

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В СУШИЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

В.В. Шутюк, кандидат технічних наук

С.М. Василенко, доктор технічних наук

О.С. Бессараб, кандидат технічних наук

Національний університет харчових технологій

В.П. Василюк, кандидат технічних наук

***Національний університет біоресурсів і
природокористування України***

Наведено причини зростаючого інтересу до процесів сушіння, а також деякі аспекти взаємодії промисловості й наукових університетських колективів у втіленні та застосуванні. Розглядаються тенденції дослідження процесів сушіння, що з'являються на стику різних галузей науки з використанням поступальних можливостей технічного процесу.

Сушіння, інтенсивність, ефективність, енергетичні аспекти, сухі харчові продукти.

Вступ. Головна мета сушіння в харчовій промисловості – збереження висушеного продукту. Зниження вологовмісту запобігає або значно гальмує перебіг мікробних і ферментативних реакцій. Проте сушіння негативно позначається на хімічному складі продукту, матеріальній й харчовій цінності харчових продуктів. Удосконалення технології сушіння передбачає:

- підвищення техніко-економічних показників (зниження споживання енергії, збільшення продуктивності процесу, зменшення розмірів устаткування, полегшення керування процесом);
- врахування екологічних аспектів (мінімізація споживання енергії, зменшення шкідливих викидів у атмосферу, підвищення безпеки виробництва);
- поліпшення якості продукту (однорідність сушіння, мінімізація хімічних змін продукту, збереження харчової цінності).

Сушіння є одним із найбільш складних процесів оброблення продуктів і найменш досліджених з огляду на труднощі створення математичної моделі одночасного перенесення теплових потоків, сухих речовин, вологи.

Зростаючий інтерес до сушіння останнім часом спостерігається у країнах, що розвиваються на фоні відносно стабільного на інших

континентах. Про це свідчить, зокрема, аналіз кількості публікацій з теми сушіння у матеріалах міжнародних симпозиумів у Нідерландах і Китаї (2002 р.), Бразилії (2004 р.), Угорщині (2006 р.) [4, 6, 8, 12, 14]. Публікації в основному присвячені таким напрямам, %: харчові продукти та продукція сільського господарства 30–35; обладнання: проектування, оптимізація, керування 20–25; основні принципи сушіння, моделювання, виробництво 20–25; інші 15–30.

Наведений аналіз свідчить, що продукція харчової промисловості й сільського господарства залишається домінуючою у дослідженні процесу сушіння – понад 30 % публікацій присвячено цьому питанню. Така тенденція простежувалася і на симпозиумах з сушіння 2008 р. в Індії та 2010 р. в ФРН.

Зростаючий інтерес до процесу сушіння засвідчує кількість отриманих у США в останні два десятиліття патентів з сушіння до 240 на рік, тоді як сумарна кількість патентів з кристалізацією, випарювання, адсорбції, дистиляції й мембранного розділення не досягає 200 [5]. Яскравим прикладом успішної співпраці наукових інституцій з промисловістю стала спільна діяльність 14 великих Європейських хімічних компаній (BASF, Bayer, BP Amoco, DOW, Rhone-Poulenc, DuPont, Elf Atochem, Hoechst AG, ICI, Norsk Hydro, Novo Nordisk, DSM і Astra Zeneca), з понад 20 європейськими університетами за такими напрямками, як комбіноване сушіння й гранулювання, розпилювальне й контактне сушіння, математичне моделювання, стандартизація випробувальних методів і експертних систем з вибору сушарок [13].

До інтенсивніших досліджень заощадження потенційної енергії в сушильних технологіях [7] спонукають світова економічна криза та постійне зростання вартості енергоресурсів. Увага до проблем стимулюється зростаючими вимогами законодавства щодо забруднення навколишнього середовища, умов та якості праці, а також глобальною загрозою негативного впливу вуглекислоти та інших викидів на фоні зростання світового енергоспоживання та прогнозів виробництва енергоресурсів (табл. 1).

