

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

ДОЛОМАКІН ЮРІЙ ЮРІЙОВИЧ



УДК 664.653.122

**НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЕРІОДИЧНОГО
ЗМІШУВАННЯ ВОДНО-БОРОШНЯНИХ СУМІШЕЙ ТА СТВОРЕННЯ
ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ**

05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та
фармацевтичних виробництв

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті харчових технологій Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Лісовенко Олексій Тимофійович
Національний університет харчових технологій
Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри машин і апаратів харчових та
фармацевтичних виробництв

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Стадник Ігор Ярославович
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри обладнання харчових технологій

кандидат технічних наук, доцент
Василів Володимир Павлович
Національний університет біоресурсів і природокористування України
Міністерства освіти і науки України,
доцент кафедри процесів і обладнання переробки продукції АПК

Захист відбудеться 14 березня 2018 року о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.058.02 Національного університету харчових технологій Міністерства освіти і науки України за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68, аудиторія А- 311.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розісланий “12” лютого 2018 року.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.058.02, к.т.н., доцент



С.І. Літвинчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією із обов'язкових операцій для багатьох технологічних процесів є змішування сировинних компонентів. Здебільшого, обладнання для цієї операції обирають виходячи з особливостей виробництва, заданої продуктивності, характеристик сировини, показників якості готової суміші та економічних можливостей підприємства.

Конструкції обладнання для приготування рідких водно-борошняних напівфабрикатів вітчизняного виробництва досить консервативні. Українські машинобудівні заводи виготовляють в основному малоефективні машини. У цих машинах не вирішені вимоги, що ставить перед машинобудівниками сучасність. До них можна віднести незбалансовану дію робочого органу та змішувальної чаші машини, у більшості випадків відсутнє регулювання режиму змішування, підвищений нагрів продукту та не достатня його аерація.

Українські харчові підприємства в умовах гострої конкуренції з закордонними виробниками та у зв'язку з достатньо високими цінами на закордонне обладнання, потребують модернізації виробництва з залученням власних виробників обладнання.

Наукові дослідження у цій області знань відкривають шляхи для задоволення потреб ринку при розробці нових конструкцій з необхідними параметрами. Одним із можливих шляхів удосконалення змішувального обладнання є створення пульсацій тиску та швидкості рідинного потоку, розвиненої турбулентності в локальних об'ємах продукту. Для цього потрібно розробити методику розрахунку основних режимних та конструктивних параметрів, які забезпечують стабільне досягнення необхідної якості суміші.

Зважаючи на недостатність знань про ці процеси, відсутність універсальних фізичних моделей факторного впливу при приготуванні рідких гетерогенних середовищ, виникає потреба у додаткових експериментальних та теоретичних дослідженнях стадії змішування. Ці дослідження спрямовані на удосконалення робочих органів обладнання змішування та створення методів їх розрахунку.

Тема є актуальною при дослідженні процесу з обґрунтуванням технічного рішення розробки нової конструкції швидкісної змішувальної машини з пульсацією потоку суміші періодичної дії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано відповідно до пріоритетного напрямку наукових робіт НУХТ, на 2010...2015 р.: "Розробка наукових основ тепломасообмінних та інших процесів харчових, мікробіологічних і фармацевтичних виробництв з метою створення високоефективних технологій та обладнання, засобів механізації та автоматизації для харчових та переробних галузей АПК" (схвалено вченою радою НУХТ, протокол №7 від 25.03.2006 р.), та пов'язана з кафедральною темою на 2010...2017 р.: "Інтенсифікація технологічного процесу з метою створення високоефективного обладнання харчових, мікробіологічних і фармацевтичних виробництв" науково-дослідної роботи Національного університету харчових технологій (схвалено на засіданні кафедри МАХФВ протокол № 3 від 17 вересня 2010 р.). Виконана робота відповідає Закону України від 12 жовтня 2010 р. № 2623-14 "Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки".

Метою дисертаційної роботи є наукове обґрунтування параметрів періодичного змішування водно-борошняних сумішей та розробка високоефективного технічного рішення на таке обладнання.

Відповідно до поставленої мети сформульовані такі задачі досліджень:

- проаналізувати теоретичні засади і особливості процесу змішування водно-борошняних сумішей;
- довести доцільність використання для змішування запропонованої конструкції робочого органу, що забезпечує створення пульсацій тиску та швидкість рідинного потоку;
- побудувати теоретичну модель, що описує зміну кінематичних та динамічних параметрів процесу змішування, та їх вплив на енергетичні витрати;
- визначити оптимальні параметри роботи ротора для змішування періодичної дії на основі теоретичного моделювання та експериментальних досліджень;
- розробити конструкцію нової функціональної машини, яка забезпечить інтенсивне та ефективне змішування компонентів.

Об'єктом досліджень є процеси, що відбуваються під час руху двофазних твердо-рідинних систем по каналах робочих органів із пульсацією тисків та інтенсивним змішуванням фаз у замкненому об'ємі.

Предметом досліджень є параметри процесу та змішувальної машини роторного типу, що використовується у складі ділянки для приготування водно-борошняних сумішей (ВБС), як основ для харчових та фармацевтичних виробництв.

Методи дослідження. Дослідження в роботі виконані методами математичного моделювання, фізичного та імітаційного експериментів. Фізичний експеримент проводили на розроблених установках, реологічні дослідження – методами ротаційної віскозиметрії.

Математичне опрацювання експериментальних даних та розрахунки виконувались із застосуванням сучасних інтегрованих систем *MathCAD*, *SolidWorks*, *Flow Vision*, *ToupView*, *OriginPro*.

Властивості компонентів та готової ВБС визначали за стандартними методиками, які використовуються у харчовій та фармацевтичній промисловості.

Наукова новизна одержаних результатів:

- науково обґрунтовано та запропоновано новий принцип дії робочого органу з нестационарними зовнішнім та внутрішнім перенесенням потоків речовини при їх змішуванні;
- запропонована аналітична залежність визначення величини енергетичних витрат приводу ротора для змішування ВБС;
- встановлені закономірності розподілу швидкостей, об'ємних витрат, крутного моменту та роботи на змішування з врахуванням зміни геометричних і кінематичних параметрів робочого органу та структурно-механічних характеристик суміші;
- обґрунтовано вплив ексцентрикового розташування внутрішнього циліндра ротора на гідродинамічні параметри, зокрема пульсаційного тиску на якість ВБС.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність роботи полягає в наданні науково-обґрунтованих рекомендацій промисловості з розробки нових робочих органів змішувальних машин харчових та фармацевтичних

виробництв:

- запропоновано конструкцію робочого органу, яка забезпечує створення високоефективної машини для змішування з нестаціонарними потоками, які у силу своєї циклічності призводять до створення пульсаційного ефекту, що активізує процес змішування компонентів суміші, а також перенесення процесу змішування у середину ротору, де створюються прогнозовані та контрольовані гідродинамічні умови оброблення;

