

Режим роботи ЛПА — це складний електромагнітний процес, що характеризується періодичним чергуванням по вертикалі одноимених і протилежних магнітних полюсів на всіх ділянках активної зони (рис. 2). При цьому періодично змінюються також траєкторія і довжина шляху замикання основного магнітного потоку  $B_0$  в активній зоні.

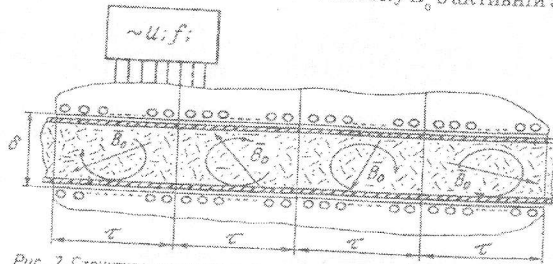


Рис. 2. Структура електромагнітного поля в активній зоні приладу

Особливістю ЛПА є специфічна просторова структура результуючого електромагнітного поля в активній зоні приладу. Поле створюється двома зустрічно напрямленими проточними магнітними полями, що зміщені на  $1/3\pi$  (утворюється ефект "стоячої хвилі"). Поле ЛПА вихрове еліптичне однорідне по всьому об'єму активної зони. Індукція такого електромагнітного поля дорівнює 0,1 Тл.

Позитивним моментом є те, що ЛПА належить до електромагнітних приладів промислової частоти, тобто не потребує дорогих перетворювальних пристроїв, що здешевлює його, підвищує надійність і знижує енергоспоживання.

Основними факторами, що впливають на ефективність оброблення субстратів в апараті ЛПА, є тривалість процесу дезінтеграції та співвідношення маси феромагнітних частинок до маси субстрату.

На рис. 3 показано як збільшується ступінь вилучення біологічно активних компонентів за сухими

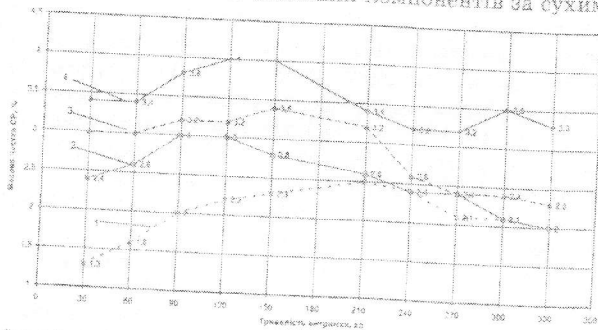


Рис. 3. Динаміка змінення масової частки сухих речовин в екстрактах кропу запашного (*Anethum graveolens*) та м'яти перцевої (*Mentha Piperita*) після передобробки в апараті ЛПА

речовинами (у відсотках) в разі використання передобробки в апараті ЛПА порівняно зі ступенем вилучення

УДК 621.798

36

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРОФІЛЮВАННЯ М'ЯКОЇ ТРАНСПОРТНОЇ ТАРИ ІЗ СИПКОЮ ХАРЧОВОЮ ПРОДУКЦІЄЮ

У процесі виконання заключних операцій з сипкими продуктами, зокрема під час пакування вантажів у м'якій тарі (мішках), на підприємствах харчової промисловості виникає потреба у притаманній самій цій групі вантажів операції профілювання. А вже після наповнення та зашивання мішка (навіть у разі, коли фасувальний пристрій надає мішку правильну геометричну форму), пройшовши кілька конвеєрів та