1. Виробництво світових енергетичних ресурсів.

| Енергетичний ресурс | Виробництво у році, % | | | |
|------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|
| | 2000 | 2010 | 2020 | 2030 |
| Еквівалент 1т. нафти* | 9,179 | 11,132 | 13,167 | 15,267 |
| Нафта | 39 | 38 | 38 | 38 |
| Вугілля | 26 | 24 | 24 | 24 |
| Природний газ | 23 | 25 | 27 | 28 |
| Ядерна енергія | 7 | 7 | 6 | 5 |
| Відновлювальна енергія | 3 | 3 | 4 | 4 |
| Гідравлічна енергія | 3 | 3 | 3 | 2 |

* млрд. т.

Промислове енергоспоживання для теплового зневоднення іноді досягає понад 12 % загального промислового споживання [15]. Високе споживання енергії в процесі сушіння, ставить проблему енергоощадних технологій сушіння в число першочергових.

З огляду на аграрне спрямування економіки України та у країні спад промислового виробництва у світі розвиток сушильних технологій є привабливим і перспективним. Так, незважаючи на спад загального виробництва молока під час економічної кризи, Україні в останніми роками виробляється понад 10 млн. т сирого молока, що на 26 % більше внутрішньої потреби (річна потреба в рідкому молоці становить понад 2,1 млн. т). Виробництво сухого знежиреного і сухого незбираного молока більш ніж удвічі перевищило внутрішні потреби країни [2]. Такі показники дають можливість Україні посідати достатньо високу позицію в рейтингу основних світових експортерів молочної продукції (табл. 2).

2. Основні країни – виробники сухого молока, тис.т.

| Країна | Сухе молоко | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------------|------|--------|------|---------|------|-------------|------|--------|------|---------|------|
| | знежирене | | | | | | незбиране | | | | | |
| | Виробництво | | Імпорт | | Експорт | | Виробництво | | Імпорт | | Експорт | |
| | 2010 | 2011 | 2010 | 2011 | 2010 | 2011 | 2010 | 2011 | 2010 | 2011 | 2010 | 2011 |
| Австралія | 113 | 109 | 5 | 6 | 160 | 175 | 222 | 230 | 15 | 15 | 137 | 145 |
| Аргентина | 50 | 55 | | | 20 | 19 | 38 | 37 | | | 170 | 200 |
| Бразилія | 80 | 80 | 10 | 10 | 3 | 5 | 130 | 134 | 37 | 39 | 6 | 10 |
| ЄС | 1975 | 2000 | 4 | 5 | 378 | 450 | 980 | 1010 | 2 | 2 | 444 | 430 |
| Індія | 4325 | 4325 | | | 10 | 15 | 375 | 410 | | | | |
| Китай | | | 91 | 100 | | | 55 | 56 | 320 | 430 | 3 | 3 |
| Мексика | 175 | 187 | 155 | 155 | | | 13 | 13 | 15 | 20 | 7 | 7 |
| Нова Зеландія | 500 | 454 | 3 | 3 | 344 | 375 | 344 | 375 | | | 948 | 1000 |
| Росія | 252 | 195 | 180 | 185 | | | 70 | 70 | 55 | 50 | | |
| США | 718 | 800 | | | 384 | 414 | 824 | 885 | 7 | 5 | 10 | 8 |

Важливою галуззю збільшення обсягів виробництва та розширення асортименту сушених продуктів є консервна промисловість. Оскільки в Україну екпортується багато різноманітних сушених продуктів, питання власного виробництва стоїть надзвичайно гостро. Зрозуміло, що виробництво і скорочення імпорту екзотичних для нашого клімату сухих продуктів економічно недоцільно. Імпорт же сушених овочів, грибів і сухофруктів потребує істотного зменшення. Приміром, РФ екпортує в різні країни включно з Україною (табл. 3) сушеної продукції на суму близько 2 млн. доларів [1].

Способи інтенсифікації процесу сушіння. Зменшення капітальних і експлуатаційних витрат сушарок залежить від можливості реалізації збільшення швидкості сушіння за умови дотриманні вимог якості продукту. Високі швидкості сушіння дають змогу зменшити розміри як самої сушарки, так допоміжного

