

**ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

ЗБІРНИК ПРАЦЬ

XVII Міжнародної наукової конференції
**«УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ І
ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВИХ ТА
ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ»**

3-8 вересня 2018 р.



**ОДЕСА
2018**

Публікуються доповіді, представлені на XVII Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв» (3 – 8 вересня 2018 р.) і присвячені актуальним проблемам підвищення енергоефективності в сфері АПК, харчових та хімічних виробництвах, розробки та впровадження ресурсо-та енергоефективних технологій та обладнання, альтернативних джерел енергії.

Редакційна колегія:

Доктор техн. наук, професор
Кандидат техн. наук

О.Г. Бурдо
Ю.О. Левтринська

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ОРГКОМІТЕТ

Єгоров <i>Богдан Вікторович</i>	– голова, Одеська національна академія харчових технологій, ректор, д.т.н., професор
Бурдо <i>Олег Григорович</i>	– вчений секретар, Одеська національна академія харчових технологій, д.т.н., професор
Атаманюк <i>Володимир Михайлович</i>	– Національний університет «Львівська політехніка», д.т.н., професор
Васильєв <i>Леонард Леонідович</i>	– Інститут тепло- і масообміну ім. А.В. Ликова, Республіка Білорусь, д.т.н., професор
Гавва <i>Олександр Миколайович</i>	– Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
Гумницький <i>Ярослав Михайлович</i>	– Національний університет „Львівська політехніка”, д.т.н., професор
Долинський <i>Анатолій Андрійович</i>	– Інститут технічної теплофізики, почесний директор, д.т.н., академік НАН України
Зав’ялов <i>Владимир Леонідович</i>	– Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
Сукманов <i>Валерій Олександрович</i>	– Полтавський університет економіки і торгівлі, д.т.н., професор
Колтун <i>Павло Семенович</i>	– Technident Pty. Ltd., Australia, Dr.
Корнієнко <i>Ярослав Микитович</i>	– Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”, д.т.н., професор
Малежик <i>Іван Федорович</i>	– Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
Михайлов <i>Валерій Михайлович</i>	– Харківський державний університет харчування та торгівлі, д.т.н., професор
Паламарчук <i>Ігор Павлович</i>	– Національний університет біоресурсів та природокористування України, д.т.н., професор
Снежкін <i>Юрій Федорович</i>	– Інститут технічної теплофізики, директор, д.т.н., академік НАН України
Сорока <i>Петро Гнатович</i>	– Український державний хіміко-технологічний університет, д.т.н., почесний професор
Тасімов <i>Юрій Миколайович</i>	– Віце-президент союзу наукових та інженерних організацій України
Товажнянський <i>Леонід Леонідович</i>	– Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, д.т.н., професор, член-кореспондент НАН України
Ткаченко <i>Станіслав Йосифович</i>	– Вінницький національний технічний університет, г. Вінниця, д.т.н., професор
Черевко <i>Олександр Іванович</i>	– Харківський державний університет харчування та торгівлі, ректор, д.т.н., професор
Шит <i>Михайл Львович</i>	– Інститут енергетики Академії Наук Молдови, к.т.н., в.н.с.
Сухий <i>Константин Михайлович</i>	– ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», д. хім. н., професор

СЕКЦІЯ 2.

**МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ
ПЕРЕНОСУ.
ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ І СИСТЕМ**

7. Снежкин Ю.Ф., Михайлик В.А., Коринчевская Т.В., Воробьев Л.И., Декуша Л.В. Удельная теплоемкость и теплопроводность теплоаккумулирующих материалов на основе парафина, буроугольного и полиэтиленового восков. *Problemele energeticii regionale*. 2014. № 2 (25). С. 35–41.
8. Incropera F.P., DeWitt D.P. Fundamentals of heat and mass transfer, New York; Chichester: John Wiley & Sons, 2002. 944 p.
9. Bejan A. Heat Transfer. New York: John Wiley & Sons, 1993. 675 p.
10. Alawadhi E., Amon C. H. Pcm thermal control unit for portable electronic devices: experimental and numerical studies. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2003. Vol. 26. № 1. P. 116–125.

УДК 664.292:547.458.88:66.083.2

МОДЕЛЮВАННЯ РЕАКТОРА НАСИЧЕННЯ У ВИРОБНИЦТВІ ЦУКАТІВ

Гузьова І.О., доц., к.т.н.
Атаманюк В.М., проф., д.т.н.
НУ «Львівська політехніка», м.Львів

MODELING OF SATURATION REACTOR IN MANUFACTURE OF CANDIED FRUITS

I. Huzova, PhD in Technical Sciences, Associate Professor
V. Atamanyuk, Doctor of Technical Sciences, Professor
Lviv Polytechnic National University

Анотація. За допомогою універсальної моделюючої програми ChemCad змодельований ізотермічний реактор насичення частинок гарбуза сахарозою, який працює за умов постійної її концентрації в сиропі і одночасним збільшенням концентрації сахарози в цукатах. Отримані числові значення результату моделювання, розрахункові та графічні залежності насичення цукатів сахарозою та проаналізовані отримані результати.