- визначені оптимальні експлуатаційні параметри ротора, що мінімізують енергетичні витрати, створюють максимальні робочі тиски та підтримують продуктивність змішувача у межах заданої. Такими параметрами є діаметр робочого органу d , діапазон розмірів якого становить $(0,365 \dots 0,396)D$ та швидкість його обертання – 1500 об/хв;

- запропонований і захищений патентом України на винахід новий пристрій для змішування рідких напівфабрикатів (патент № 113459 від 25.01.2017, бюл. № 2);

- запропонований і захищений патентом України на винахід спосіб приготування опари (патент № 113924 від 27.03.2017, бюл. № 6);

- запропоновано метод визначення кількості введеної механічної енергії для досягнення певної консистенції готової суміші;

- розроблено нову конструкцію пристрою для змішування компонентів водно-борошняних сумішей;

Результати досліджень реалізовані у виробничому цеху № 4 ПАТ “Київхліб” та впроваджені у навчальний процес НУХТ, що підтверджено актами впровадження пропозицій та розробок науково-дослідної роботи у виробництво та навчальний процес.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні положення, методика проведення фізичних експериментів зі змішування рідких ВБС розроблені у співавторстві з науковим керівником д.т.н., проф. Лісовенко О.Т.

Автором особисто: запропонована ідея, розроблені геометричні моделі; побудована математична модель; виконані імітаційне моделювання процесу та обчислювальні експерименти; оброблено та узагальнено результати фізичних досліджень, розроблено рекомендації щодо зниження енерговитрат та інтенсифікації процесу виробництва ВБС.

Апробація результатів досліджень. Матеріали дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на 77...83-й міжнародних наукових конференціях молодих учених, аспірантів і студентів (м. Київ); Міжнародній науково-практичній конференції “Инновационные технологии производства продуктов питания функционального назначения” (м. Кутаїсі); Міжнародній науково-практичній конференції “Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність” (м. Харків); X та XI Міжнародній науковій конференції студентів та аспірантів “Техника и технология пищевых производств” (м. Могильов); 8-му Центральноєвропейському конгресі з харчової науки “SEFood-2016”; IV...V Міжнародній спеціалізованій науково-практичній конференції “Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і па-

кування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності” (м. Київ); XII Всеукраїнській науковій конференції “Харчові технології” (м. Одеса).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 26 наукових робіт, із них: 9 статей у фахових виданнях, чотири з яких у закордонних, 2 патенти на винахід та 2 патенти на корисну модель, 13 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, п’ятьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 126 найменувань та додатків. Основний зміст дисертаційної роботи викладено на 182 сторінках. Дисертація ілюстрована 61 рисунком та 6 таблицями, містить 12 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи; сформульовано мету і завдання досліджень, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів; наведено дані про особистий внесок здобувача, публікації, структуру та обсяг роботи.

У **першому розділі** розглянуті загальні характеристики взаємодії води та борошна, їх склад, структурні зміни та молекулярна модель при їх формуванні, а також їх феноменологічні моделі.

Проведено аналіз результатів досліджень процесу змішування компонентів водно-борошняних сумішей та його основи. На основі проведеного літературного огляду встановлено стан та перспективи розвитку обладнання для змішування ВБС. Обґрунтовано доцільність вибраного напрямку досліджень, сформульовано мету і завдання досліджень.

У **другому розділі** обрано основний напрямок досліджень, обґрунтовано об’єкт і предмет досліджень. Наведена експериментальна установка та методики проведення експериментів і імітаційного моделювання.

Для дослідження процесу змішування водно-борошняних сумішей створено експериментальну установку (рис. 1).

На каркасі 1 жорстко закріплені асинхронний електродвигун 2 з індукційною муфтою 3. У підшипниковому вузлу змонтований вал 4, який зв’язує з електродвигуном клиноремінна передача 5 із захисним кожухом 6.

Прозора циліндрична чаша 7, діаметром 260 мм і висотою 205 мм встановлена на спеціальній панелі 8, конструкція якої дає їй можливість вільно обертатись навколо своєї вісі та змішувати свою вісь відносно вісі валу 4. Конструкція валу виконана з можливістю змінювати положення робочого органу 9 по висоті чаші.

Частоту обертання ротора змінювали за допомогою індукційної муфти 2 регулятором швидкості 10 в межах 500...2800 об/хв (52...293 рад/с) ці значення фіксувались електронним тахометром 11.

Для фіксування технологічних параметрів, установка оснащена потенціометром 12 до якого підключалась термопара для фіксування зміни температури.

Вимірювання електричної потужності двигуна проводили за допомогою цифрового ватметра 13 марки *Voltcraft EM-3000*. Він виконаний за схемою перетворення напруги та струму в дискретні значення, які надаються відповідними цифровими кодами, перемножуються і усереднюються за допомогою цифрової пристрою.

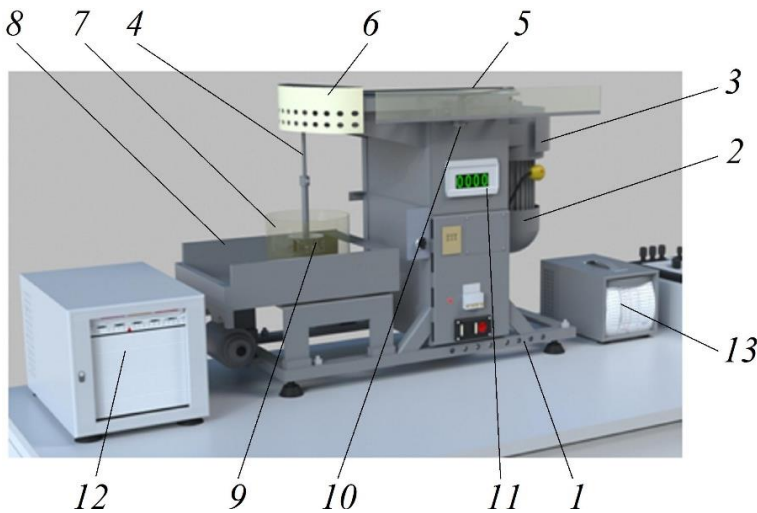


Рис. 1. Експериментальна установка:

1 – каркас; 2 – електродвигун; 3 – муфта; 4 – вал; 5 – клиноремінна передача; 6 – кожух; 7 – чаша; 8 – панель; 9 – робочий орган; 10 – регулятор швидкості; 11 – електронний тахометр; 12 – потенціометр; 13 – ватметр

Для приготування ВБС в чашу спочатку завантажували воду, після цього включали електродвигун і потім засипали борошно.

Форма складної геометрії робочих органів реалізована за допомогою технології 3D друку, а саме адитивного виробництва твердих тіл із *PLA* полімеру. Робочий орган виготовлений з такого матеріалу має багато переваг. По-перше *PLA* полімер біорозкладний та біосумісний. По-друге, мала вага деталі (\approx у 6 разів менша за металеву) набагато зменшує величину вібрації та сил що діють на опори валу при його великих частотах обертання (дисбаланс).

Визначення реологічних характеристик ВБС проводили за допомогою ротарційного віскозиметра “*Rheotest 2*” з циліндричним пристроєм в інтервалах температур 24...35 °С та вологості суміші 65...75 %.