© А.В. Чуприна, Є.В. Штефан, О.М. Гавва, 2003

тих же компонентів без попередньої обробки на отримання екстракту м'яти перцевої та кропу запашного. Для зручності проведення розрахунків введено коефіцієнт  $K_{\text{д}}$ , який є співвідношенням маси феромагнітних тіл і рослинного субстрату. Криві 1 і 2 — показують значення для м'яти перцевої та кропу запашного відповідно. В контрольних зразках екстракція біологічно активних компонентів проводилась без попередньої обробки в апараті ЛПА. На залежностях 3 і 4 зображено кінетику ступеня вилучення біологічно активних компонентів після передобробки в апараті ЛПА для м'яти перцевої та кропу запашного відповідно. Отже, проведений експеримент дає змогу визначити оптимальні параметри передобробки в апараті ЛПА для кожного із субстратів, для м'яти перцевої тривалість передобробки становить 2 хв при  $K_{\text{д}} = 15,5$  та витримці від 120 до 180 хв, для кропу запашного оптимальна тривалість передобробки становить 3 хв при  $K_{\text{д}} = 19,3$  та витримці від 120 до 150 хв.

Наведені залежності наочно ілюструють ступінь вилучення біологічно активних компонентів рослинної сировини підвищується на 30...50% при зміні параметрів ведення процесу екстракції.

**Висновок.** Метод дезінтеграції, що пропонується, дає можливість значно збільшити ступінь вилучення біологічно активних компонентів без втрати біологічних властивостей рослинної сировини, він досить простий для апаратурної реалізації, не потребує значних фінансових витрат і може використовуватися в харчовій, біологічній та фармацевтичній промисловостях при виробництві фітопрепаратів, при отриманні екстрактів з сировини рослинного та тваринного походження.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Химическая энзимология / Под ред. И.В. Березина. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. — 287 с.
2. Фихте Б.А., Гуревич Г.А. Дезинтеграция клеток. — М.: Наука, 1988. — 224 с.
3. Гуревич Г.А., Фихте Б.А. Биотехнологические основы дезинтеграции микроорганизмов. — Пуццино: ИЦБИ АН СССР, 1990. — 135 с.
4. Дезинтеграция клеток в биотехнологии: науч. трудов. — Пуццино: ИЦБИ, 1999. — 87 с.
5. Пелегов А.И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности. — М.: Пищевая индустрия, 1971. — 519 с.
6. Чижикова Т.В. Машины для измельчения мясных продуктов. — М.: Лег. и пищ. пром-сть, 1992. — 36 с.
7. Технология солодовых экстрактов, концентратов квасного сула и квасу / Н.О. Смелянова, Н.Я. Греч, В.М. Кошова, В.Х. Суходол; За ред. Н.О. Смеляновой. К.: ИСДО, 1994. — 152 с.

Надійшла до редколегії 14.01.03 р.

А.В. Чуприна  
Є.В. Штефан, канд. техн. наук  
О.М. Гавва, д-р техн. наук

жорсткій транспортній тарі) операціях. Однією з таких операцій є профілювання мішків із сипкою продукцією, під час якої наповненому продуктом і захищеному мішку надається форма, наближена до паралелепіпеда.

На сьогодні більшість пристроїв, що виконують цю операцію, сконструйовані на основі експериментальних досліджень процесу профілювання. Щодо аналітичних розрахунків, то їх не проводили через складність фізико-механічних процесів, що відбуваються при цьому в самому продукті.

Пропонована робота присвячена розробленню математичної моделі найпоширенішої технологічної операції — прокачування мішків із сипкими продуктами валком. Ця модель є основою для створення інформаційної технології проектування (ІТП) [1] процесу прокачування, що розглядається. Загальну схему моделювання зображено на рис. 1.