Ключові слова: реактор для насичення, бульбашковий, ізотермічний, режим змішування, моделювання, цукат.

Abstract. The isothermal reactor is designed to saturate the pumpkin particles with sugar. The constant concentration of sucrose in the syrup and the increase in sucrose concentration in the candied fruits are present in the reactor. The reactor is modeled in the universal simulation program ChemCad. Numerical simulation values, graphical and computational relationships are obtained, the result is analyzed.

Key words: saturation reactor, bubble, isothermal, mixing mode, simulation, candied fruit.

Вступ. Найважливішим завданням організації харчування населення є раціональне використання місцевих ресурсів, зокрема овочів та фруктів, як основних джерел біологічно активних речовин. Виробництво цукатів з місцевої каротиновмісної сировини дає змогу розширити асортимент овочевих цукатів вітчизняного виробництва. На даний час в Україні технологічні лінії виробництва цукатів є енергозатратними, з громістким обладнанням та великими непродуктивними втратами сировини. Саме тому, розрахунок основних процесів у виробництві цукатів з використанням сучасних моделюючих програм, які б дали змогу отримати достовірні дані для проектування нового обладнання є актуальним питанням сьогодення.

Постановка проблеми. На даний час способи виробництва цукатів є дуже різноманітними та не завжди досконалими. Перевитрата сиропу, сульфатування, оброблення сировини консервантами перед процесом насичення цукром та антиоксидантами перед процесом сушіння є основними причинами шкідливого впливу готового продукту на організм людини, високої вартості цукатів та великих затрат на виробництво в цілому.

Універсальна моделююча програма ChemCad дає змогу провести моделювання процесу насичення плодів гарбуза цукром. Результати моделювання дають змогу організувати технологічний процес з мінімально можливими енергозатратами та максимально можливим збереженням поживних речовин в готовому продукті, в якому основним консервантом буде цукор.

Аналіз останніх публікацій.

В роботі [1] наведений класичний спосіб виробництва цукатів на прикладі яблучних плодів. Такий спосіб включає: миття, інспекцію, очищення, різання, бланшування 15хв, уварювання плодів до вмісту сухих речовин в сиропі 78 %, відділення сиропу, інспекцію, підсушування, глазурування, основне сушіння до вмісту сухих речовин 83 %, пакування.

Автор [2] відзначає, що втрати β -каротину під час виробництва цукатів знаходяться у діапазоні від 17 до 18% порівняно зі свіжими фруктами. Втрати відбуваються в основному через бланшування, тобто безпосередньо через контакт з теплою та киснем. Для різних сортів моркви та гарбуза [3], каротину втрачається в середньому на 10 % більше у виробництві з бланшуванням, ніж у виробництві без бланшування. Проте втрати можуть бути зменшені у випадку використання сиропу високої концентрації, оскільки він запобігає впливу кисню під час просочування та зневоднення. Цукор, глазуруваний на поверхні виробу, також запобігає втраті β -каротину під час зберігання в середовищі кисню (повітря).

Існують напівсухі або сухі способи одержання цукатів [4, 5]. В роботі [4] розглядається спосіб, де сформовані у вигляді кубиків чи циліндрів плоди гарбуза або моркви складають в ємність і засипають цукром, дають відстоятися до рясного виділення соку при кімнатній температурі (10 годин). При цьому ємність з напівфабрикатами знаходиться між мідними пластинами, до яких підведене електромагнітне поле від звукового генератора ЗГ-3. Далі ведуть варіння цукатів при температурі сиропу 60...70°C також в електромагнітному полі звукової частоти 20 кГц і вище протягом 2...3 годин до досягнення вмісту сухих речовин не менш 80% (масових). Сухий спосіб виробництва цукатів наведений в роботі [5]. Свіжі плоди сушать за температури 40-45°C до вмісту сухих речовин у плодовоовочевій сировині 35-50%. Потім підсушена сировина подрібнюється в дробарці до розміру часток 1,5-2мм. Після здрібнювання цукатова маса надходить у шнековий змішувач, де до неї додають цукрову пудру й інтенсивно перемішують 5-10 хвилин за температури 80°C до повного розчинення цукрової пудри. При цьому цукати одержують з вмістом сухих речовин 80-86%. Отримана суміш надходить у формувальну машину, де її формують у вигляді джгутів, охолоджують до температури 30°C та розрізають на бруски.

