

Адгезія харчових продуктів в процесах пакування

В.С. Гуць, д.т.н., О.А. Коваль, к.т.н., Національний університет харчових технологій, м. Київ

У харчових технологіях при підготовці сировини, отриманні напівфабрикатів, готових виробів, їх пакуванні і зберіганні велике значення має взаємодія продукту з різними поверхнями.

Така взаємодія, як правило, призводить до прилипання продукту до поверхні робочих органів технологічного і пакувального обладнання, конструкційних і пакувальних матеріалів, тари тощо. У техніці явище прилипання прийнято називати адгезією [1,2].

Адгезія харчових мас частіше є небажаною. Вона негативно впливає на ефективність використання обладнання, якість продукту, призводить до збільшення витрат сировини і енергетичних ресурсів.

Можна навести безліч прикладів негативного впливу адгезії. На рис. 1 видно негативний вплив адгезії при формуванні порцій котлет на ротатійному автоматі. Поверхня отриманого продукту шорстка, має вириви, що свідчать про налипання фаршу до поверхні робочих органів формуючого пристрою.

Прикладом негативного впливу адгезії є налипання пельменів до стрічки конвеєра або поверхні лотка при формуванні і подальшому заморожуванні. Сила зчеплення настільки велика, що для відокремлення пельменів металеву стрічку нагрівають, витрачаючи на це значну кількість енергії.

Споживачам часто приходится стикатись з явищем, коли продукт прилипає до упаковки, а при його вилученні частина залишається на поверхні останньої. Це призводить до втрат і псування товарного вигляду.

З широким впровадженням у харчове виробництво сучасних автоматизованих ліній, коли швидкість

оброблення харчових мас значно зросла і широко впроваджуються нові конструкційні і пакувальні матеріали, виникла необхідність у вивченні міцності адгезії, моделюванні процесів, що відбуваються у зоні розділення з урахуванням як виду і стану поверхні, так і структурно-механічних властивостей харчових продуктів.

Основною причиною недостатнього вивчення адгезії є складність проведення експериментальних досліджень. Більшість приладів для дослідження базуються на вимірюванні зусиль за допомогою індукційних або тензодатчиків. Основним недоліком яких є велика інерційність і неможливість отримання достатньо точних результатів при великих швидкостях відривання поверхні робочого органу від продукту (або навпаки) і імпульсній зміні зусиль. Мало вивченими і особливо складними для моделювання залишаються процеси, пов'язані з адгезією структурованих харчових мас, таких як тісто, м'ясна і сирна маси, риба, цукерки, різні фруктові і желейні начинки, хлібопекарські і борошняні кондитерські вироби. Дослідженнями встановлено, що зменшити негативний вплив адгезії на технологічні процеси можна за допомогою всебічного вивчення цього явища, тобто на основі застосування сучасних методів моделювання, аналізу процесів у зоні контакту поверхня — продукт.

Практично зовсім не вивченими залишаються механізми взаємодії продукту з різними сучасними конструкційними і пакувальними матеріалами при великих швидкостях відокремлення харчової маси від поверхні. Відомо, що сучасні харчові і

пакувальні технології розвиваються у напрямках інтенсифікації технологічних процесів, які, в основному, неможливі без збільшення швидкостей руху робочих органів обладнання.

Дослідженнями, проведеними авторами, також встановлено, що міцність адгезії харчових мас (таких як тісто, м'ясний фарш, ковбасні і кондитерські вироби) при швидкостях відокремлення продукту від конструкційних і пакувальних матеріалів більше ніж 1 м/с не визначалась. Пов'язано це, у першу чергу, з відсутністю у недалекому минулому гострої потреби в моделюванні існуючих процесів змішування, формування, дозування, транспортування харчових мас, які здебільшого відбуваються при відносно невеликих швидкостях руху робочих органів технологічного обладнання. З потребою інтенсифікації цих процесів виникла необхідність у збільшенні швидкостей і відповідно отриманні нових експериментальних даних для якісного проектування нових видів технологічного обладнання.