устаткування. Це, в свою чергу, сприяє зниженню експлуатаційних витрат. Як відомо, сировина для промислового сушіння характеризується поверхневою і внутрішньою вологістю. Інтенсивність сушіння під час вилучення поверхневої вологи залежить тільки від значення зовнішньої теплопередачі і коефіцієнта масоперенесення, оскільки опір масообміну, знаходиться поза висушеним матеріалом. Отже, збільшення зовнішньої конвективної теплопередачі й коефіцієнта масоперенесення, збільшення швидкості, температури сушильного агента або відносної вологості відпрацьованого сушильного агента приведе до збільшення швидкості сушіння у звичайній конвективній сушарці. Природно, є винятки, наприклад, інтенсивне сушіння може сприяти поверхневому зміцненню і зниженню швидкості сушіння. Це також може спричинити небажанні крайні стискання і розтріскування продукції. Отже, збільшення турбулентності сушильного агента, механічна вібрація, або коливання потоку призводять до вищих швидкостей сушіння. Ультразвуковий або звуковий вплив збільшують швидкість сушіння, але механізми інтенсифікації ускладнюються.

3. Експорт РФ сушених овочів і фруктів по країнах світу у 2007–2011 рр., тис.дол.

| Країна | Рік | | | | |
|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 |
| Азербайджан | 11,1 | 13,7 | 13,1 | 36,9 | 26,0 |
| Німеччина | 324,2 | 454,1 | 764,8 | 281,1 | 340,5 |
| Італія | 478,3 | 208,5 | 270,0 | 88,7 | 107,5 |
| Казахстан | 381,8 | 689,8 | 451,7 | 343,3 | 349,2 |
| Монголія | 134,2 | 176,8 | 84,6 | 222,7 | 204,6 |
| США | 69,3 | 13,1 | 26,4 | 11,9 | 8,3 |
| Таджикистан | - | 12,2 | 0,5 | 119,3 | 53,4 |
| Україна | 746,1 | 682,8 | 331,4 | 392,2 | 457,5 |
| Франція | 220,3 | 75,5 | 66,6 | 44,3 | 53,7 |
| Інші країни | 1719 | 2195,9 | 1760,8 | 1356,1 | 1257,5 |
| Всі країни | 2754,7 | 2979,5 | 2185,7 | 1923,8 | 1830,4 |

У разі використання перегрітої пари при температурі інверсії як сушильного агента швидкість сушіння вища порівняно з гарячим повітрям, але при температурах, нижчих критичної, навпаки – нижча. Ультразвуковий вплив може викликати високочастотний тиск пульсації з наступною кавітацією. Почергова генерація областей високого та низького тисків викликає швидкі пароутворення й перенесення рідини через матеріал. Використання електромагнітного поля може підігріти об'ємно полярну рідину, яка буде випарена. Це фактично усуває опір переданню теплоти в матеріал. Перенесення вологи через матеріал інтенсифікується до деякої міри за рахунок збільшення рухливості вологи при більш

високих температурах. Описаний механізм збільшення швидкості сушіння спостерігається у разі сушіння перегрітою парою.

Інший можливий спосіб посилення інтенсивності сушіння включає в себе збільшення ефективних площ поверхні поділу для теплопередачі і масообміну. Приміром, в набігаючій конфігурації потоку зона зіткнення, генерована зіткненням протидіючих потоків газової матеріальної точки, є одним з факторів високої інтенсивності турбулентності. Якщо пастоподібний або подібний до мулу матеріал розсіюється, область турбулентності має тенденцію до збільшення площі поверхні поділу сушіння. Інтенсивність сушіння далі посилюється обернено пропорційно розміру матеріальної частки або розміру краплі за інших рівних умов. Коли це допустимо, використання механічних диспергуючих агентів або мішалок в межах сушарок сприяє збільшенню швидкості сушіння. Також відомо, що теплопередача від однієї матеріальної частки до іншої ефективніша (треба забезпечити достатню поверхню зіткнення) ніж між газом і матеріальними частками. Змішуванням гарячих інертних матеріальних часток з вологими матеріальними точками веде до дуже високої інтенсивності сушіння. Можливе таке використання матеріальних точок адсорбуючої речовини, коли теплоносій також ефективно посилює потенціал масообміну, знижуючи одночасно вологість газу. Більшість наведених варіантів інтенсифікації сушіння перевірені [9]. Проте не всі ідеї можуть бути застосовані нині, оскільки більшість із них пов'язана зі змінами якості виробів. До того ж впровадження нових технологій призводить до ускладнення устаткування, вимагаючи попереднього техніко-економічного обґрунтування перед промисловим застосуванням. Прикладні області використання деяких з описаних способів підвищення інтенсифікації сушіння наведено нижче.