В роботі [6] наведений спосіб багаторазового використання цукрового сиропу для насичення плодів цукром. Порізані кусочки бланшують гострою парою протягом 8-15 хв (залежно від розміру кусочків і виду сировини). Готують цукровий сироп і занурюють у киплячий сироп цукати. Потім сироп зсіджують, нагрівають і знову заливають ним цукати. Таким чином повторюють 2-3 рази до повного насичення цукатів цукром.

Дуже часто під час виробництва цукатів, плоди фруктів та овочів проходять хімічну обробку антиоксидантами, консервантами, штучними барвниками або підлягають сульфатуванню [7]. Будь яка хімічна обробка негативно впливає на якість та харчову цінність продукту, потребує ретельної перевірки на шкідливість для організму та збільшує матеріальні затрати на виробництво.

З огляду джерел літератури можна зробити висновок, що основним недоліком у виробництві цукатів є перевитрата сиропу, втрата поживних речовин внаслідок бланшування, застосування хімічної обробки сировини. Такі фактори призводять як до зниження якості готового продукту так і до збільшення витрат на виробництво в цілому.

Мета та задачі досліджень. Метою роботи був комплексний підхід до моделювання процесів насичення цукатів в цукровому сиропі, який би дав змогу змодельовати реактор насичення з постійною концентрацією сахарози в сиропі і одночасним збільшенням концентрації сахарози в цукатах за умов ізотермічного режиму.

Для досягнення мети необхідно було вирішити наступні задачі:

1. Розробити математичне забезпечення, яке описує стаціонарний режим процесу насичення цукатів в цукровому сиропі з постійною концентрацією сахарози в ньому.
2. Сформулювати комп'ютерну модель Dynamic vessel в ChemCad.
3. Отримати графічні залежності стаціонарного режиму процесу насичення цукатів сахарозою та проаналізувати результат.

Виклад основного матеріалу. Авторами статті було запропоновано технологічну лінію виробництва цукатів на прикладі цукатів з гарбуза (рис.1). За допомогою конвеєрної стрічки 1 сировина завантажується у мийно-калібрувальний комплекс 2. Після очищення від бруду гарбуз потрапляє у машину для видалення насінного гнізда 3, після чого він надходить у машину для різання плодів на кубики 4. Нарізані плоди у реакторі 5 насичуються цукром за температури сиропу 100 °С. Насичені цукром плоди гарбуза завантажують у СВЧ-конвективну сушарку 6.

Готові цукати подають на фасувально-пакувальний автомат 7. Готові порції цукатів потрапляють в упаковки, які герметизуються після цього продукція складається у ящики.

В реакторі 5 за температури 100 °С сироп починає упарюватися. Під час упарювання цукрового сиропу концентрація сахарози в ньому зростає, рівень рідини в реакторі зменшується. В таких умовах проводити процес насичення цукатів недоцільно, тому що, можливе перенасичення цукату цукром, що недопустимо з точки зору смакових якостей та органолептичних властивостей. Також це призводить до недоцільної перевитрати цукру.

Також відомо [8], що інтенсифікації дифузійного процесу насичення цукатів сахарозою сприяють наступні умови проведення насичення:

- 1) Пористі тіла повинні мати ізотропну структуру;
- 2) Суміш частинок має бути монодисперсною;
- 3) Перемішування двофазної системи (пористі частинки – рідина) має бути інтенсивним;
- 4) Об'єм рідини повинен бути значно більшим за об'єм пор твердих частинок, щоби концентрація сахарози залишалась постійною.

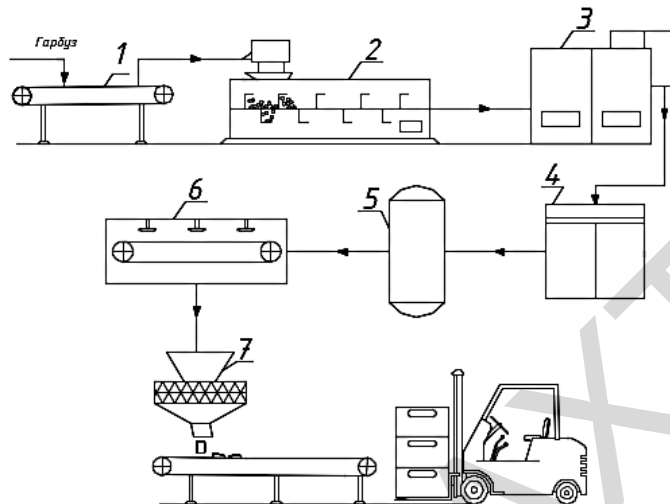


Рис.1. Технологічна схема виробництва цукатів

- 1 – конвеєрна стрічка, 2- мийно-калібрувальний комплекс, 3 – машина для видалення насінного гнізда, 4 - машина для різання плодів на кубики, 5 – реактор, 6 - СВЧ-конвективна сушарка, 7 - фасувально-пакувальний автомат.