В розрахунках механічних процесів

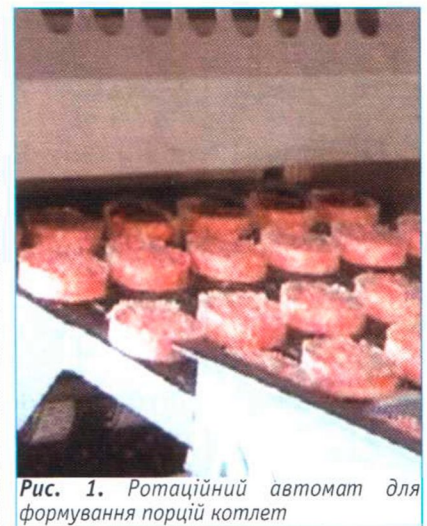
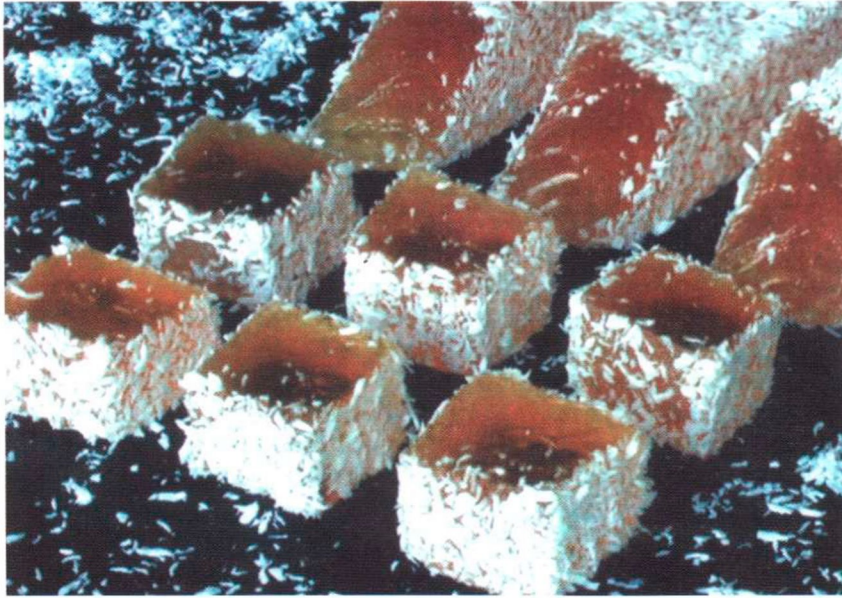


Рис. 1. Ротатійний автомат для формування порцій котлет



технологічного і пакувального обладнання широко використовується таке поняття, як міцність адгезії. Під міцністю адгезії треба розуміти прояв адгезії залежно від таких факторів, як швидкість відокремлення, тривалість і тиск попереднього контакту, площа контакту та ін. Треба розрізняти силу адгезії, яка вимірюється у Н (Ньютон), і міцність адгезії — Н/м².

Враховуючи це, авторами для проведення досліджень була розроблена принципово нова методика, в

основу якої покладено непрямий метод визначення міцності адгезії [3].

При проведенні досліджень визначали дальність польоту зразка, який відокремлювався від поверхні робочого органу, виконаного у вигляді пластини, котру миттєво зупиняли.

Розглянемо послідовність визначення міцності адгезії на прикладі зразка харчового продукту, адгезійні властивості якого наближаються до тіста, м'ясного фаршу, сирної маси, тобто міцність

адгезії змінюється у межах від 3 до 50 кПа [1]

Визначимо параметри траєкторії руху зразка продукту після відокремлення його від пластини, виготовленої з нержавіючої сталі.

Складемо параметричні рівняння для проєкцій швидкостей на осі координат. Врахуємо, що у момент відокремлення продукту проєкції швидкостей на осі x і y будуть:

$$\begin{aligned} V_{0x} &:= V_0 \cos(\alpha); \\ V_{0y} &:= V_0 \sin(\alpha), \end{aligned} \quad (1)$$

де α — кут, під яким відривається продукт; V_0 — початкова швидкість руху зразка, м/с;

Використаємо для подальших розрахунків методи символної комп'ютерної математики [4] (пакет «Plots» системи «Maple-10»). Ці методи необхідні для виконання аналізу моделей і візуального представлення результатів.