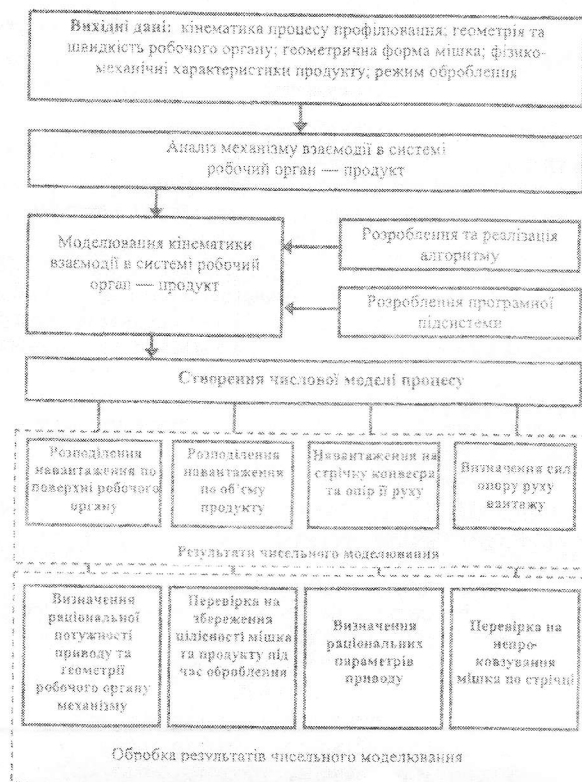


Рис. 1. Схема математичного моделювання процесу профілювання м'якої транспортної тари із сипким продуктом

Розглянемо процеси, що відбуваються під час перекошування валка по поверхні вантажу. Об'єм мішка заповнено частинами продукту (наприклад, солі), між якими є повітряні проміжки. Будемо вважати, що продукт відповідає вимогам стандарту, а тому не містить грудок та конгломератів частинок продукту таких розмірів, щоб вони змінювали загальну картину процесу. Відносна орієнтація частинок має випадковий характер, вони розподілені в одиниці об'єму нерівномірно, розміри, форма й маса різні (згідно із стандартами, наприклад, сіль помелу № 1 має містити не більше ніж 12 % зерен розміром 0 ... 0,8 мм, не менше 85 % зерен розміром 0,8...1,2 мм і не більше ніж 3 % зерен розміром 1,2 ... 2,5 мм). Цим визначається неоднорідна структура ущільненого продукту в мішку.

У процесі деформування продукту валком механізму профілювання стискальні напруження ущільнюють продукт, внаслідок чого заповнюється порожнина (зменшується відносний об'єм газової фази). Процес

ущільнення супроводжується зміненням орієнтації частинок та підвищенням щільності їх прилягання, збільшенням площі їх контакту. При цьому зменшується податливість продукту. Під час прокачування, окрім структурних деформацій, відбувається переміщення продукту з більш ущільнених ділянок у менш ущільнені, а також механічне переміщення його в процесі взаємодії з валком.

Слід зазначити, що під час профілювання деяких харчових продуктів (наприклад, цукру) руйнування зерен неприпустиме, що є певним обмеженням на виконання цієї операції.

Виходячи з вищевикладеного, вважаємо доцільним розробити математичну модель процесу прокачування, яка дає змогу розраховувати формозміну продукту, його ущільнення, напружено-деформований стан продукту в об'ємі тари залежно від геометричних і кінематичних параметрів валка, фізико-механічних характеристик продукту (допустимого напруження на стискання, модуля пружності, пористості і т.ін.).

Відповідно до загальної технології побудови математичної моделі [1] вона включає в себе три основні частини: аналітичну, алгоритмічну та числову моделі.

В основу *аналітичної моделі* (замкнена система рівнянь, що описує поведінку продукту в реальних просторово-часових умовах) покладено загальні закони збереження маси та кількості руху дисперсного середовища [1]. Варто зауважити, що ця модель розглядає лише осесиметричний або плоскодеформований стан продукту. Тому будемо розглядати середній переріз мішка при найбільш несприятливих умовах — коли більша частина продукту зосереджена в одному з кінців мішка. Однією з умов якісного виконання операції є подача мішка таким чином, щоб більшість продукту була в його передній частині.