Напруження зсуву розраховували за формулою τ , Па:

$$\tau = Z \times \alpha \quad (1)$$

де Z – константа приладу для внутрішнього циліндра (для середніх значень напружень обрана система вимірювань S/S_2 , для якої $Z = 0,637$ Па); α – відносний кут обертання пропорційний вимірюваному крутному моменту динамометра.

У дослідженні вимірювання потужності, що витрачається на змішування, використаний електричний метод. Цей метод полягає у вимірі корисної потужності електродвигуна (активна потужність), що приводить у рух робочий орган, встановлений у чашу. Споживану корисну потужність P , розраховували за різниці електричної потужності двигуна на змішування $P_{\text{дв}}$ і на холостому ході P_0 (без ротора) за однакової кількості обертів:

$$P = P_{\text{дв}} - P_0. \quad (2)$$

Визначення тривалості готовності ВБС було реалізовано методом фіксування крутного моменту на чаші (вторинний крутний момент), у якій вона готувалася. Він базується на припущенні, що стабілізація опору ВБС вказує на закінчення процесу змішування і готовність суміші. Опір ВБС змішуванню, пропорційний її в'язкості, вимірювали за допомогою електронних ваг, у вигляді сили F , яка виникає на зовнішньому радіусі чаші змішувача.

Заміряну на певному плечі величину сили, яка не допускає обертання чаші, множили на радіус самої чаші за формулою:

$$T = F \times R_2, \quad (3)$$

де T – крутний момент, Н×м; F – сила на осі обертання, Н; R_2 – радіус чаші, м.

Морфометричне дослідження та мікрофотографування проводили за допомогою мікроскопу “*Konus Biorex-3*” з цифровою мікрофотонасадкою *Sigeta UCMOS 5100* з адаптованою для даних досліджень програмою *ToupView*.

Дослідні дані отримані експериментальним шляхом обробляли за стандартними методиками.

У **третьому розділі** обґрунтовано вибір форми робочого органу змішувача для приготування ВБС, сформована задача опису моделювання багатофазної суміші побудовою замкнутої системи рівнянь її руху при заданих фізико-хімічних властивостях вихідної структури суміші, представлені результати математичного моделювання, що дають можливість прогнозувати якість готового продукту, виходячи з геометричних і кінематичних параметрів робочого органу.

Однією з основних класифікаційних ознак змішувальних машин механічної дії є форма робочих органів. Серед їх великого різноманіття чітко виділяються чотири основні види, які використовуються у промисловості: турбінні, пропелерні, лопатеві та рамні. Конструкції змішувальних органів інших машин можуть або бути зведені до перерахованих вище або є їх комбінацією.

Від ефективності реалізації стадії змішування, під час якої слід забезпечити рівномірний розподіл компонентів ВБС, безпосередньо залежать якісні показники готової продукції.

Мета змішування компонентів ВБС полягає у рівномірному їх розподілу в об’ємі чаші. Основним критерієм для аналізу процесу змішування обрано швидкість зміни концентрації компонентів у робочому об’ємі змішувальної чаші. Підсумком процесу має бути рівномірний розподіл компонентів ВБС – борошна і рідкої фази, початкова концентрація яких позначена 0 і 100. Концентрація ВБС повинна прямувати до 50.

У розділі наведені результати, отримані при проведенні обчислювальних експериментів, виконаних у пакеті прикладних програм *FlowVision*.

Зі збільшенням часу процес утворення суміші інтенсифікується, що помітно по збільшенню активної зони перемішування та захопленню більшої кількості частинок з нижньої поверхні чаші. Для кожного типу робочого органу побудовано залежність зміни концентрації c (ступінь змішування) у часі (рис. 2).

Аналізуючи зміну концентрації можна зробити висновок, що рамний тип робочого органу (крива 4) не дає можливості забезпечити швидкий розподіл компонентів за якомога найменший час його роботи, тим самим не забезпечуючи інтенсивного оновлення поверхонь контакту рідкої і твердої фаз.

Інші три типи робочих органів (криві 1, 2 та 3) виконують цю задачу швидше але з різною інтенсивністю, найкращим з них можна вважати турбінний.

Одним з основних недоліком цих конструкцій є рівномірність руху суміші в чаші яка призводить до створення стаціонарних вихорів у яких процес змішування може бути недостатнім. Поряд із цим у проміжку між стаціонарними вихорами можуть виникати застійні зони.

Найбільш доцільно для змішування використовувати робочий орган роторного типу (крива 5), що підтверджує графік зміни концентрації. Встановлено що високий рівень концентрації дисперсної фази у дисперсійному середовищі можна одержати вже приблизно на 15 секунд процесу.

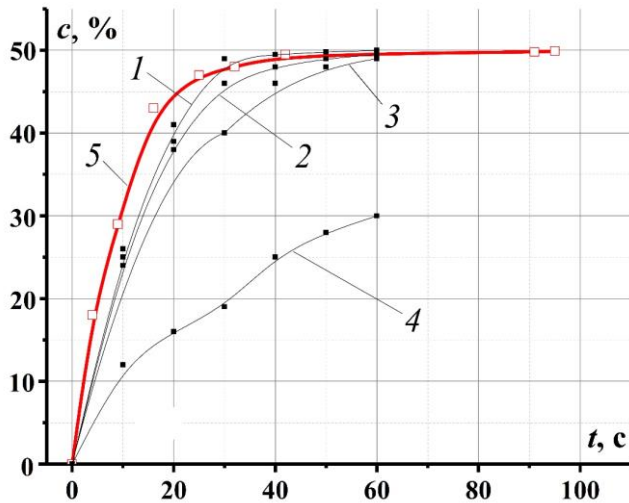


Рис. 2. Зміна концентрації компонентів суміші у часі для різних конструкцій робочих органів: 1 – турбінний; 2 – пропелерний; 3 – лопатевий; 4 – рамний; 5 – роторний

В основу запропонованої конструкції роторного робочого органу (рис. 3), поставлено умову створення високоефективного змішування з нестационарними потоками речовини, що у силу своєї

циклічності призводять до створення пульсаційного ефекту, який активізує процес змішування компонентів суміші. Друга умова яка виконується – перенос процесу змішування у середину ротора, в якому можна створити прогнозовані та контрольовані сприятливі кінематичні умови оброблення (рис. 4).

Інтенсифікацію процесу змішування у такій конструкції можна пояснити багатофакторним впливом на оброблюване рідке гетерогенне середовище, що полягає в пульсаціях тиску і швидкості потоку рідини, розвиненої турбулентності в локальних об'ємах ротору. Ротор дає можливість досягти великих значень щільності гідродинамічної і гідроакустичної енергії.

