потери напора и толщина жидкой пленки при кольцевом двухфазном чисто пленочном течении и течения с образованием эмульсии // Труды Америк. об-ва инж.-мех. Сер. С. Теплопередача. – 1964. – №1. – С. 116–125.
3. Ганчев Б.Г. Охлаждения элементов ядерных реакторов стекающими пленками. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 192 с.
4. Коновалов Н.М., Харин В.Ф., Николаев Н.А. Расчет гидравлического сопротивления в условиях прямооточного нисходящего движения газа и пленки жидкости // Теор. основы хим. технологии. – 1985. – №1. – С. 48–52.
5. Gill L.E., Hewitt G. F. and Lacey P.M.C. Sampling probe studies of the gas core in annular two-phase flow: II Studies of the effect of phase flowrates on phase and velocity distribution // Chem. Engng. Sci. – 1964. – V.19. – P. 665–682.
6. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. – М.: Мир, 1972. – 440 с.
7. Коновалов Н.М., Войнов Н.А., Николаев Н.А. Гидродинамические закономерности вертикального прямооточного движения газа и пленки жидкости в трубах // Теор. основы хим. технологии. – 1993. – №2. – С. 192–196.

Одержано редколлегією 15.01.03 р.

Розглянемо деякі найбільш прості й доступні методи модернізації ліній, спрямовані на підвищення ефективності перероблення відходів м'ясного виробництва на тваринні корми і технічний жир.

Основним видом обладнання для перероблення сировини на кормове борошно є горизонтальний вакуумний котел, який в комплекті з обладнанням для приймання сировини, оброблення шквари та жиру утворює технологічну лінію.

Конструкція котла як апарата для термічної обробки недосконала. Його доцільно використовувати як накопичувач та елемент транспортної системи передування шквари. В останньому випадку його модернізують згідно з ТУ 770/8099, розробленими Гіпром'ясо («Государственный институт по проектированию предприятий мясной промышленности») для горизонтального вакуумного котла.

Волога шквара після першого етапу теплового оброблення в котлі являє собою напіврідку масу, тому під час її розвантажування через розвантажувальну горловину не модернізованого котла слід дотримуватись правил безпеки – кришку відкривати частково, накинувши на неї запобіжний ланцюжок. У міру розвантажування шквари кришку відкривають повністю. Лійка приймального шнека має бути достатнього розміру, щоб запобігти розбризкуванню шквари. Такий спосіб не тільки травмонебезпечний, а й енерговитратний, оскільки передбачає використання додаткового обладнання – шнекових конвеєрів для подальшої подачі шквари на центрифугування.

Найдосконалішими слід вважати технологічні транспортні лінії закритого виконання, тобто такі, в яких сировина, напівфабрикати, складові компоненти виробництва (які часто бувають токсичними або шкідливо впливають на навколишнє середовище) перебувають у закритому обладнанні. Щоб об'єднати таке обладнання в технологічну лінію, доцільно застосовувати трубопровідний транспорт чи інші подібні транспортні системи.

Трубопровідний транспорт є найраціональнішим видом транспорту. Вартість його в декілька разів менша, ніж стрічкових, шнекових конвеєрів, рольгангів тощо, а в деяких випадках він є єдиною можливим технічним рішенням.

Якщо шквару розвантажують способом передування з модернізованого котла, то його треба герметизувати, закриваючи вентиль на вакуумній лінії. Щоб отримати потрібний тиск, всередину котла подають гостру пару і в оболонці підтримують тиск пари 0,3...0,4 МПа. Коли потрібний тиск всередині котла досягнуто, відкривають заперку арматуру на трубопроводі. В разі застосування відцентрового способу знежирення шквари вакуумний котел з'єднують з накопичувачем для шквари – місткістю, що обігривається і призначена для порційного завантаження центрифуги. Під час передування кришка розвантажувальної горловини закрита. Мішалку вмикання на розвантажування.

Після закінчення передування шквари з котла вимикають мішалку, закривають запірну арматуру трубопроводу і цикл роботи котла повторюють.

З накопичувача шквара порціями, за допомогою шнека або самопливом завдяки перепаду висот, надходить у ротор центрифуги, з якого перед запуском подають гостру пару для прогрівання його і фільтрувальної тканини. Ротор спочатку починає обертатись з частотою 250 об/хв для центрифуги ФПН-1001У-04 і 500 об/хв – для ФПН-125ІІ-01.