Керуючись вищевказаними рекомендаціями, авторами статті змодельовано процес насичення частинок гарбуза коли концентрація сахарози в сиропі та рівень рідини в реакторі не змінювалися. Такий варіант можливий в тому випадку, коли кількість водяної пари, яка виходить з реактора під час упарювання сиропу буде компенсуватися водою, що виділяється з плодів гарбуза під час їх насичення сахарозою. Насичення буде відбуватися рівномірно і кінцевий продукт буде високої якості. За таких умов, єдиним консервантом буде сахароза.

Для моделювання цього процесу необхідно попередньо шляхом аналізу математичного опису знайти умови реалізації ізотермічного режиму, розробити математичне забезпечення для проектування реактора до якого включити: визначення постійного значення концентрації цукру в упареному сиропі в кінці процесу; час тривалості насичення цукатів в умовах стаціонарного режиму; витрату розчину; витрату пари; визначення конструктивних характеристик реактора, тобто діаметр висота та висота рідини;- отримання графічних залежностей які б показували сталість концентрації сиропу в часі і об'єму рідини в часі; отримання графічних залежностей зміни концентрації цукру в цукаті до досягнення рівноваги.

Проводимо чисельне моделювання в програмному забезпеченні ChemCad. Для розрахунку вибираємо термічну модель – ізотермічну, де ентальпія розраховується згідно моделі SRK [9], а гідродинамічну модель - модель інтенсивного змішування (бульбашкову).

В умовах інтенсивного змішування, рівняння матеріального балансу для проточного стаціонарного реактора має вигляд:

$$\frac{V}{V} (c_i - c_{i0}) - w_i = 0 \quad \text{або} \quad \frac{V}{v} = \tau = \frac{(c_i - c_{i0})}{w_i}$$

де V – об'єм реактора, м³; v – продуктивність, м³/с; c_i – біжуча концентрація; c_{i0} – початкова концентрація; w_i – швидкість зміни концентрації, л/с; τ – час насичення, с.

У стаціонарному режимі концентрація речовини в будь-який момент часу в будь-якій точці реактора є величиною сталою. Це означає, що для цього реактора, згідно обраної моделі, концентрація сахарози в сиропі має бути незмінною. Рівняння матеріального балансу можна використати не тільки для визначення середнього часу насичення τ і розмірів реактора V, але й для розв'язання зворотної задачі: визначення концентрації речовини на виході з реактора для реактора заданого об'єму і для заданої продуктивності процесу.

Комп'ютерна модель ізотермічного реактора з інтенсивним перемішуванням розроблена в універсальній моделюючій системі ChemCad зображена на рис 2.

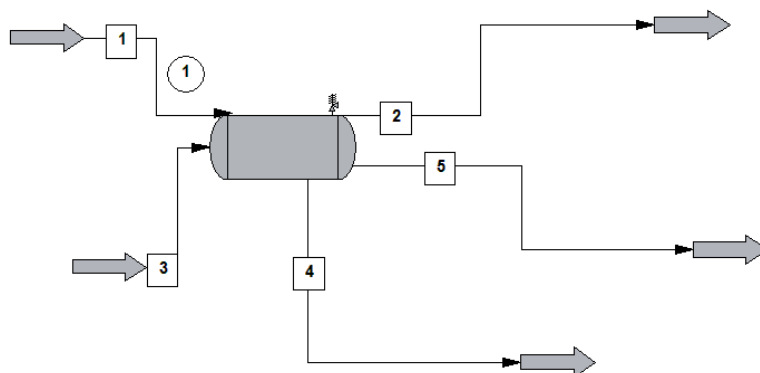


Рис 2. Комп'ютерна модель Dynamic vessel в ChemCad для стаціонарного режиму
1 – вхід сиропу; 2 – вихід пари; 3 – вхід плодів гарбуза кубічної форми ребром 10мм;
4 – вихід сиропу; 5 – вихід цукатів.