Запишемо систему диференціальних рівнянь, які характеризують рух досліджуваного зразка при різних коефіцієнтах K опору руху. Величини коефіцієнтів K вибирали, провівши аналітичні дослідження, таким чином щоб охопити весь інтервал можливих змін від $K_1=0,09$ до $K_5=0,3$ [3].

$$\begin{aligned} >\text{sys1} := \text{massa}[1] * \text{diff}(x(t), t\$2) = -K[1] * \text{diff}(x(t), t), \text{massa}[1] * \text{diff}(y(t), t\$2) = -K[1] * (\text{diff}(y(t), t)) - \text{massa}[1] * g; \\ \text{sys1} &:= \text{massa}_1 \left(\frac{d^2}{dt^2} x(t) \right) = -K_1 \left(\frac{d}{dt} x(t) \right), \text{massa}_1 \left(\frac{d^2}{dt^2} y(t) \right) = -K_1 \left(\frac{d}{dt} y(t) \right) - \text{massa}_1 g \\ >\text{sys2} := \text{massa}[1] * \text{diff}(x(t), t\$2) = -K[2] * \text{diff}(x(t), t), \text{massa}[1] * \text{diff}(y(t), t\$2) = -K[2] * (\text{diff}(y(t), t)) - \text{massa}[1] * g; \\ \text{sys2} &:= \text{massa}_1 \left(\frac{d^2}{dt^2} x(t) \right) = -K_2 \left(\frac{d}{dt} x(t) \right), \text{massa}_1 \left(\frac{d^2}{dt^2} y(t) \right) = -K_2 \left(\frac{d}{dt} y(t) \right) - \text{massa}_1 g \\ >\text{sys3} := \text{massa}[1] * \text{diff}(x(t), t\$2) = -K[3] * \text{diff}(x(t), t), \text{massa}[1] * \text{diff}(y(t), t\$2) = -K[3] * (\text{diff}(y(t), t)) - \text{massa}[1] * g; \quad (2) \\ \text{sys3} &:= \text{massa}_1 \left(\frac{d^2}{dt^2} x(t) \right) = -K_3 \left(\frac{d}{dt} x(t) \right), \text{massa}_1 \left(\frac{d^2}{dt^2} y(t) \right) = -K_3 \left(\frac{d}{dt} y(t) \right) - \text{massa}_1 g \\ >\text{sys4} := \text{massa}[1] * \text{diff}(x(t), t\$2) = -K[4] * \text{diff}(x(t), t), \text{massa}[1] * \text{diff}(y(t), t\$2) = -K[4] * (\text{diff}(y(t), t)) - \text{massa}[1] * g; \\ \text{sys4} &:= \text{massa}_1 \left(\frac{d^2}{dt^2} x(t) \right) = -K_4 \left(\frac{d}{dt} x(t) \right), \text{massa}_1 \left(\frac{d^2}{dt^2} y(t) \right) = -K_4 \left(\frac{d}{dt} y(t) \right) - \text{massa}_1 g \\ >\text{sys5} := \text{massa}[1] * \text{diff}(x(t), t\$2) = -K[5] * \text{diff}(x(t), t), \text{massa}[1] * \text{diff}(y(t), t\$2) = -K[5] * (\text{diff}(y(t), t)) - \text{massa}[1] * g; \\ \text{sys5} &:= \text{massa}_1 \left(\frac{d^2}{dt^2} x(t) \right) = -K_5 \left(\frac{d}{dt} x(t) \right), \text{massa}_1 \left(\frac{d^2}{dt^2} y(t) \right) = -K_5 \left(\frac{d}{dt} y(t) \right) - \text{massa}_1 g, \end{aligned}$$

де $massa_1$ — маса зразка, кг; x і y — переміщення зразка у напрямку осей координат; K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 — змінні коефіцієнти опору руху зразка, Н·с/м; $g=9,81$ м/с².

Рівняння системи (2) можна розв'язати у загальному вигляді.