| | Способи інтенсифікації сушіння |
|------------------------------------|--|
| Період сушіння постійної швидкості | підвищення турбулентності вільного потоку; застосування коливання, вібрації; використання двофазного сушильного агенту; застосування акустичного поля високого звукового рівня тиску; застосування ультразвукової області; |
| падаючої швидкості | високочастотне нагрівання; електрокінетичні явища; використання синергетичних ефектів; |
| постійної й падаючої швидкості | збільшення площі поверхні поділу для теплопередачі і масообміну; використання високочастотного нагрівання; сушіння перегрітою парою. |

Використання багатоступінчастих сушарок. За наявності у матеріалі поверхневої і внутрішньої вологи для ефективного ведення процесу сушіння режим сушіння і навіть тип сушарки в деяких випадках мають відрізнятися, щоб вилучити ці два різні типи вологи. З економічних причин переважно вибирають єдину сушилню установку для всього процесу сушіння, змінюючи режим просторово для сушарок безперервних і тимчасово – для сушарок періодичної дії. Зонування сушарок по їхній довжини зазвичай використовується в конвеєрних і тунельних установках, для гарантування оптимального режиму сушіння термолабільних матеріалів при інтенсифікації процесу сушіння [3]. Під час падаючої швидкості сушіння режим має проходити повільніше, щоб забезпечити температуру матеріалу, нижчу від критичної температури, вище за яку якість матеріалу значно погіршується (змінюється колір, текстура тощо). Але для великих продуктивностей і для деяких матеріалів рентабельне використання двох різних типів сушарок.

Вилучення поверхневої вологи – взагалі більш інтенсивніший процес, який вимагає коротшого часу витримання продукту в сушарці, тоді як видалення внутрішньої вологи – процес повільніший, що потребує довшого часу витримання і, отже, більшої за розміром сушарки. Для вилучення в основному поверхневої вологи призначені сушарки з киплячим шаром, валкові, розпилувальні тощо. Для тривалішого перебування сировини використовуються сушарки циркуляційні, тунельні, стрічкові тощо.

Для успішного використання багатоступінчастого сушіння початковий матеріал повинен мати обидва типи вологи у достатній кількості, щоб тривалість процесу двоступеневого сушіння стала достатньою для промислової реалізації. У деяких випадках перший ступінь може використовуватися з метою вилучення поверхневої вологи з метою зменшення адгезійних властивостей продукту, достатніх для подальшого сушіння, наприклад в киплячому шарі [10]. Приміром, у виробництві кави розпилувальне сушіння має супроводжуватись сушінням у киплячому шарі. Відповідно процес розпилування вимагає великої камери змішування, а висушуваний продукт тонкого подрібнення. Такі гібридні сушарки рентабельніші порівняно зі звичайними. Іноді тривалий час перебування у двоступінчатій сушарці потрібний для структурних змін або перебігу хімічних реакцій, набагато повільніших за процес сушіння. Наприклад, кристалізація поліетилентерефталату (ПЕТФ) – смола полімеризується у високій колоні, тоді як початкова вологість вилучається в малій сушарці з киплячим шаром.

У табл. 4 наведено приклади промислового використання двоступінчастих технологій сушіння [11]. Слід зауважити, що

багатоступінчасті сушарки – це тільки інтелектуальна комбінація відомих технологій.

4. Деякі приклади двоступінчастого сушіння.

| Ступінь сушіння | | Переваги | Використання |
|---------------------------------------|--|---|---|
| перша | друга | | |
| Розпилювальна сушіння (τ 0...10 с) | Сушіння у киплячому шарі (τ 0...10 хв) | Використання повного розміру сушарки – зумовлення кращих техніко-економічних характеристик | Розпилювальна сушарка з флюїдизацією (Niro) |
| Розпилювальна сушіння (τ 0...10 с) | Сушіння у вібраційному розподільвачі (τ 0...10 хв) | Продукт за потреби гранульований (придатний для швидкого приготування) | Рідкі розчини (кава, молоко і мийні засоби) |
| Розпилювальна сушіння (τ 0...10 с) | Сушіння у стрічковій сушарці з циркуляцією та зонуванням (τ 0...10 хв) | Те саме | Суші кава, молоко тощо |
| Розпилювальна сушіння (τ 0...10 с) | Сушіння у стрічковій сушарці з циркуляцією та зонуванням (τ 0...10 хв) | Сушіння в помірних умовах для термолабільних матеріалів і досить липких твердих матеріалів з високим вмістом цукру | Сушіння соків |
| Аерофонтанна сушіння (τ 0...10 с) | Сушіння у киплячому шарі (τ 0...10 хв) | Миттєве вилучення поверхневої вологи в аерофонтанній сушарці; внутрішньої вологи – тривале перебування у сушарці з киплячим шаром | Деревина або целюлоза |
| Сушіння у киплячому шарі (τ 0...1 хв) | Колонній/ фільтраційній сушарці (τ 0...10 год) | Миттєве вилучення поверхневої вологи в сушарці з киплячим шаром, досушування – у колонній сушарці | Полімери |
| Валкова сушарка (τ 0...0,1 с) | Ударне сушіння (τ 0...0,1 с) | | Сушіння цигаркового паперу винятково у двоступінчатій сушарці; один і той же час перебування на кожній стадії сушіння |