*Алгоритмічна модель* складається з таких основних частин:

розв'язок сформульованої задачі, що оснований на принципі розщеплення проекційно-сітковими методами: скінченних елементів (МСЕ) за просторовими змінними та скінченних різниць (МСР) за часовим аргументом;

обчислювальні алгоритми, що реалізують реологічні процеси операції профілювання м'якої транспортної тари із сипкою харчовою продукцією;

обчислювальні алгоритми, які реалізують кінематичні особливості процесу прокачування мішків із сипкими продуктами валком.

Оскільки перша частина алгоритмічної моделі вже розглядалася [2], то зосередимося на другій та третій частинах.

Відповідно до загальної концепції МСЕ вихідну область, яку займає тіло, апроксимуємо сукупністю трикутних елементів із заданою кількістю вузлових точок (або вузлів) (рис. 2). Поле швидкості переміщень у межах кожного елемента визначаємо інтерполяцією за вузловими значеннями. Компоненти тензора швидкості деформацій в елементах визначаємо диференціюванням цих інтерполяційних співвідношень.

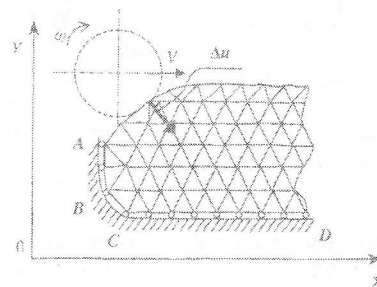


Рис. 2. Схема графічного задання граничних умов

Дискретна форма рівнянь рівноваги (для скінченно-елементної моделі об'єму середовища у м'якій транспортній тарі) має вигляд [2]

$$[k]\{u'\} - \{R'\} = 0, \quad (1)$$

де  $[k]$  — матриця жорсткості ансамблю елементів;  $\{u'\}$  — вектор швидкостей переміщень в об'ємі сипкого середовища;  $\{R'\}$  — вектор швидкостей зміння еквівалентних вузлових сил.

Інтегрування рівнянь рівноваги дає систему рівнянь рівноваги в приростах:

$$[k]\{\Delta u\} - \{R\} = 0. \quad (2)$$

Процес деформування м'якої транспортної тари із сипкою харчовою продукцією (далі об'єкта), яку у вихідному стані вважаємо пружним, апроксимуємо послідовністю малих кроків. На кожному кроці задаємо пробний приріст величини  $\Delta P^*$ , яка характеризує зміну силового або кінематичного навантаження на тіло (продукт). В результаті формування та розв'язання системи (2) визначаємо приріст переміщень вузлів скінченно-елементної моделі  $\{\Delta u\}^*$ . Після визначення приросту деформацій  $\{\Delta \epsilon\}^*$  і напружень  $\{\Delta \sigma\}^*$  в елементах здійснюємо масштабування величини  $\Delta P^*$  таким чином, щоб скоорегована зміна навантаження  $\Delta P = R_{\min} \Delta P^*$  відповідала переходу у пластичний стан найбільш навантаженого елемента. Справжні прирости компонент векторів  $\{\Delta u\}$ ,  $\{\Delta \epsilon\}$  та  $\{\Delta \sigma\}$  на цьому кроці визначаємо множенням  $R_{\min}$  на величини відповідно  $\{\Delta u\}^*$ ,  $\{\Delta \epsilon\}^*$  та  $\{\Delta \sigma\}^*$ . Напружено-деформований стан визначаємо підсумовуванням приростів  $\{\Delta u\}$ ,  $\{\Delta \epsilon\}$  та  $\{\Delta \sigma\}$ , що відповідають послідовному змінню навантаження  $\Delta P$  від кроку до кроку.

Зміння характеристик жорсткості скінченно-елементної моделі об'єкта на кожному кроці навантаження зумовлене змінням координат вузлів сітки скінченних елементів та переходом елементів з одного фізичного стану в інший (із пружного в пластичний чи навпаки).