Для моделювання авторами статті були використані наступні вихідні дані:

тиск в реакторі - 1 атм, температура - 100°C;

потік №1 – концентрація цукру в сиропі 75% (мас.), витрата сиропу – 3.8 кг/хв; потік №2 – витрата плодів гарбуза – 1 кг/хв, концентрація цукру в плодах гарбуза 5% (мас.).

Нижче наведені результати моделювання Dynamic vessel в ChemCad (табл. 1 – 3)

Таблиця 1

Значення результатів моделювання потоків

Потік №	1	2	3	4	5
Температура, °С	100	100	100	100	100
Тиск, атм.	1.0200	1.0009	1.0200	1.0009	1.0009
Ентальпія, МДж / хв.	-33.747	-46.571	-15.117	-2.8793	-19.744
Пара	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
Загальна масова витрата, кг / хв.	3.800	3.500	1.000	0.350	2.400
Загальна об'ємна витрата чистої пари, м3 / год.	82.11	261.26	71.11	5.75	39.40
Матеріальний баланс в кг / хв.					
Вода	0.9500	3.5000	0.9500	0.0618	0.4237
Цукор	2.850	0.0002	0.0500	0.2882	1.976

Таблиця 2

Конструктивні характеристики реактора

Діаметр, м	0.4000
Довжина циліндра, м	1.0000
Початковий рівень рідини, м	0.4000
Температура, °С	100.000
Витрата пари, кг/хв	3.5000
Розрахований тиск, атм	1.0009
Максимальний рівень рідини, м	0.69221
Об'єм реактора, м ³	0.1424
Об'єм рідини, м ³	0.1087
Об'єм пари, м ³	0.0337
Загальна кількість теплоти, МДж	403.5954
Маса максимальної кількості рідини, кг	147.9755
Маса рідини, кг	50.0000
Розрахований максимальний тиск, атм	2.3620

Результати конструктивного та механічного розрахунків реактора та його складальних одиниць	
Швидкість рідини в реакторі, м/с	0.0785
Мінімальна висота роз'єднання, м	1.2192
Мінімальний рівень води до вхідного отвору, м	0.4572
Компенсатор, м	0.1524
Тиск конструкції, атм	1.2011
Допустимий тиск, атм	1021.7108
Тип днища	еліпсоїд
Добавка на корозію, м	0.0032
Густина реактора, кг/м ³	7833.4128
Надбавка у відсотках	20.0000
Внутрішній діаметр, м	0.4572
Швидкість пари, м/с	3.1020
Час напруженості, хв	1.0000
Час утримання, хв	5.0000
Довжина, м.	1.8299
Довжина / діаметр (співвідношення)	4.0023
Товщина обичайки, м	0.0063
Товщина днища, м	0.0063
Маса обичайки, кг	132.5524
Маса днища, кг	36.5853
Загальна маса (порожній), кг	169.1377
Загальний об'єм реактора, м ³	0.3254
Загальна маса (повна), кг	640.6564
Матеріал	високолегована сталь

В результаті моделювання реактора в універсальній моделюючій системі ChemCad, були отримані графічні залежності (рис. 3) зміни концентрації цукру в сиропі (крива 1) та в цукаті (крива 2). Також в результаті моделювання реактора, була отримана графічна залежність (рис. 4) зміни рівня рідини реактора в часі.

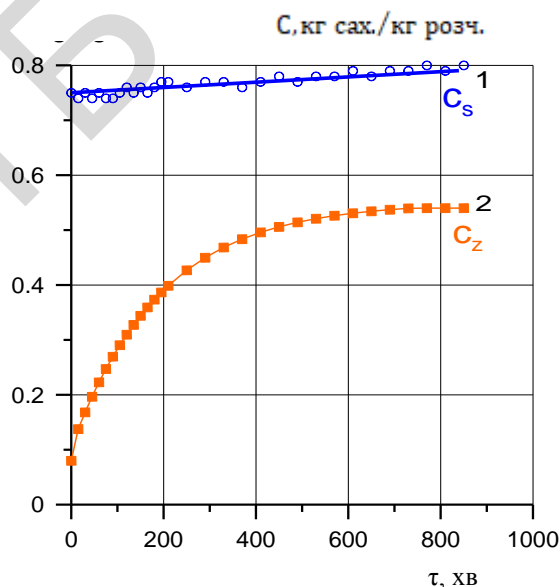


Рис. 3 Залежність зміни концентрації сахарози в сиропі (крива 1) та в цукаті (крива 2) в часі

Як бачимо з рис. 3, концентрація цукру в сиропі (крива 1) майже не змінюється (становить 0,75 – 0,8 кг сах./кг розч.). Результати представлені протягом 800 хвилин, далі відбувається кристалізація цукру. Концентрація цукру в цукаті (крива 2) зростає та після 700 хв цукат набуває рівноваги з цукровим сиропом. Як видно з рис 3. (крива 2), у змодельованому реакторі, цукат доцільно витримувати 400-500 хв до досягнення ним

концентрації 0,5 кг сах./кг розч. (50 % мас.). Протягом наступного часу, цукат насичується повільніше, води виділяється менше, її випаровування буде збільшене, рівень сиропу в реакторі почне падати.