Для прийнятих початкових умов маємо:

`>eg1:=dsolve({sys1,x(0)=0,D(x)(0)=Vox,y(0)=0,D(y)(0)=Voy},{y(t),x(t)});`

$$eg1 := \left\{ \begin{aligned} x(t) &= \frac{V_0 \cos(\beta) \text{massa}_1}{K_1} - \frac{V_0 \cos(\beta) \text{massa}_1 e^{-\left(\frac{K_1 t}{\text{massa}_1}\right)}}{K_1}, y(t) = \\ &= - \left[\frac{\text{massa}_1 e^{-\left(\frac{K_1 t}{\text{massa}_1}\right)}}{K_1} x \frac{(\text{massa}_1 g + V_0 \sin(\beta) K_1)}{K_1} + \text{massa}_1 g t - \frac{\text{massa}_1 (\text{massa}_1 g + V_0 \sin(\beta) K_1)}{K_1} \right] \cdot \frac{1}{K_1}. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Рівняння (3) дає можливість визначити коефіцієнт опору K_1 . Для цього

треба провести експериментальні дослідження — заміряти початкову швидкість V_0 , масу зразка « $massa_1$ » параметри траєкторії $x(t)$ або $y(t)$, час польоту t .

Розроблена авторами експериментальна установка і методика досліджень дають можливість знайти такі параметри: початкову швидкість руху зразка (знаючи розміри, масу і кут відхилення фізичного маятника); величини $x(t)$ і $y(t)$ (простим вимірюванням довжини); масу зразка (зважуванням з точністю до десятої частини грама). Найбільш складно знайти тривалість t польоту зразка. Для цього треба значно ускладнювати конструкцію установки, тобто встановити датчики фіксації початку відокремлення зразка і торкання горизонтальної поверхні у кінці польоту, або проводити швидкісну зйомку процесу з подальшим визначенням t .

Така комплектація установки можлива, але потребує значних фінансових витрат, що не є доцільним для широкого впровадження метода.

Для того, щоб визначити міцність адгезії не вимірюючи тривалість t польоту зразка, запропоновано наступну послідовність проведення досліджень. Значення коефіцієнта

опору K , що змінюється в межах від 0,09 до 0,3, характерне для руху продуктів масою до 50–100 г зі швидкістю від 1 до 10 м/с.

Запишемо розв'язок системи рівнянь (2) у чисельному вигляді, враховуючи початкові умови:

$$t = 0 \rightarrow x(0) = 0 \rightarrow y(0) = 0 \rightarrow \frac{\partial x}{\partial t} = V_{0x} \rightarrow \frac{\partial y}{\partial t} = V_{0y};$$

для першої системи `sys1` маємо:

```
>eg1:=dsolve({sys1,x(0)=0,D(x)(0)=Vox,y(0)=0,D(y)(0)=Voy},{y(t),x(t)},type=numeric,output=listprocedure);
eg1:= [t=(proc(t)...end proc),
x(t)=(proc(t)...end proc),
d/dt y(t)=(proc(t)...end proc)],
d/dt x(t)=(proc(t)...end proc),
y(t)=(proc(t)...end proc). \quad (4)
```