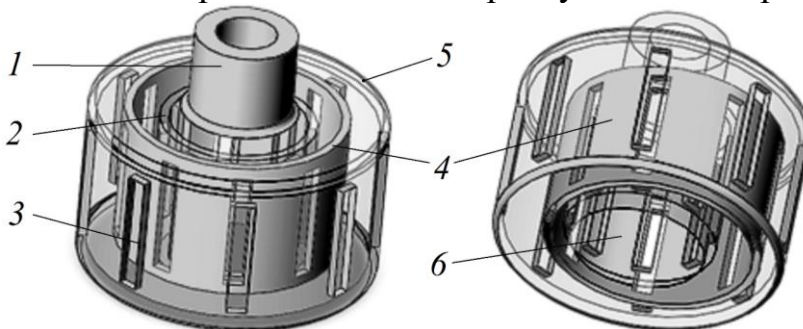


Рис. 3. 3D модель робочого органу з “прозорими” стінками: 1 – маточина; 2 – внутрішній циліндр з каналами; 3 – наскрізні канали; 4 – циліндр встановлений з ексцентриситетом; 5 – зовнішній циліндр з каналами; 6 – вхідний отвір

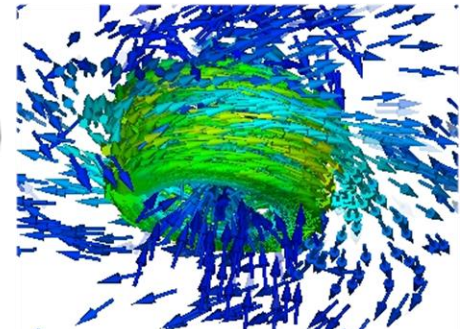


Рис. 4. Імітаційна модель роботи ротора

Така конструкція має низьку енергоємність, обумовлену тим, що ВБС є одночасно і джерелом і об'єктом гідромеханічних коливань, кінетична енергія безпосередньо перетворюється у турбулентний рух середовища.

Моделювання та розрахунок споживаної потужності базується на загальних фізичних уявленнях про закономірності гідромеханічних процесів, що мають місце в роторному змішувачі. Основне положення – кінетична енергія, якої набуває потік ВБС у роторі, дисипує в радіальних каналах ротора та осьовому зазорі між внутрішніми циліндрами й втрачається у виконавчому механізмі машини.

Модель поділена на два види зовнішню та внутрішню відповідно до задач гідродинаміки. Енергетичний баланс для визначення потужності привода роторного змішувача буде мати вигляд:

$$P = P_1 + P_2, \quad (4)$$

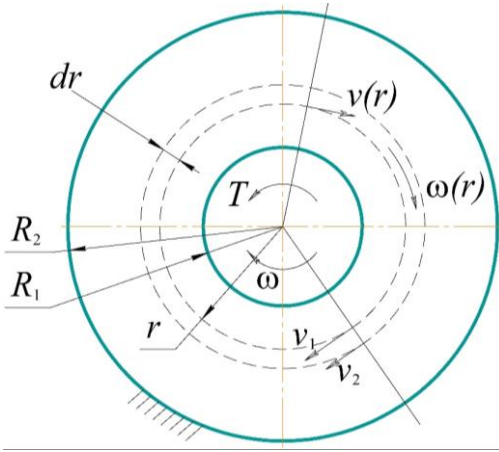


Рис. 5. Розрахункова схема зовнішньої моделі роторного змішувача

де P_1 – потужність, що витрачається на обертання ротора в об’ємі ВБС, Вт; P_2 – потужність, що витрачається на прокачування ВБС крізь канали ротора, Вт.

Розрахункова схема зовнішньої моделі зображена на рис. 5.

Використавши перетворення рівнянь Генки, шляхом додавання рівнянь, що зв’язують компоненти тензора напружень з компонентами тензора швидкостей деформації, і прийнявши, що течія ВБС є плоскою і осесиметричною, отримано спрощені рівняння у циліндричних координатах r, z, φ з віссю z по осі ротора:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{v_\varphi^2}{r} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{\tau_{rr} - \tau_{\varphi\varphi}}{r} \right); \\ \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{\varphi r}}{\partial r} + \frac{2\tau_{\varphi r}}{r} \right) = 0; \\ \tau = \frac{1}{2} \sqrt{(\tau_{rr} - \tau_{\varphi\varphi})^2 + 4\tau_{\varphi r}^2} = \tau_0 + \left| \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r} \right|; \\ (\tau_{rr} - \tau_{\varphi\varphi}) \left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r} \right) = 0. \end{array} \right. \quad (5)$$

Система рівнянь (5) вирішується за наступних граничних умов при $r = R_1$: $v_\varphi = \omega_1 R_1$, за $r = R_2 \rightarrow v_\varphi = 0$, так як у нашому випадку $\omega_2 = 0$ (нерухома чаша).

Розв’язавши систему рівнянь (5), послідовно отримали: швидкість руху точок суміші між ротором та чашею

$$v_\varphi = \frac{\omega Sen}{bR_1} \left(a Sen^{-1} + (a - b) \ln \sqrt{b} \right); \quad (6)$$

момент сил опору від ВБС

$$T_1 = \frac{2\tau_0 HR_2^2}{b-1} (\pi Sen^{-1} + \ln \sqrt{b}); \quad (7)$$

потужність, що витрачається на обертання ротора в об’ємі ВБС

$$P_1 = \frac{2\omega\tau_0 HR_2^2}{b-1} (\pi Sen^{-1} + \ln \sqrt{b}), \quad (8)$$

де v_φ – тангенціальна складова швидкості ВБС, м/с; ω – кутова швидкість, рад/с; Sen – число Сен-Венана–Ільюшина; H – висота ротора, м; R_1 – зовнішній радіус ротора, м; R_2 – внутрішній радіус чаші, м; τ_0 – граничне напруження зрушення, Па; $a = R_2^2 - R_1^2$, $b = R_2^2 / R_1^2$.

Розрахункова схема внутрішньої моделі наведена на рис. 6.

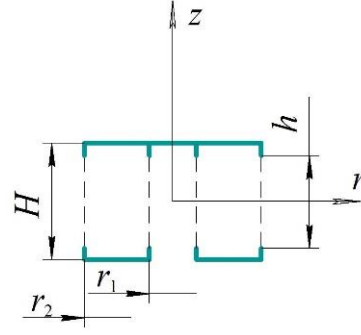
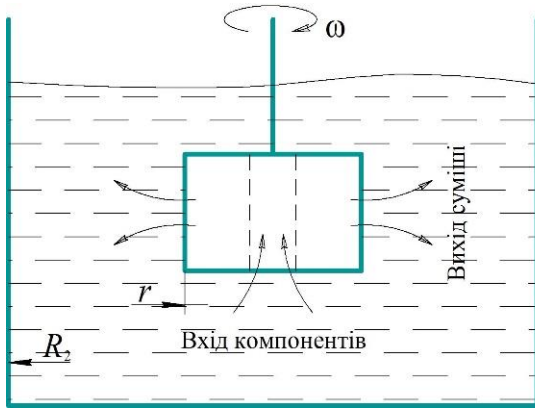