На рис.4. представлена динаміка зміни рівня рідини в часі. Як видно з рис. 4., рівень рідини коливається в межах від 0,45м до 0,55м. Програма ChemCad видає такі результати за рахунок великої точності.

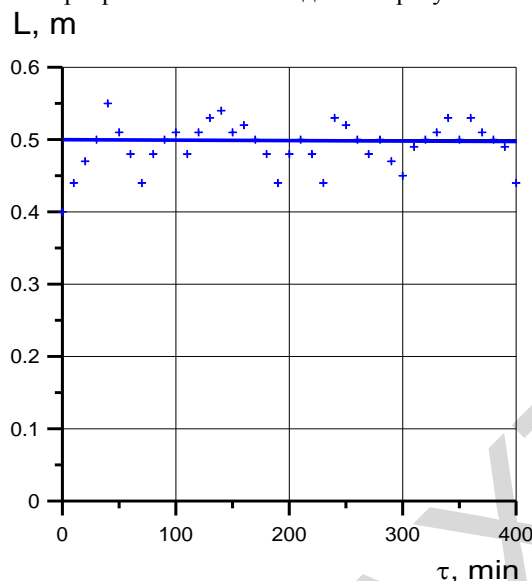


Рис.4. Динаміка зміни рівня рідини в часі.

Як бачимо з графіків, отриманих в результаті вирішення комп'ютерної моделі Dynamic vessel в ChemCad (рис. 2) під час упарювання цукрового сиропу концентрація сахарози та рівень рідини в реакторі не змінюється.

Висновки. Авторами статті на основі чисельної моделі Dynamic vessel визначені основні режимні технологічні параметри процесу насичення частинок гарбуза сахарозою, які дають змогу зберегти органолептичні властивості цукатів, що будуть довго зберігатися свої властивості і не пліснявіти. Також за умов стаціонарного ізотермічного режимів насичення зберігається сталою концентрація цукру в сиропі, що дає змогу використання такого сиропу для виробництва інших продуктів харчування. Результати моделювання дають змогу з високою точністю визначити всі параметри вхідних та вихідних потоків, а також конструктивні та механічні параметри реактора насичення та його складальних одиниць. Користуючись графічними залежностями, отриманими в результаті моделювання, з високою точністю можна визначити час насичення цукатів цукром, до концентрації, заданої технологічним регламентом.

Література

1. Спосіб виробництва яблучних цукатів. Малезик І. Ф., Дубковецький І. В., Бандуренко Г. М., Стрельченко Л. В. Деклараційний патент на корисну модель №103371. Україна. А23В 7/02 (2006.01), А23В 7/08 (2006.01). Опубл. 10.12.2015. Бюл. № 23.
2. Changes in b-Carotene and Vitamin A Contents of Vitamin A-rich Foods in Thailand During Preservation and Storage; V. Chavasit, R. Pisaphab, P. SungpuagU, S. Jittinandana, E. Wasantwisut. Vol. 67, Nr. 1, 2002— Journal of food science 375 – 379.
3. Степанова Н.Ю. Технологическая оценка производства цукатов из моркови, свёклы и тыквы / Н.Ю. Степанова // Процессы и аппараты пищевых производств. – 2015. –№ 2. – С. 175-176.
4. Спосіб виробництва цукатів з гарбуза та моркви. Захаренко В. О., Непочагих Т. А. Деклараційний патент на винахід № 2002107839 Україна А23L 1/064 (2006.01) А23G 3/48 (2006.01) А23G 3/50 (2006.01) Опубл. 16.06.2003, бюл. №6. 7.
5. Спосіб одержання цукатів. Черевко О. І., Михайлов В. М., Маяк В. І. Деклараційний патент на корисну модель № 6435. Україна. А23L 1/06 (2006.01), А23L 1/064 (2006.01), А23L 1/22 (2006.01). Опубл. 16.05.2005. Бюл. № 5.
6. Спосіб виробництва пектиновмісних цукатів. Крапивницька І. О.; Кушнір О. В.; Дзіс А. С.; Оболкіна В. І.; Гнатенко А. М.; Свінціцька А. І. Деклараційний патент на винахід № 98126381 Україна А23L 1/0524 (2006.01) Опубл. 15.12.2000, бюл. №7. 8.
7. Райхель Н.З., Алексеева Н.В., Джайшибеков Г.З., Кайпова Ж.Н. Способы производства цукатов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 2-2. – С. 168-171
8. V. Atamanuk, I. Huzova, Z. Gnativ. Study of diffusion processes in pumpkin particles during candied fruits production // Харчова наука і технологія – Volume 11 Issue 4/ 2017 – С. 21 – 28.