Після завантаження шквари частота обертання ротора зростає послідовно до 750 та 1450 об/хв. При частоті обертання 1450 об/хв процес знежирення триває 4...6 хв.

У разі встановлення на трасі трубопроводу спеціальних автоматичних дозаторів – відокремлювачів потоку шквара безпосередньо подається порціями в ротор центрифуги періодичної дії, при цьому частота обертання не знижується.

В процесі центрифугування в підвісній центрифугі (ФПН-1001У-04) жир безперервно відводиться із ротора

центрифуги крізь фільтр, який закріплений під верхнім перфорованим бортовим кільцем, у приймальну місткість, з якої його перекачують на подальше оброблення.

Після закінчення циклу центрифугування центрифугу треба загальмувати до повного зупинення ротора і дати можливість жиру, що міститься в ньому, стекти в приймальну місткість за допомогою поворотного піддона, який закриває розвантажувальний отвір центрифуги. Після видалення жиру піддон відводять убік і шквару розвантажують при зворотному обертанні ротора з частотою 100 об/хв, зрізаючи її ножовим пристроєм. У центрифугі ці операції виконуються автоматично.

Для того щоб максимально повно видалити жир з осаду, доцільно застосувати простий та ефективний спосіб інтенсифікації процесу розділення шквари – гідровідцентровий [2]. Для цього в ротор після 4...6 хв центрифугування, не зупиняючи його, подають 10...15 л гарячої води і продовжують процес центрифугування ще 1...2 хв. Вода витісняє з поверхні осаду залишки жиру, тим самим підвищуючи його вихід – ефективність знежирення.

Гідровідцентровий спосіб знежирення є новим. Його використання потребує високої культури виробництва і розуміння механізму процесу. Якщо правильно його застосовувати, то збільшується лише вологість осаду – знежиреної шквари.

Вивантажену із центрифуги знежирену шквару подають у вакуумні котли на остаточне сушіння, яке здійснюється при температурі в котлі 72...80 °С до вологості 9...10 %. Тиск у котлі доводять до 53...66 кПа.

Режим сушіння знежиреної шквари гідровідцентровим способом практично не відрізняється від режиму сушіння шквари, яку отримано звичайним способом. У першому випадку це пов'язано з меншим вмістом жиру в продукті і, як наслідок, із сприятливішими умовами процесу сушіння – частинки шквари менше злипаються і не утворюють грудочки.

Закриті системи трубопровідного транспортування м'ясної нехарчової сировини, шквари, промислових стоків м'ясокомбінатів забезпечують належний санітарний стан виробництва, високу якість продукту, пристойні умови праці. Тому в сучасних технологічних лініях для перероблення відходів м'ясного виробництва трубопровідний транспорт є об'єктивно найдоцільнішим.

Враховуючи значні коливання реологічних властивостей м'ясної шквари і різні компоновальні рішення ліній, впровадження в існуючих цехах способу передування шквари потребує високої культури виробництва, проведення складних інженерних розрахунків трас трубопроводів.

Труднощі, які виникають при проектуванні, також пов'язані зі складними інженерними розрахунками траси трубопроводу і режимів передування.

Основою розрахунку параметрів трубопроводу є визначення взаємозв'язку між рушійною силою процесу - тиском у нагнітальній системі, швидкістю пересування маси чи продуктивністю, конструктивними розмірами труби. Для розрахунків використовують теоретичні, емпіричні чи критеріальні рівняння, до яких входять реологічні характеристики маси, що транспортується. Розрахункові математичні моделі найчастіше є диференціальними рівняннями, що пов'язують між собою фактори, які різною мірою впливають на процес. Щоб розв'язувати та аналізувати такі моделі, доцільно використовувати сучасні пакети комп'ютерних програм символічної математики «Maple» [2]. Вони дають можливість отримати найцінніші, з погляду аналізу процесу, його моделювання, інтенсифікації і визначення потрібних конструктивних даних, результати в аналітичному вигляді.