Рис. 6. Розрахункова схема руху ВБС скрізь канали роторного змішувача

Застосувавши диференціальні рівняння руху середовища, записані в циліндричних координатах (r, z, φ) з віссю z по осі ротора, нехтуючи конвективними членами і силами тяжіння, що обумовлено високими віскозиметричними властивостями ВБС та тому що у задачах з насосними ефектами враховувати гравітаційні поля має сенс, якщо точки входу та виходу розташовані вздовж вектору сили тяжіння на значній відстані, що не відповідає нашій задачі, отримано рівняння руху. Приймаючи припущення (досить умовно), що суміш однорідна, нестислива, течія середовища є плоскою, ізотермічною і вісесиметричною, рівняння у напруженнях набувають вигляду:

$$\begin{cases} \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial r}; \\ r^2 \frac{\partial r^2 \tau_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{\varphi r}}{\partial z} = 0; \\ \frac{1}{r} \frac{\partial (r \tau_{rz})}{\partial r} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Із системи (9) при граничних умовах $v_r = 0$ при $z = h$ отримано залежності для: відцентрової складової швидкості ВБС

$$v_r = \frac{r^{2-n}}{K(\omega/h)^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial r} (h-z) = \frac{r^{2-n} h^{n-1} (h-z)}{K \omega^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial r}; \quad (10)$$

об'ємної витрати по готовому продукту

$$Q = \int_{z_k}^h b_k v_r dz = 8 \int_0^h 0,1 r v_r dz = \frac{0,8 r^{3-n} h^{n+1}}{2K \omega^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{2 r^{3-n} h^{n+1}}{5K \omega^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial r}; \quad (11)$$

необхідного напору тиску при заданій продуктивності

$$p = \frac{5QK\omega^{n-1}}{2h^{n+1}(n-2)} (r_2^{n-2} - r_1^{n-2}); \quad (12)$$

крутного моменту на валу, від продавлювання суміші крізь z_k каналів

$$T_2 = \frac{2\pi K z_k r^{2+n} \omega^n h^{1-n}}{n-1}; \quad (13)$$

потужності, яка витрачається на продавлювання об'єму ВБС крізь канали ротора

$$P_2 = \frac{2\pi K z_k r^{2+n} \omega^{n+1} h^{1-n}}{n-1}, \quad (14)$$

де v_r – відцентрова складова швидкості ВБС, м/с; n – індекс псевдопластичності; K – консистенція ВБС, Па \times с n ; h – висота каналу ротора, м; z_k – кількість каналів у роторі; b_k – ширина каналу, м; r_1 – радіус внутрішнього циліндру, м; r_2 – радіус зовнішнього циліндру, м.

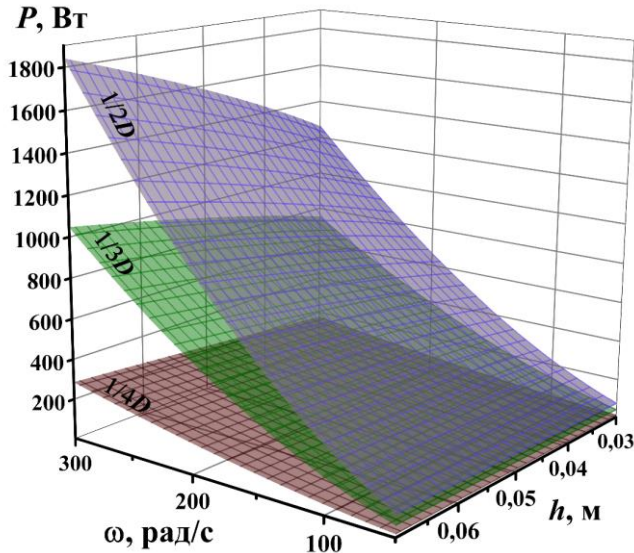


Рис. 7. Загальна потужність для різних роторів залежно від кутової швидкості та висоти каналу ротора

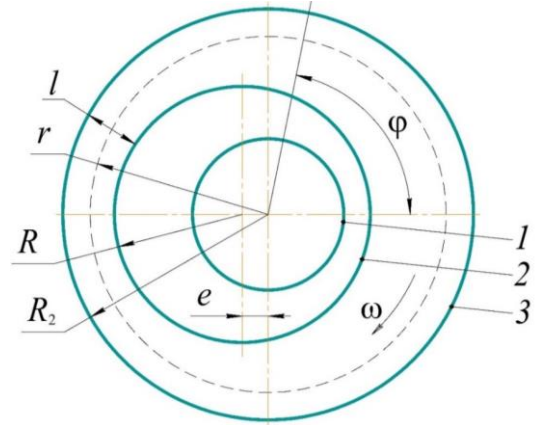


Рис. 8. Розрахункова схема ротора при зміщеному розташуванні внутрішнього циліндру: 1 – внутрішній циліндр з каналами; 2 – циліндр встановлений з ексцентриситетом; 3 – зовнішній циліндр з каналами

Для знаходження впливу ексцентрикового розташування внутрішнього циліндра на гідродинамічні параметри, використано рішення гідродинамічної задачі А. Зоммерфельда.

Прийнято, що величина зміщення $e \ll R$ та R_2 , а діапазон зміни радіус-вектору r у зазорі між циліндрами знаходиться у межах $R \leq r \leq R + l$ (рис. 8).

Із рис. 8 запишемо, що $e \times \cos \varphi + R + l = R_2$. Позначивши $\zeta = r - R$, $\varepsilon = R_2 - R$ та відносний ексцентриситет $\lambda = e/\varepsilon$, маємо:

$$l(\varphi) = \varepsilon - e \times \cos \varphi = \varepsilon(1 - \lambda \cos \varphi). \quad (15)$$

Прийняті позначення введемо у рівняння (15). За таких умов рівняння Нав'є-Стокса у полярних координатах r, z, φ у спрощеному вигляді набудуть виду:

$$\begin{cases} \eta \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial \zeta^2} = \frac{1}{R} \frac{\partial p}{\partial \varphi}; \\ \eta \frac{\partial^2 v_r}{\partial \zeta^2} = \frac{\partial p}{\partial \zeta}; \\ \frac{\partial v_r}{\partial \zeta} + \frac{1}{R} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} = 0. \end{cases} \quad (16)$$

При граничних умовах: $v_\varphi = \omega R$, за $\zeta = 0$ та $v_\varphi = 0$ за $\zeta = l$ отримано: значення тангенціальної швидкості

$$v_{\varphi} = \frac{1}{2\eta R} \frac{dp}{d\varphi} (\zeta - h)\zeta + \frac{\omega R}{h} (h - \zeta); \quad (17)$$

об'ємної витрати

$$Q = \int_0^l v_{\varphi} h d\zeta = \frac{1}{2} \omega R l h - \frac{l^3 h}{12\eta R} \frac{dp}{d\varphi}; \quad (18)$$

та пульсації тиску у середині ротора

$$p_{\pi}(\varphi) = \frac{6\omega\eta R^2}{\varepsilon^2} \frac{\lambda \sin \varphi}{(\lambda^2 - 1)(\lambda \cos \varphi - 1)} - \frac{12QR\eta}{\varepsilon^3 h} \left(-\frac{\lambda \sin \varphi (3\lambda \cos \varphi + \lambda^2 - 4)}{2(\lambda^2 - 1)^2 (\lambda \cos \varphi - 1)^2} \right) =$$

$$= \frac{6\eta R \lambda \sin \varphi}{\varepsilon^2 (\lambda^2 - 1)(\lambda \cos \varphi - 1)} \left(\omega R + \frac{Q(3\lambda \cos \varphi + \lambda^2 - 4)}{\varepsilon h (\lambda^2 - 1)(\lambda \cos \varphi - 1)} \right). \quad (19)$$

На рис. 9 наведено графік зміни пульсацій тиску у середині ротора залежно від величини ексцентриситету e за постійної швидкості обертання 1500 об/хв та заданої продуктивності $0,002 \text{ м}^3/\text{с}$ для роторів різного розміру.