9. Neau E. The Soave, Twu and Boston–Mathias alpha functions in cubic equations of state. P. II. Modeling of thermodynamic properties of pure compounds / E. Neau, O. Hernandez-Garduza // Fluid phase equilibria. – 2009. – V. 276. – P. 156–164.

УДК 532.528

УНИФИЦИРОВАННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ КАВИТАЦИОННЫХ РЕАКТОРОВ

Иваницкий Г.К., д.т.н., с.н.с., Недбайло А.Е., к.т.н., Кониц А.В., к.т.н.,
Целень Б.Я. к.т.н., Гоженко Л.П., к.т.н.,
Институт технической теплофизики НАН Украины

MODELING CAVITATION REACTORS: A UNIFIED APPROACH

Ivanitsky G.K., DSc., Nedbaylo A.E., PhD., Konyk A.V., PhD,
Tcelen B.Ya., PhD., Gozhenko L.P., PhD.,
Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine

Аннотация. Гидродинамическая кавитация является одним из наиболее эффективных способов интенсификации многих технологических процессов, связанных с обработкой жидких продуктов. Изучение явлений кавитации с целью их рационального использования в технологиях требует единого подхода к анализу кавитационных механизмов и прогнозированию их действия на изучаемый объект, вне зависимости от типа кавитационного реактора. Установлено, что в настоящее время отсутствует четкая теоретическая база для понимания возможностей и ограничений используемых кавитационных устройств при решении конкретных задач. В работе обсуждаются пути построения общей математической модели кавитационных реакторов, которая базируется на результатах собственных комплексных исследований по изучению кавитационных процессов, а также на анализе публикаций по изучению механизмов кавитации. Предлагается универсальная математическая модель, которая с учетом основных факторов адекватно описывает динамику парогазовых пузырьков и пузырьков кластеров в широком интервале изменения режимных параметров и без использования ограничивающих допущений. В рамках модели проанализированы такие факторы, как температура и газосодержание жидкости, которые влияют на эффективность кавитационного воздействия. Обсуждаются пути дальнейшей модификации этих моделей применительно к задаче оптимизации работы кавитационных реакторов.

Abstract. Cavitation is known to be one of the most effective method intensification of technological processes related to treatment of liquid products. Various cavitation methods with using various types of hydrodynamic cavitation techniques have presently become remarkably widespread for enhancement of hydrodynamic, chemical, biochemical processes, as well as heat and mass transfer in different production technologies. It is established that, at the present time, there is no clear theoretical basis for understanding the possibilities and limitations of the cavitation devices used in solving specific problems. It is shown that the simulation of the operation of hydrodynamic reactors is based, for the present, on empirical approaches. Obviously, the study of the phenomena of cavitation for the purpose of their rational and effective use in industrial technologies requires a unified approach to the analysis of cavitation mechanisms and the prediction of their action on the object under study, regardless of the type of cavitation reactor. The present work highlights the different aspects of hydrodynamic cavitation including the basic mechanisms, as well as bubble dynamics analysis with recommendations for optimum operating parameters and reactor designs. In this paper we consider ways of developing a general mathematical model of cavitation reactors, which is based both on the results of our own comprehensive research on cavitation methods, and on the analysis of publications on theoretical studies of cavitation mechanisms. Universal mathematical models are proposed that from common thermodynamic positions and with maximum consideration of the determining factors adequately describe the dynamics of single bubbles and bubble clusters in a wide range of regime parameters change, and without using limiting assumptions. Within the framework of the model, a number of factors are considered, such as temperature and gas content of the liquid and some physical mechanisms, which affect the effectiveness of the cavitation effect. The ways of further modification of these models are discussed with regard to the problem of optimizing cavitation reactor operation.

Ключевые слова: гидродинамическая кавитация, математическая модель, паровой пузырек, кластер.

Key words: hydrodynamic cavitation, mathematical model, gas-vapor bubble, cavitation cluster.

Формулировка проблемы. Кавитация сегодня является одним из наиболее действенных способов интенсификации технологических процессов, связанных с обработкой жидких продуктов. Кавитационные методы широко используются в различных промышленных технологиях, прежде всего, в пищевой промышленности, а также в системах водоподготовки и очистки сточных вод. [1-3].