Алгоритмічну процедуру, яка імітує взаємодію валка з мішкою, подаємо в ітераційному вигляді. Валок ідеалізуємо з колом, яке перекочується в горизонтальному напрямку по прямій, контактуючи з точками поверхні мішка і деформуючи його. Сам мішок залишається нерухомим. Хоча на практиці така схема профілювання реалізується інакше: мішок, що транспортується конвеєром, проходить під валком, вісь якого нерухомо закріплена (або підпружинена) над конвеєром, однак на точність моделі подібне припущення не впливає. Власне, сам валок в алгоритмічній моделі лише уявний. Його дія на продукт передається вимушеним жорстким переміщенням точок поверхні мішка. Мішок з продуктом задаємо у вигляді скінченно-елементної моделі.

Процес руху валка розбиваємо на  $N$  етапів. Кожен етап відображає одиничне переміщення точок поверхні продукту, яке відповідає переміщенню точок поверхні валка при прямолінійному русі його центра  $O$  на відрізок  $\Delta l$  та обертанні з постійною швидкістю  $\omega$  (рис. 3). Чим більша кількість етапів  $N$ , тобто чим менша величина одиничного переміщення  $\Delta l$  центра обертання валка, тим точніше модель відображає реальний процес. Однак збільшувати  $N$  недоцільно, оскільки тривалість обчислювального експерименту суттєво зростає, а також відповідно зростають масиви даних — результатів розрахунку. З другого боку, якщо кількість етапів взяти такою малою, що одиничне переміщення  $\Delta l$  центра валка буде більше, ніж його радіус  $R$ , то математична модель уже не буде адекватною реальному процесу. Тому кількість етапів переміщення  $N$  має бути такою, щоб переміщення  $\Delta l$  точки  $O$  було не менше, ніж половина радіуса  $R$  валка.

Крім загальної початкової форми, яку має продукт, точок його поверхні, фізико-механічних харак-

теристик (набір початкових даних), на кожен етапів процесу прокачування потрібно вводити певну кількість точок поверхні, що підпадають під дію валка. Такі точки вибираємо за номерів точок поверхні, що заданий у моделі, згідно із застосованим алгоритмом значень їхніх координат з координатами точок поверхні валка на початку та наприкінці етапу.

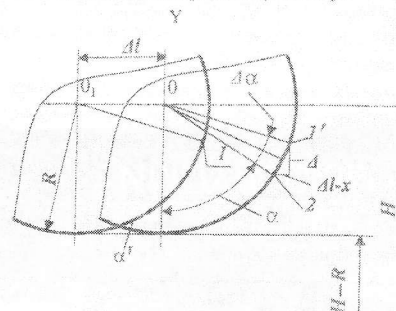


Рис. 3. Схема розрахунку зміни координат точок поверхні мішка

Оскільки закон руху валка відомий (геометричний центр переміщується по прямій), прорахування переміщення точок поверхні продукту валком зміни координат не становить особливих труднощів (рис. 3):

$$\Delta x_i = L/N - a \cos(\alpha - \Delta\alpha/2),$$

де  $L = l + 2R$  — довжина профілювання;  $l$  — довжина мішка;  $N$  — кількість переміщення валка;  $a$  — довжина відрізка між точками  $1'$  і  $2'$ , які відповідають переміщенню та обертанні валка на кут  $\Delta\alpha$ ;  $\alpha$  — кут між вертикалю та лінією, що сполучає центр валка з точкою  $1$  та його вертикалю на початку етапу;  $\alpha = \arcsin((x_{n1} - x_{n0})/R)$  — кут повороту валка на етапі  $n$ ;  $\Delta l = L/N$  — абсциса  $i$ -ї точки на  $n$ -му етапі;  $x_{n0}$  — абсциса  $n$ -ї точки на  $n$ -му етапі;  $x_{n0} = (n \Delta l) L/N$ ;  $n$  — порядковий номер етапу.