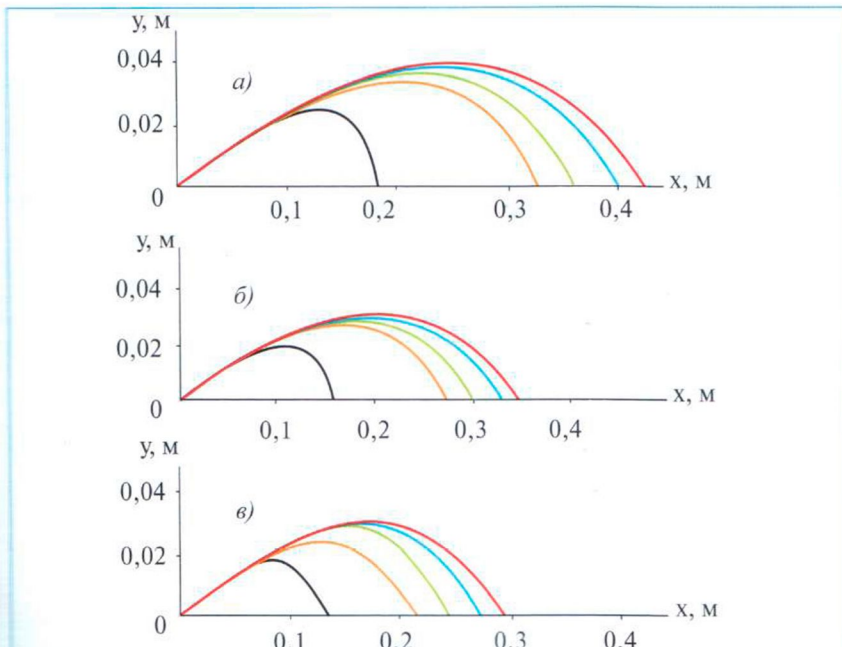


Рис. 2. Траєкторії руху зразка продукту при різних початкових швидкостях: а) $V_0=4,0$ м/с; б) $V_0=3,5$ м/с; в) $V_0=3$ м/с; $K = (-) 0,3$; $K = (-) 0,14$; $K = (-) 0,12$; $K = (-) 0,01$; $K = (-) 0,09$

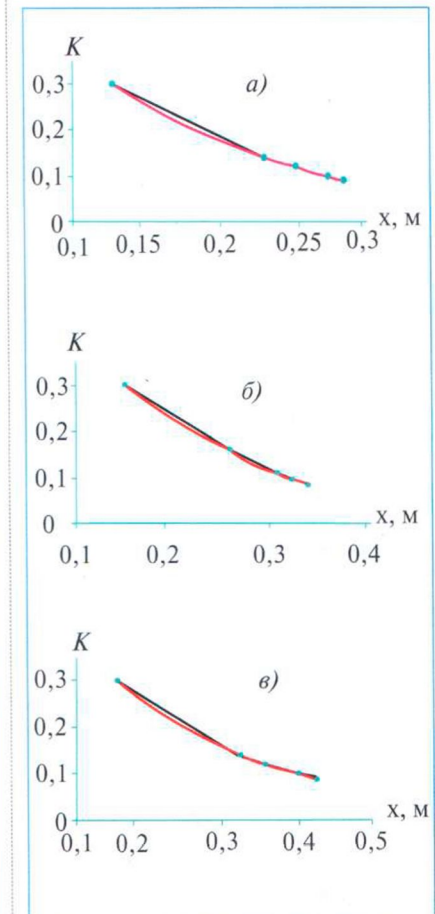


Рис. 3. Графік залежності $K(x)$ для різних початкових швидкостей V_0 : а) $V_0=3$ м/с; б) $V_0=3,5$ м/с; в) $V_0=4$ м/с

Аналогічно можна записати і для sys2, sys3, sys4, sys5.

Зауважимо, що розв'язання (4) рівняння (2) для sys1 записано у скороченому вигляді через спеціальні функції комп'ютерної символічної математики.

Побудуємо траєкторії руху зразка продукту масою 15 г при різних швидкостях V_0 його відокремлення, початковому куті відхилення траєкторії польоту зразка від горизонтальної поверхні $\alpha = \pi / 12$; змінних коефіцієнтах опору K .

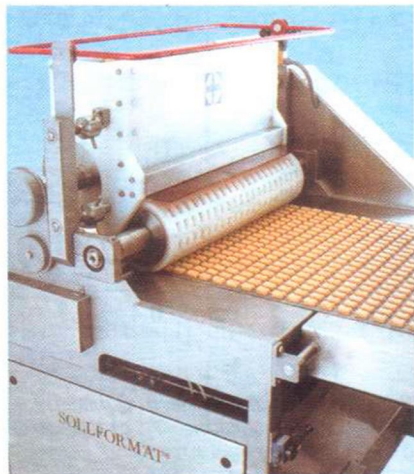
Траєкторії руху зразка для різних коефіцієнтів K показані на рис. 2.