На практике кавитационные механизмы инициируют путем акустического воздействия на жидкость с использованием различных ультразвуковых излучателей [2,3] или за счет создания оптимальных

МОДЕЛЮВАННЯ РЕАКТОРА НАСИЧЕННЯ У ВИРОБНИЦТВІ ЦУКАТІВ	
Гузьова І.О., Атаманюк В.М.	78
УНИФИЦИРОВАННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ КАВИТАЦИОННЫХ РЕАКТОРОВ	
Иваницкий Г.К., Недбайло А.Е., Коник А.В., Целень Б.Я., Гоженко Л.П.	84
МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У АПАРАТІ З ПНЕВМАТИЧНИМ ПЕРЕМІШУВАННЯМ	
Данилюк О. М., Атаманюк В.М., Гумницький Я.М.	89
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ УВАРЮВАННЯ СОКУ ТА ЙОГО ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	
Маяк О.А., Сардаров А.М., Костенко С.М., Гриценко О.Ю., Шершньов Г.Г.	94
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СУШКИ И ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ БИОМАССЫ	
Сороковая Н.Н., Коринчук Д.Н.	99

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ. РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТА ЕКОЛОГІЧНО-БЕЗПЕЧНІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

КОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ АДСОРБЦІЙНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ ГЕЛПОУСТАНОВОК	
Беляновська О.А., Пустовой Г. М., Суха І.В., Губинський М.В., Литовченко Р.Д., Сухий К.М.	106
ЗАСТОСУВАННЯ НВЧ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПРИ ВИЛУЧЕННІ БІЛКІВ ЗІ СТІЧНИХ ВОД ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ	
Сабадаш В.В., Гумницький Я.М.	111
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУШІННЯ НАСІННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР ІЗ ТЕПЛОВИМИ НАСОСАМИ	
Пазюк В.М.	116
ИНТЕГРАЦИЯ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА СОЛНЕЧНОЙ УСТАНОВКИ	
Селихов Ю.А., Коцаренко В.А.	120
ВИКОРИСТАННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБАВОК У ПРОЦЕСАХ КОМПОСТУВАННЯ ХАРЧОВОЇ СКЛАДОВОЇ ТВЕРДИХ МУНІЦИПАЛЬНИХ ВІДХОДІВ	
Крусір Г.В., Сагдєєва О.А., Чернишова О.О., Мадані М.М., Гаркович О.Л.	125
ПРО ЗБЕРЕЖЕННЯ ХАРЧОВОЇ ЦІННОСТІ ТА ЗАОЩАДЖЕННЯ РЕСУРСІВ ПРИ ПЕРЕРОБЦІ ТОМАТІВ	
Гаврилов О.В.	131
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ РЕЖИМИ РОБОТИ БАРАБАННОЇ СУШАРКИ КОМПЛЕКСУ ВИРОБНИЦТВА КОМПОЗИЦІЙНОГО БІОПАЛИВА	
Коринчук Д. М., Снєжкін Ю.Ф., Бунецький В. О.	134
ТЕХНОЛОГІЧНІ ОБ'ЄКТИ УТИЛІЗАЦІЇ-МОДИФІКАЦІЇ ПОЛІМЕРНОЇ ТАРИ ТА ПАКУВАННЯ	
Бухкало С.І.	140
ЗАСТОСУВАННЯ СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ РІЗНОГО ТИПУ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ГОТЕЛЬНО-РЕСТОРАННИХ КОМПЛЕКСІВ	
Ощипок І.М.	143

ІННОВАЦІЙНЕ ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВИХ, ФАРМАЦЕВТИЧНИХ, ХІМІЧНИХ ТА ПАРФУМЕРНИХ ВИРОБНИЦТВ

АНАЛІЗ СИРОВИНИ, ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ХАРЧОВИХ ПОРОШКІВ	
Потапов В.О., Євлаш В.В., Педорич І.П.	149
ІНФРАЧЕРВОНЕ СУШІННЯ ЗЕРНОВОЇ ПРОДУКЦІЇ З ВІБРОХВИЛЬОВИМ КОНВЕСРОМ. ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ	
Паламарчук І.П., Кюрчев С.В., Верхоланцева В.О.	153
РАЦІОНАЛЬНЕ КОМПОНУВАННЯ ФАЗНИХ РОЗДІЛЮВАЧІВ З МОДУЛЬНИМИ СЕПАРАЦІЙНИМИ ПРИСТРОЯМИ	