Використавши умову $p(2\pi) = p(0) = 0$ знаходимо витрату:

$$Q = \frac{\omega R h}{2} \frac{\int_0^{2\pi} \frac{d\varphi}{l^2(\varphi)}}{\int_0^{2\pi} \frac{d\varphi}{l^3(\varphi)}},$$

та підставивши у це рівняння вираз (16) отримали (рис. 10):

$$Q = \frac{\omega R h}{2} \frac{\frac{1}{\varepsilon^2} \int_0^{\varphi} \frac{d\varphi}{(1 - \lambda \cos \varphi)^2}}{\frac{1}{\varepsilon^3} \int_0^{\varphi} \frac{d\varphi}{(1 - \lambda \cos \varphi)^3}} = \frac{\omega R h \varepsilon}{2} \frac{\int_0^{\varphi} \frac{d\varphi}{(1 - \lambda \cos \varphi)^2}}{\int_0^{\varphi} \frac{d\varphi}{(1 - \lambda \cos \varphi)^3}} = \frac{\omega R h \varepsilon}{2} (\varphi - \lambda \sin \varphi). \quad (20)$$

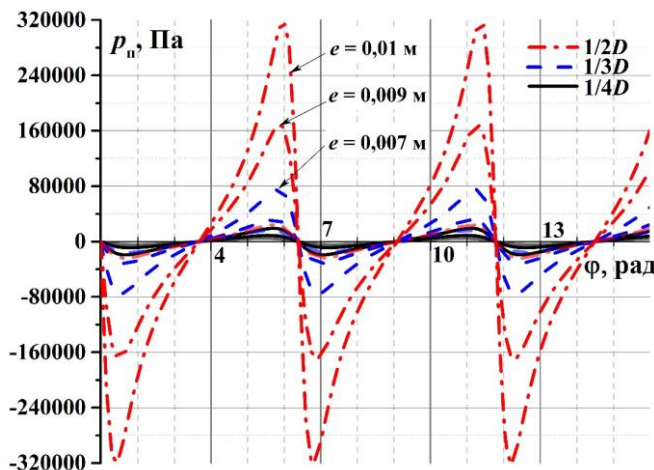


Рис. 9. Зміна пульсацій тиску у середині роторів від кута їх повороту зі зміною величини ексцентриситету e

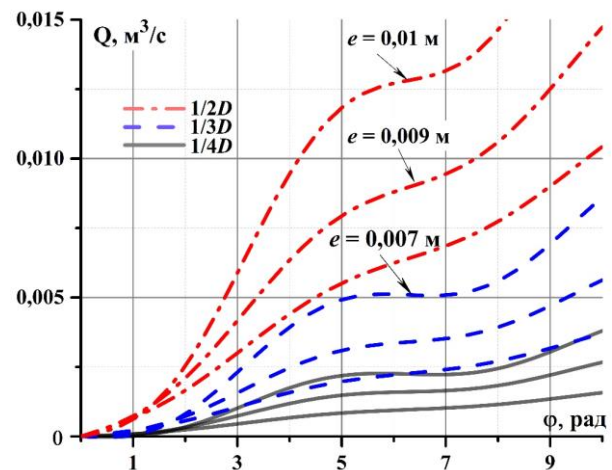


Рис. 10. Об'ємні витрати ВБС крізь ротор від кута його повороту зі зміною величини ексцентриситету e

Одержані аналітичні залежності дають можливість оцінити вплив окремих

факторів на процес змішування компонентів ВБС у роторному змішувачі та характер руху суміші й витрати енергії на обертання ротора в об'ємі суміші та прокачування її крізь канали ротора.

У **четвертому розділі** наведено результати експериментальних досліджень процесу змішування компонентів водно-борошняних сумішей.

Досліджено структурно-механічні характеристики ВБС та вплив на них основних технологічних параметрів – вологості та температури.

Аналіз отриманих результатів дає можливість зробити такі висновки. Зміна напруження зсуву τ , в діапазоні температур 24...35 °С, а саме при її зростанні, зменшує коефіцієнт консистенції K ВБС у межах 13,5 %. Тоді як абсолютні значення, при малих швидкостях зсуву, дають різницю у 19,7 %. Якщо напруження зсуву збільшуються на порядок, різниця складає вже 25,3 %. Тому можна стверджувати, що при зростанні температури суміші, напруження зсуву зменшуються.

Така сама тенденція відбувається зі структурною в'язкістю η . При зростанні температури коефіцієнт консистенції зменшується на 18,6 %. Щодо абсолютних значень, різниця складає 11,8 % при малих швидкостях зсуву, тоді як при великих значеннях вона складає всього 1,2 %. При підвищенні температури до 35 °С структурна в'язкість ВБС знижується, але не перетворюється на ньютонівську систему, в ній так само домінують тиксотропні властивості, що пояснюється зменшенням внутрішньо-молекулярної взаємодії.

$$24...35 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow \begin{cases} \tau = K\dot{\gamma}^n = (3,34...2,89)\dot{\gamma}^{(0,623...0,591)}; \\ \eta = K\dot{\gamma}^{-n} = (4,3...3,5)\dot{\gamma}^{(-0,5...-0,49)}. \end{cases} \quad (21)$$

Зміна напруження зсуву τ , в діапазоні вологості 65...75 %, зменшує коефіцієнт консистенції K ВБС в межах 93,8 %. Абсолютні значення, при малих швидкостях зсуву, дають різницю у 88,4 %. Якщо напруження зсуву збільшуються на порядок, різниця складає вже 78,3 %. Тому можна стверджувати, що при зростанні вологості суміші, напруження зсуву зменшуються.

При зростанні вологості коефіцієнт консистенції зменшується на 91,2 %. Щодо абсолютних значень, різниця складає 83,7 % при малих швидкостях зсуву, тоді як при великих значеннях вона складає вже 69 %.

$$65...75 \% \rightarrow \begin{cases} \tau = (4,16...0,257)\dot{\gamma}^{(0,511...0,784)}; \\ \eta = (2,63...0,23)\dot{\gamma}^{(-0,46...-0,19)}. \end{cases} \quad (22)$$

Аналіз значень коефіцієнта n реологічних рівнянь для ВБС вологістю 65 %, показує, що його величина несуттєво змінювалась відносно середнього значення, рівного 0,5. При збільшенні вологості до 75 % це значення прямує до одиниці. Такі результати досліджень дали можливість зробити висновок, що властивості ВБС вологістю 65 % можуть бути віднесені до псевдопластичних рідин, а властивості ВБС вологістю 75 % наближаються до ньютонівських середовищ.