Математична модель для визначення швидкості $V(z)$ при течії продукту на прямій ділянці труби, довжина якої z і радіус R , за умови, що її реологічне рівняння має вигляд

$$\tau = \tau(z) + \mu \frac{\partial z}{\partial t},$$

де $\tau(z)$ — граничне напруження зсуву, μ — характеристика в'язкості продукту, і край жорсткого ядра [2]

$$r_0 = 2\tau(z) \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)^{-1}$$

при $r_0 \ll R$, в наближеному, придатному для інженерних розрахунків вигляді записується так:

$$\text{sys} := -R^2 \left(\frac{\partial}{\partial z} P(z) \right) = 4V(z)\mu_{hl} - 4\tau R; \quad \frac{\partial}{\partial z} V(z) = kP(z). \quad (1)$$

Друге рівняння цієї системи характеризує зв'язок між

градієнтом швидкості $\frac{\partial}{\partial z} V(z)$ і тиском $P(z)$ на відмітці z прямої ділянки труби. Залежно від виду сировини воно може мати такий вигляд:

$$\begin{aligned} \text{або} \quad \frac{\partial}{\partial z} V(z) &= k_1 P(z) - k_2 \tau(z) \\ \frac{\partial}{\partial z} \tau(z) &= k_3 P(z) - k_4 V(z). \end{aligned} \quad (2)$$

Аналітичний розв'язок системи (1) має вигляд:

$$F := \left\{ \begin{aligned} V(z) &= \frac{1}{2} \left[\frac{R \left(\frac{\sqrt{\mu_{hl}}(\tau R - \mu_{hl}) \cos \left(2 \frac{\sqrt{k} \sqrt{\mu_{hl}} z}{R} \right) + P \sin \left(2 \frac{\sqrt{k} \sqrt{\mu_{hl}} z}{R} \right) \sqrt{k} \mu_{hl} + 2\tau \sqrt{\mu_{hl}} \right)}{\mu_{hl}^{3/2}} \right. \\ &\quad \left. - \frac{(\tau R - \mu_{hl}) \sin \left(2 \frac{\sqrt{k} \sqrt{\mu_{hl}} z}{R} \right) + P \cos \left(2 \frac{\sqrt{k} \sqrt{\mu_{hl}} z}{R} \right)}{\sqrt{\mu_{hl}} R \sqrt{k}} \right] \end{aligned} \right. \quad (3)$$

За допомогою того самого пакета комп'ютерних програм «Maple» можна спростити останнє рівняння:

$$F := \left\{ \begin{aligned} P(z) &= P + 4 \frac{\tau R - \mu_{hl}}{R^2} z - 2 \frac{\mu_{hl} k P}{R^2} z^2 - \frac{2 k \mu_{hl} (4\tau R - 3\mu_{hl})}{3 R^4} z^3 + \\ &\quad + \frac{2 \mu_{hl}^2 k^2 P}{3 R^4} z^4 + \frac{2 \mu_{hl}^2 k^2 (4\tau R - 4\mu_{hl})}{15 R^6} z^5 + O(z^6); \\ V(z) &= 1 + k P z + \frac{2 k (3\tau R - 3\mu_{hl})}{3 R^2} z^2 - \frac{2 k^2 \mu_{hl} P}{3 R^2} z^3 - \\ &\quad - \frac{2 \mu_{hl} k^2 (5\tau R - 5\mu_{hl})}{15 R^4} z^4 + \frac{2 \mu_{hl}^2 k^3 P}{15 R^4} z^5 + O(z^6). \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Аналізувати розв'язок рівняння і його спрощений вираз у вигляді полінома п'ятого степеня складно для інженерного тлумачення процесу. Тому подамо розв'язок системи у вигляді графіка (рис.1), припустивши, що тиск у

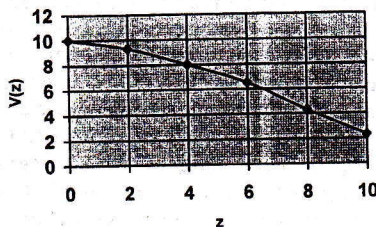


Рис. 1. Залежність швидкості руху $V(z)$ сировини від довжини труби z

котлі $1,8 \cdot 10^5$ Па і шквара має значну кількість клейоутворювальних речовин (велика питома в'язкість системи) [3].