Проте вона, як правило, пропонує унікальні переваги, що не узгоджуються зі складовими технологіями (табл. 5).

5. Порівняльний аналіз використання багатоступінчастих сушарок в молочній промисловості.

| Сушарка | Економія енергії, % | Характеристики порошку |
|---|---------------------|--|
| Одноступінчаста: розпилювальна | — | Неагломерований (~0,2 мм); широкий розподіл по розміру; значна фракція дрібного |
| Двоступінчаста: розпилювальна із псевдозрідженим шаром | ~ 18 | Агломерований з обробленням для швидкого приготування; мала фракція дрібного; відсутнє пилоутворення |
| Триступінчаста: розпилювальна з киплячим шаром та із зовнішнім киплячим шаром | ~ 30 | Агломерований і гранульований; добра розчинність; незначна розбіжність по розміру |

Нові перспективні технології, впроваджувані останнім часом, включають в себе комбінації традиційних способів сушіння. Зокрема, теплові насоси, багатоступінчасті способи сушіння, керування виробництвом на основі оптимальних моделей керування застосовують досить широко. При державному економічному стимулюванні використання поновлюваних джерел енергії для процесів сушіння може бути рентабельним, особливо в умовах постійного зростання вартості палива.

Висновки

Стаття відображає сучасний стан та зростаюче значення процесу сушіння у світових наукових дослідженнях, висвітлює перспективи виробництва сухих харчових продуктів в Україні та світі.

Тенденції розвитку сушильних технологій полягають в інтенсифікації процесу сушіння за рахунок: збільшення площі поверхні поділу для теплопередачі й масообміну; використання високочастотного нагрівання; сушіння перегрітою парою; підвищення турбулентності вільного потоку; застосування: коливання і вібрації, двофазного сушильного агента, акустичного поля високого звукового рівня тиску, ультразвукової області, високочастотного нагрівання, електрокінетичних явищ, синергетичних ефектів, багатоступінчастого процесу сушіння.

Використання сучасних тенденцій інтенсифікації сушіння вимагає інтегрованого системного підходу до багатопланового і мультидисциплінарного моделювання одночасних процесів перенесення імпульсу, енергії і маси. Також дослідження потребуватимуть активнішої співпраці дослідників для досягнення ефективнішого внеску у фундаментальну науку та промислове впровадження. Перспективні розробки вимагають уваги до екологічної безпечності і енергоощадності, з огляду на постійне збільшення екологічних і економічних вимог, за умови високої якості готової продукції.