Отримано значення максимального напруження зрушення системи τ_0 вологістю 65 %, яке прийнято в межах 2,5 Па, при вологості 75 % воно прямує до нульових значень.

У наступній серії досліджень вимірювалась потужність, що витрачається на змішування. Результати вимірювань отримані за різних швидкостей обертання ротора та його геометричних розмірів (рис. 11 а, б, в).

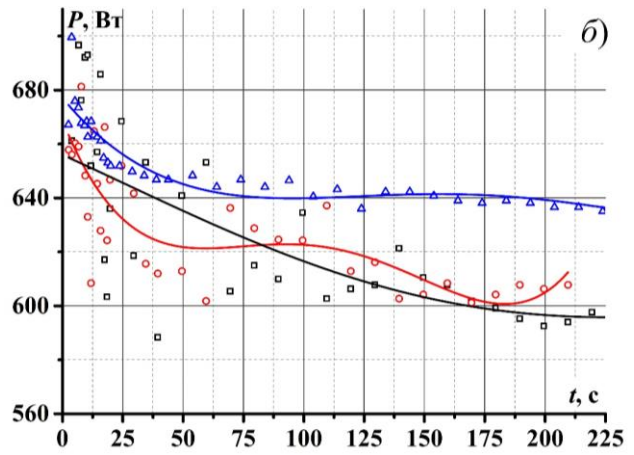
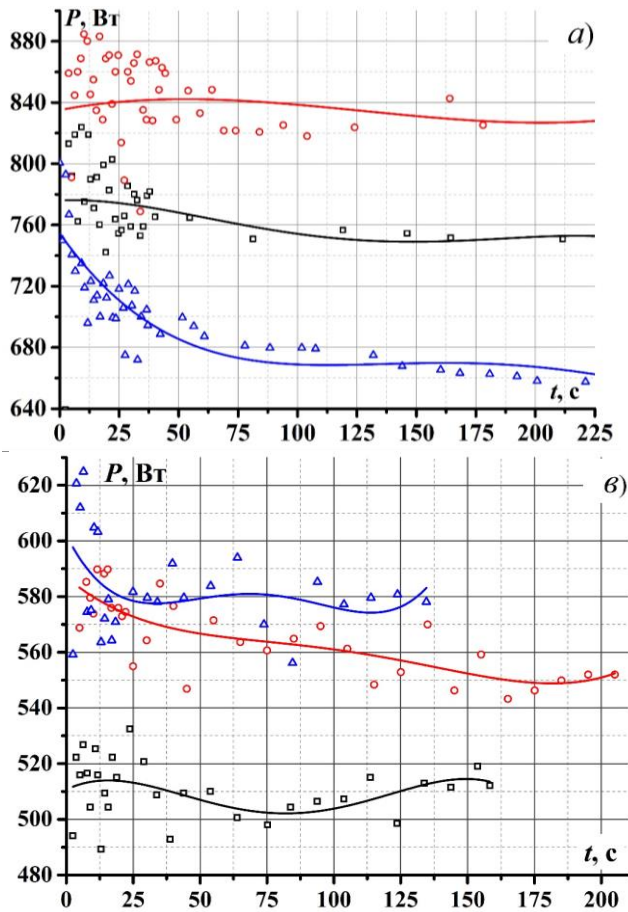


Рис. 11. Зміна активної потужності приводу з часом для ротора з різними розмірами та швидкостями обертання: а – $1/2D$ (Δ - 500, \square - 1000, \circ - 1500 об/хв); б – $1/3D$ (\circ - 1500, \square - 2000, Δ - 2800 об/хв); в – $1/4D$ (\square - 500, \circ - 1500, Δ - 2500 об/хв)

Досліджено вплив положення ротора, встановленого зі зміщенням E відносно осі чаші та його положення

по висоті чаші h_p (рис. 12 а, б). Виявлено, що ротор встановлений із зміщенням використовує більшу потужність (різниця 8,3 %). Тоді як зміна положення ротора відносно висоти чаші дає можливість стверджувати, що ротор споживає менше потужності за мінімальної відстані від дна чаші, бо не відбувається повноцінного прокачування ВБС крізь нього, а отже витрачається її менше (різниця 10,5 %).

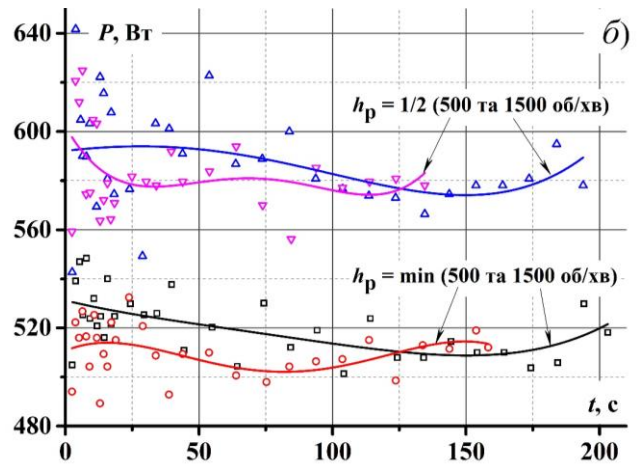
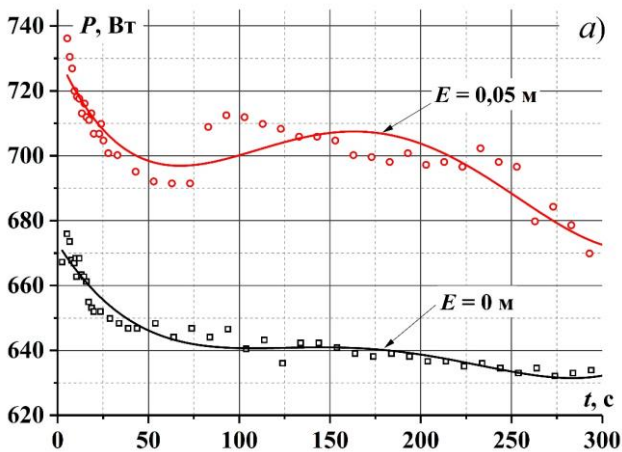


Рис. 12. Вплив зміщення (а) та висоти розташування ротору (б) на потужність приводу

Наступною стадією експериментів було встановлення раціонального, зазвичай мінімального за тривалістю, кінцевого часу змішування ВБС. Визначення часу готовності водно-борошняного напівфабрикату реалізовано методом фіксування крутного моменту на чаші, у якій вона готувалася. Отримані результати

наведені у вигляді реограм (рис. 13).