Отже, значення переміщень  $i$ -ї точки по осі  $OX$  у разі, коли на початку етапу ця точка перебувала з точкою поверхні валка, обчислюємо з

$$x_{ni} = \Delta l - 2R \sin(\Delta l/R) \cos(\arcsin[(x_{n1} - x_{n0})/R] - \Delta l/(2R));$$

$$\Delta y_{ni} = -a \sin(\alpha - \Delta\alpha/2) - 2R \sin(\Delta l/R) \times \cos(\arcsin[(x_{n1} - x_{n0})/R] - \Delta l/(2R)).$$

Коли точка поверхні продукту потрапляє під валок, її переміщення зменшиться залежно від довжини шляху, який пройде центр валка ( $\Delta l'$ ), щоб увійти в контакт з цією точкою.

Кут  $\alpha'$  (рис. 3) — кут між вертикалю валка та відрізком, що сполучає центр валка з точкою  $i$  на поверхні продукту, визначаємо із виразу:

$$\cos \alpha' = (R - y_{ni} - H)/R = 1 - (y_{ni} - H)/R,$$

$$\alpha' = \arccos(1 - (y_{ni} - H)/R),$$

де  $H$  — ордината прямої, по якій перекочується валок;  $y_{ni}$  — ордината центра валка на цей момент часу;  $x_{ni}' = x_{ni} - R \sin \alpha'$ .

Тоді довжина шляху, який має пройти центр валка, щоб увійти в контакт з цією точкою,

$$\Delta l' = \Delta l - x_{ni} + x_{ni}' + \sqrt{R^2 - (H + R - y_{ni})^2}.$$

Відповідно значення переміщень  $i$ -ї точки по осі  $OX$  та  $OY$  у разі, коли точка поверхні продукту потрапляє в зону оброблення валком уже безпосередньо на початку етапу, обчислюємо за виразами:

$$\Delta x'_{ni} = \Delta l' - 2R \sin(\Delta l' / (2R)) \cos(\arctg[(x_{ni} - x_{no}) / (H + R - y_{ni})] + \Delta l' / (2R));$$

$$\Delta y'_{ni} = \Delta 2R \sin(\Delta l' / (2R)) \sin(\arctg[(x_{ni} - x_{no}) / (H + R - y_{ni})] + \Delta l' / (2R)).$$

Отримані значення переміщень точок поверхні продукту, що підпадають під дію валка на цьому етапі, заносимо в окремий масив і разом з геометричною моделлю використовуємо як початкові дані для розрахунків на наступному етапі.

За базове математичне забезпечення при створенні *числової моделі* процесу профілювання взято програмну систему PLAST-2 [3].

Множина масивів значень напружень в усіх точках продукту та їх переміщень для кожного з етапів відображає реологічні процеси у продукті під час профілювання і дає змогу визначити раціональні параметри пристрою профілювання для цього продукту.

**Висновки.** В результаті проведених аналітичних досліджень розроблено математичну модель, що дає можливість обчислити значення напружень в усіх точках об'єму продукту та їх переміщення у процесі руху робочого органу.

Щоб визначити раціональні параметри пристроїв профілювання з урахуванням реологічних характе-

УДК 664.1.054

ристик конкретної продукції, потрібно провести чисельні експерименти з використанням створеної числової моделі та обробити отримані результати.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Штефан Є.В. Моделювання поведінки дисперсних систем у нерівноважних процесах харчових виробництв // Наук. пр. УДУХТ. — 2000. — № 8. — С. 63—66.
2. Штефан Є.В. Використання методів чисельного моделювання у проектуванні машин та апаратів харчових технологій // Проблеми та перспективи створення і впровадження нових ресурсо- та енергоощадних технологій, обладнання в галузях харчової і переробної промисловості: Матеріали Шостої міжнар. наук.-техн. конф., 19—21 жовтня 1999 р.: У 3 ч. — К.: УДУХТ, 2000. — Ч. I. — С. 63.
3. Штефан Є.В., Гайдуков В.В., Зеленюк О.І. Розробка універсальної обчислювальної системи для розрахунку процесів та апаратів харчової промисловості // Міжнар. наук.-техн. конф. "Розробка та впровадження нових технологій та обладнання у харчову та переробну галузі АПК": Тези доповідей. — К.: КТІХП, 1993. — 648 с.