Список літератури

1. *Анализ рынка сушеных овощей и фруктов в России в 2007–2011 гг, прогноз на 2012-2016 гг.* – BusinesStat. – 65 с.
2. *Аналитический обзор рынка: Молоко и молочная продукция.* – М.: ФГБУ «СпецЦентрУчет в АПК», 2011. – 26 с.
3. *Advanced drying technologies/ Tadeusz Kudra, Arun S. Mujumdar.* – CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, 2009. – 455 p.
4. *Coumans J.* Some impressions from IDS'96. – *Drying Technology*, 1997. – 15 (3,4). – P. 1243–1250.
5. *Devahastin S.* Conference report. IDS'2002, Beijing. – China, Personal Communication, 27–30 August 2002.
6. *Fernandez M.A., Arlabosse P., Descoins N.* Thermally-assisted mechanical dewatering: State-of the-art and new developments. PRES'05. – Palermo, Sicily, Italy, 22–25 May 2005.
7. *Itaya Y., Mori S.* Recent R&D on drying technology in Japan. In Proceedings of XI Polish Drying Symposium.– Poznan, Poland, 13–16 September, 2005.
8. *Keey R.* Conference report on the 12th IDS'2000. – *Drying Technology*, 2001. – 19 (1).– P. 237.
9. *Mujumdar A. S., Passos M. L.* 2000. Drying: Innovative technologies and trends in research and development. In: *Developments in Drying.* A. S. Mujumdar and S. Suvachittanont (Eds.): Kasetsart University Press, Bangkok: Thailand.– P. 235–268.
10. *Mujumdar A. S., Passos M. L.* Developments in Drying. Kasetsart University Press: Bangkok, Thailand, 2000. – P. 235–268.
11. *Mujumdar A. S.* Research and Development in Drying: Recent Trends and Future Prospects. *Drying Technology*, 2004. – Vol. 22, Nos. 1&2. – P. 1–26.
12. *Pakowski Z.* Impressions of IDS'98. *Drying Technology*, 1999. – 17 (6). – P. 1247–1253.
13. *Slangen H.J.M.* The need for fundamental research on drying as perceived by the European chemical industry. – *Drying Technology*, 2000. – 18 (7). – P. 1601.
14. *Strumillo C.* Perspectives on Developments in Drying. – *Drying Technology*, 2006. – 24. – P. 1059–1068.
15. *Strumillo C., Jones P.L., Zylla R.* Energy aspects in drying. In Handbook of Industrial Drying, 2nd Ed; *Mujumdar A.S.*, Ed. – Marcel Dekker, Inc.: New York, 1995. – P. 1241.

Приведены причины растущего интереса к процессам сушки, а также некоторые аспекты взаимодействия промышленности и научных университетских коллективов в воплощении и применении. Рассматриваются тенденции исследования процессов сушки, появляющиеся на стыке различных отраслей науки с использованием поступательных возможностей технического процесса.

Сушка, интензивность, эфффективність, энергетические аспекты, сухие пищевые продукты.

Reasons over of growing interest are brought in processes of drying and also some aspects of co-operation of industry and scientific university collectives in embodiment and application. The tendencies of

research of processes of drying that appear on joint of different areas of science with use of forward possibilities of technical process are examined.

Drying, intensity, efficiency, power aspects, dry food foods.

УДК 621.87

ОПТИМІЗАЦІЯ РИВКОВОГО РЕЖИМУ РУХУ МЕХАНІЗМУ ПОВОРОТУ СТІЛОВОГО КРАНА

***В.С. Ловейкін, доктор технічних наук
В.В. Мельніченко, аспірант****

В статті розглянуто спосіб усунення коливань вантажу під час роботи механізму повороту стрілових кранів. Оптимізація режиму пуску механізму повороту крана проводиться за допомогою методів варіаційного числення. В роботі використано критерій, підінтегральною функцією якого слугує енергія ривків, котрий підлягає мінімізації. За керуючий параметр обрано зусилля, яке діє на механізм повороту зі сторони приводного механізму.

Колівання вантажу, оптимізація, перехідний режим, рух.

Постановка проблеми. Відомо [5], що при роботі стрілових кранів спостерігаються маятникові коливання вантажу, котрі викликають нерівномірний рух ланок механізмів та створюють додаткові динамічні навантаження, що знижує їхню надійність і приводить до незручностей при їх експлуатації, а також збільшують ризик виникнення аварійних ситуацій.

Вирішення проблеми зменшення коливань вантажу на гнучкому підвісі забезпечить більш ефективну експлуатацію кранового обладнання.

Аналіз останніх досліджень. Проблемі усунення коливань вантажу на гнучкому підвісі вже декілька десятків років. Останні дослідження, присвячені даній проблемі, ґрунтуються на використанні математичних теорій оптимальних процесів (принцип максимуму, варіаційне числення). Зауважимо, що сучасні способи усунення коливань вантажу пропонується реалізовувати з допомогою певної керуючої дії на механізм повороту під час перехідних режимів руху (розгін, гальмування).

*Науковий керівник – доктор технічних наук В.С. Ловейкін

© В.С. Ловейкін, В.В. Мельніченко, 2013