Проведений аналіз графіків траєкторій руху дає можливість встановити, що зі збільшенням коефіцієнта опору K довжина переміщення по осі x зменшується непропорційно. Графіки залежності між коефіцієнтом опору K і довжиною переміщення по осі x представлено на рис. 3.

Провівши обробку графічних залежностей, отримали відповідні рівняння апроксимації.

Для: $V_0=3 \rightarrow K=4,58x^2-3,25x+0,63$; (5)
 $V_0=3.5 \rightarrow K=3,65x^2-2,9x+0,66$; (6)
 $V_0=4 \rightarrow K=2,29x^2-2,26x+0,63$. (7)

Якщо провести експериментальні дослідження зразка продукту тієї ж самої маси, за умов, коли адгезія відсутня, траєкторія польоту зразка буде мати інший вигляд і, відповідно, буде іншою (більшою) довжина координати x . Зазначимо, що у цьому випадку заважати рухові продукту буде тільки опір повітря.



Для проведення досліджень, коли адгезія відсутня, точніше мінімальна, і нею можна знехтувати, треба відокремлювати продукт від поверхні, попередньо загорнувши його у тонку антиадгезійну плівку, або поставивши антиадгезійну прокладку між продуктом і поверхнею.

Замірявши величину x і підставивши її в одне з рівнянь (5–7), залежно від початкової швидкості V_0 , отримаємо значення коефіцієнта опору K_{on} .

Для кожного з рівнянь системи (2) коефіцієнт опору є сумою:

$$K = K_{on} + K_a, \quad (8)$$

де K_{on} — складова коефіцієнта опору, яка враховує протидію повітря; K_a — складова коефіцієнта опору, що враховує адгезію.

З рівняння (8) знайдемо:

$$K_a = K - K_{on}. \quad (9)$$

На прикладі покажемо послідовність розрахунку міцності адгезії.

Аналізуючи траєкторії польоту продукту масою 15 г при початковій швидкості $V_0=4$ м/с, після вимірювання довжини координати x , маємо $x=0,20$. З рівняння (7) знайдемо величину коефіцієнта K , у нашому випадку він дорівнює 0,27. Той самий зразок відділяємо антиадгезійною плівкою від досліджуваної поверхні і визначаємо величину x . Для досліджуваного зразка вона склала 0,41 м. Підставивши це значення в рівняння (7), знайдемо величину коефіцієнта $K_{on}=0,09$. Знаючи значення коефіцієнта K і K_{on} з рівняння (9), отримаємо:

$$K_a = 0,27 - 0,09 = 0,18 \text{ Н} \cdot \text{с/м}.$$

Відповідно до вибраної моделі руху (2), будемо вважати, що завдяки адгезії з'явилась сила опору P_a , направлена проти напрямку руху зразка, яка дорівнює:

$$P_a = K_a \frac{\partial x}{\partial t}. \quad (10)$$

Так як для розрахунків вибрано вісь x , то

$$\frac{\partial x}{\partial t} = V_0 \cdot \cos \alpha. \quad (11)$$

Підставимо рівняння (11) у (10):

$$P_a = K_a V_0 \cos \alpha. \quad (12)$$

Знаючи величини K_a , V_0 і $\cos \alpha$, визначимо:

$$P_a = 0,18 \cdot 4 \cdot 0,96 = 0,691 \text{ Н}. \quad (13)$$

Для визначення міцності адгезії необхідно знати площу контакту. Її можна заміряти безпосередньо при проведенні експерименту, використавши відомі і прості методики. Наприклад, готувати зразок за шаблоном з визначеною площею, або замірявши периметр площі контакту L та розрахувати за формулою:

$$S = \frac{L^2}{4\pi} \quad (14)$$

Площу також можна виразити через масу зразка. Для досліджуваного зразка площа контакту дорівнює $S=3,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Тоді міцність адгезії (Па) буде:

$$F_a = \frac{P_a}{S} = \frac{0,691}{3,6 \cdot 10^{-4}} = 0,19 \cdot 10^4.$$

Отриманий результат приблизно втричі більший за міцність адгезії желейної маси при швидкості відривання 0,015 м/с.