Надійшла до редколегії 20.04.01 р.

Є.М. Бабко, к-т техн. наук  
В.Г. Мирончук, д-р техн. наук  
С.Ю. Лементар, к-т техн. наук

## ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ВВЕДЕНОЇ ЗЗОВНІ ВОДЯНОЇ ПАРИ НА ПРОЦЕС УВАРЮВАННЯ ЦУКРОВИХ УТФЕЛІВ

Для того щоб визначити особливості впливу введеної ззовні водяної пари на процес уварювання цукрових утфелів, використовували лабораторну дослідну установку (рис. 1), в процесі розроблення якої

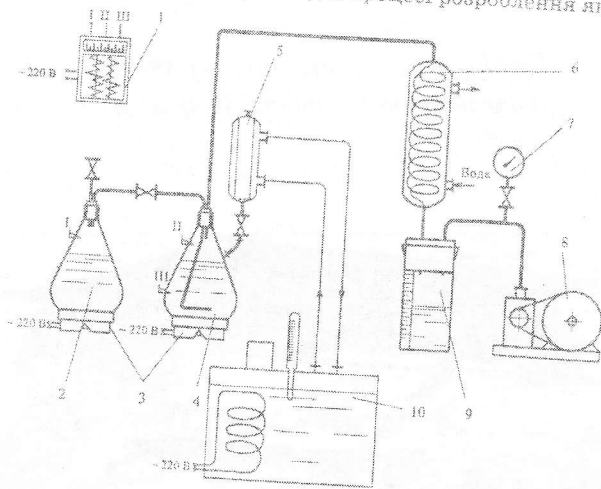


Рис. 1. Схема лабораторної дослідної установки:  
1 — потенціометр КСМ-2; 2 — парогенератор; 3 — нагрівальні елементи ЛТН2000; 4 — реактор з барботером; 5 — теплообмінник; 6 — конденсатор; 7 — вакуумметр; 8 — вакуум-насос; 9 — вимірник конденсату; 10 — термостат U10

було враховано фізичну та кінетичну подібність [1]. Фізична подібність забезпечувалась постійними початковими фізичними властивостями цукрового утфелю, а кінетична — тим, що швидкість елементарних актів взаємодії парової бульбашки з елементарними комірками утфелю не залежить від масштабу апарата при постійності технологічних та фізичних параметрів.

Проведено експериментальні дослідження з визначення впливу введеної ззовні водяної пари на інтенсивність процесу кристалізації цукрового утфелю в умовах кипіння та при наявності вакууму в системі.

Методика досліджень передбачала однакові початкові умови дослідів: концентрація чистого цукрового розчину в реакторі  $CP = 75\%$ , тиск у вакуумній системі  $4,2 \cdot 10^4$  Па, об'єм цукрового розчину 650 мл.

Вплив введеної ззовні в цукровий утфель водяної пари на характеристики цього утфелю визначали за інтенсивністю випарювання води з утфелю за умов кипіння при вакуумі, при введенні ззовні в штучний (моделльний) цукровий утфель водяної пари та без її введення.

Суть моделювання утфелю полягала в тому, що готували утфель, подібний до природного. Розрізняють моделювання математичне і фізичне. В цій роботі ми застосували принцип фізичного моделювання, зберігши фізичну природу речовини, що досліджується, — цукрового утфелю. При цьому, завдяки трьом теоремам подібності, спостерігаються: часова подібність, подібності фізичних величин, початкових умов, граничних умов.