Аналіз графіка свідчить, що для труби діаметром 150 мм, при початковому тиску в котлі $2 \cdot 10^5$ Па, швидкість просування шквари по трубі залежить від довжини труби: при довжині 10 м швидкість буде дорівнювати 2 м/с. Цього достатньо, щоб забезпечити нормальну роботу транспортної системи, оскільки збої в русі починаються, коли швидкість продукту досягає 0,5 м/с. У цьому разі при незначних змінах у технологічному регламенті, таких як зниження температури, вологості, вмісту жиру, можуть утворюватися затори [3].

Враховуючи громіздкість рівнянь (3) і (4), у разі потреби виконання наближених розрахунків доцільно використовувати рівняння апроксимації функції $V(z)$. У цьому разі математична модель процесу буде мати вигляд

$$V(z) = 10 - 0,38z - 0,039z^2.$$

При проектуванні траси важливо знати, як змінюється швидкість руху продукту залежно від діаметра труби.

На графіку (рис. 2) наведено розв'язок рівняння (3) для різних діаметрів труби при тиску передування $P = 1,6 \cdot 10^5$ Па.

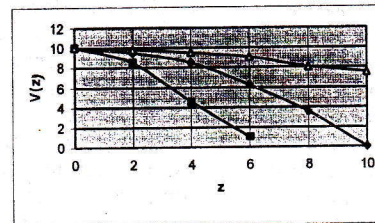


Рис. 2. Залежність швидкості руху $V(z)$ сировини від діаметра труби, мм:
 Δ — 150; \diamond — 100; \blacksquare — 80

Математичні моделі, отримані після апроксимації графічно поданих функцій, мають такий вигляд: для діаметра 150 мм

$$V(z) = 10 - 0,07z - 0,02z^2;$$

для діаметра 100 мм

$$V(z) = 10 - 0,03z - 0,1z^2;$$

для діаметра 80 мм

$$V(z) = 10 - 0,76z - 0,13z^2.$$

Аналіз кривих $V(z)$ свідчить, що для шквари мінімальний діаметр труби має бути не менше ніж 100 мм, інакше вона може закупоритись.

Рівняння (3) дає можливість оцінити вплив реологічних властивостей м'ясної шквари на режим центрифугування. У разі зміння реологічних характеристик шквари (а це має місце, коли транспортується різна за своїми структурно-механічними властивостями сировина) швидкість $V(z)$ змінюється. Із збільшенням в'язкості μ продукту $V(z)$ різко зменшується, і щоб зберегти усталений режим транспортування, треба збільшувати діаметр труби або початковий тиск. Можна використовувати технологічне регулювання співвідношення компонентів суміші, що транспортується, з метою зміння їхніх реологічних властивостей — зменшення в'язкості.

Отримані математичні моделі дають можливість кваліфіковано спроектувати трасу лінії передування шквари на центрифугування.

Висновки. Описаний метод математичного моделювання та аналізу механічних процесів на основі сучасних комп'ютерних програм символічної математики дає змогу отримувати і подавати у зручному для аналізу вигляді залежності основних розрахункових параметрів трубопроводного транспорту, підвищувати точність розрахунків

насамперед завдяки врахуванню реологічних властивостей продукту. Отримані результати дають змогу проектувати сучасні технологічні лінії перероблення відходів м'ясного виробництва.

Вдосконалення існуючих і проектування нових технологічних ліній перероблення відходів м'ясного виробництва потребує нових знань механізмів процесів транспортування сировини по трубах. Ці знання можна набутися, якщо спиратися на нові наукові розробки.

ЛІТЕРАТУРА

1. А.с.1650254 СССР, МКИ В04В3/00, с. 11В1/14. Способ обезжиривания шквары / В.С. Гуць. – Опубл. 23.05.91, Бюл. № 19.
2. Гуць В.С., Прип'ік О.С., Коваль О.А. Комп'ютерні програми аналітичних розрахунків процесів харчових виробництв // Наук. пр. УДУХТ – 2001. – № 10 (ч. 2). – С. 135.
3. Гуць В.С., Коваль О.А., Ткаченко К.Д. Інтенсифікація виробництва тваринних кормів з м'ясної сировини // Наук. пр. НУХТ. – 2002. – № 11. – С. 82–83.

Одержана редколегією 13.01.03 р.