Використавши наведену методику, автори дослідили, як впливають на міцність адгезії технологічні фактори, пов'язані з додаванням пектинів до фруктово-желейної начинки для кондитерських виробів.

На рис. 4 показана залежність міцності адгезії желейної маси від швидкості відривання від пластини, виготовленої з нержавіючої сталі.

Якщо провести порівняльний аналіз впливу швидкості відривання на міцність адгезії з результатами, коли

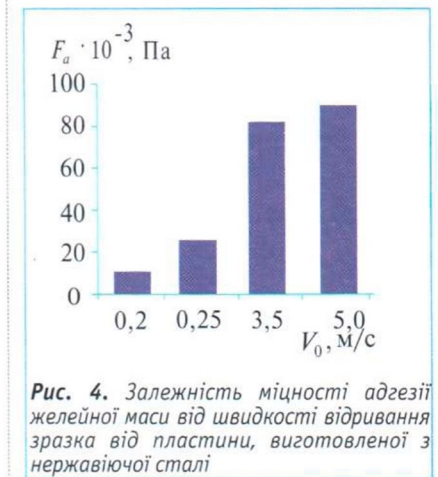
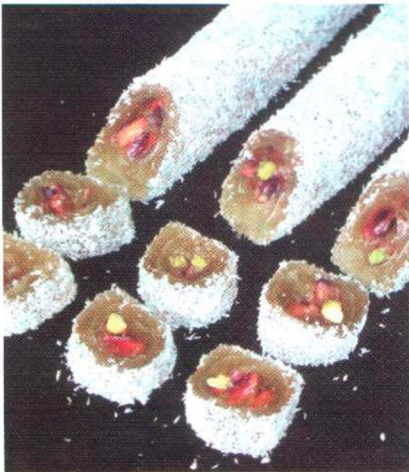


Рис. 4. Залежність міцності адгезії желейної маси від швидкості відривання зразка від пластини, виготовленої з нержавіючої сталі



$V_0=3,5...5$ м/с і $V_0=0,2...0,25$ м/с [1], можна зробити висновок, що міцність адгезії зі збільшенням V_0 зростає непрямопропорційно. Для малих швидкостей, коли $V_0=0,2...0,25$ м/с, це відбувається значно інтенсивніше, ніж для великих, коли $V_0=3,5...5$ м/с. Запропонована методика непрямого визначення міцності адгезії відрізняється від існуючих простотою апаратурного оформлення. При прове-

денні досліджень треба провести експеримент, в основу якого покладено вимірювання довжини польоту зразка після миттєвої зупинки пластини. Знаючи масу зразка, площу контакту його з поверхнею, за допомогою запропонованої моделі, використавши для розрахунків методи комп'ютерної символічної математики, можна знайти міцність адгезії. Методика проведення досліджень відносно проста, не потребує для проведення досліджень складної математично-статистичної обробки експериментальних даних. Математичне забезпечення встановлюється на персональний комп'ютер.

Література

1. Зимон А.Д. Адгезия пищевых масс. — М.: Агропромиздат, 1985. — 272с.
2. Кинлок Э. Адгезия и адгезивы. — М.: Мир, 1991. — 485с.
3. Гуць В.С., Коваль О.А. Визначення міцності адгезії. Матеріали ІХ міжнародної науково-технічної кон-

ференції «Нові технології та технічні рішення в харчовій та переробній промисловості». — К.: НУХТ, 2005. — С. 122.

4. Дьяконов В.П. Компьютерная математика. Теория и практика. — М.: Нолидж, 2001. — 401 с.



Adhesion of foodstuff during packing
V.S. Gutz, Dr., O.A. Koval, Dr.,
National university of food technology,
Kyiv

In this article the authors offer a new technique of research of adhesion of the structured edible dispersible systems. Designly simple experimental installation, availability of a computer software, opportunity of carrying out of researches at the increased speeds of separation of a product from a plate, enable of its wide introduction during accounts of parameters of working elements of the technological and packing equipment. The received experimental data of hardness of adhesion of weight from jelly with the additives of pectine well correlate with the data of the references for similar products.