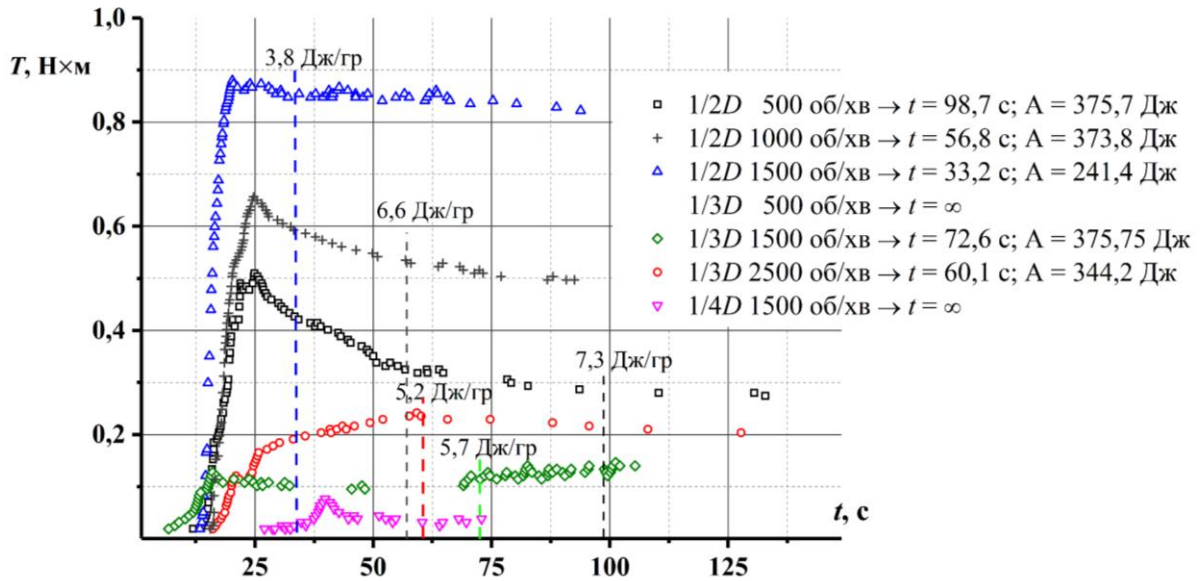


Рис. 13. Зміна крутного моменту на твірній чаші змішувача у часі

Порівнявши отримані результати можна стверджувати, що оптимальними варіантами з отриманих є два випадки, а саме ротор з розмірами $1/2D$ і швидкістю обертання 1500 об/хв, та ротор $1/3D$ з швидкістю 2500 об/хв. Для цих випадків робота дорівнювала відповідно 241,4 та 344,2 Дж.

Для узагальнення результатів експериментів методом аналізу розмірностей побудована математична модель, що описує залежність енергетичних витрат привода змішувача від параметрів, що характеризують процес змішування. Використавши дані, отримані у ході експериментів, визначили значення коефіцієнта A та показники степенів x , y та z . Критеріальне рівняння остаточно набуло вигляд:

$$P = A \left(\frac{K}{\rho \omega^{2-n} d^2} \right)^x \left(\frac{Q}{\omega d^3} \right)^y (t\omega)^z \rho \omega^3 d^4 h = 149,4 Re^{-1,369} K_Q^{-0,11} K_t^{4,739} \rho \omega^3 d^4 h, \quad (23)$$

де K_Q – критерій подачі (насосний ефект); K_t – критерій безрозмірного часу змішування; t – час, с.; d – зовнішній діаметр ротора, м.

Різниця між отриманими даними в межах робочих швидкостей не перевищує 15 %, що свідчить про адекватність отриманої аналітичної моделі.

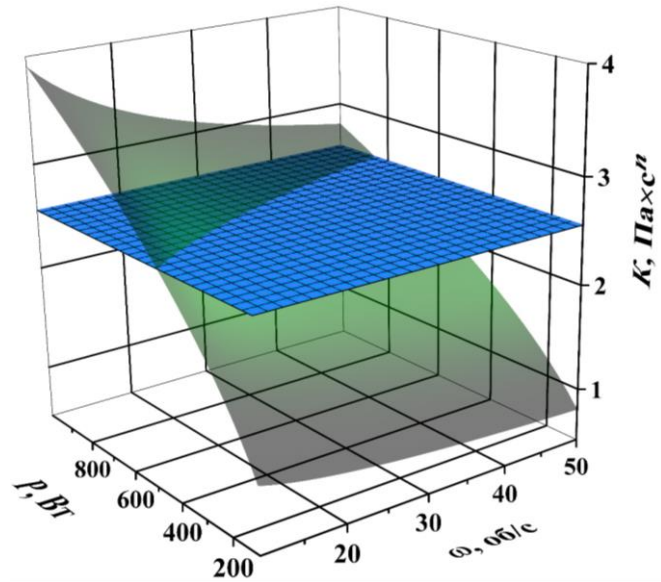
За результатами теоретичних і експериментальних досліджень побудовані поверхні що відображають потрібну кількість введеної механічної енергії для досягнення певної консистенції готової суміші (рис. 14).

На основі аналізу отриманих поверхонь можна зробити висновок, що ротор з розмірами $1/3D$ найкраще підходить для досягнення оптимальної консистенції ВБС, на що вказує лінія перетину двох поверхонь (рис. 14). Величина потужності для цього ротора знаходиться у межах від 450 до 870 Вт, тоді як для ротора з розмірами $1/4D$ спостерігається нестача введеної енергії, а для ротора $1/2D$ кількість цієї енергії є не виправдано завищеною.

Якість готової ВБС визначали методом візуального аналізу цифрових мікроскопічних фотографій (рис. 15) та математичної обробки двовимірних розпо-

Рис. 14. Залежність консистентності ВБС від введеної механічної енергії для ротора з розмірами 1/3D

ділів інтенсивності, дискретизованих за допомогою цифрової камери, оптично-тонких зразків суміші, приготованих за різних режимів. За результатом аналізу зображень побудовано функції щільності величини інтенсивності у дисперсійному середовищі твердої фази та визначена її загальна кількість (рис. 16).



Отримані результати дають можливість стверджувати, зі збільшенням величини ексцентриситету e , щільність твердої фази збільшується, а величина її агломератів зменшується, що вказує на її рівномірне розподілення у суміші.

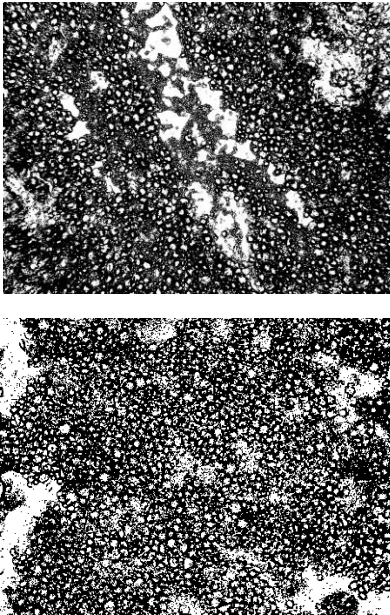


Рис. 15. Мікрофотографії структури ВБС

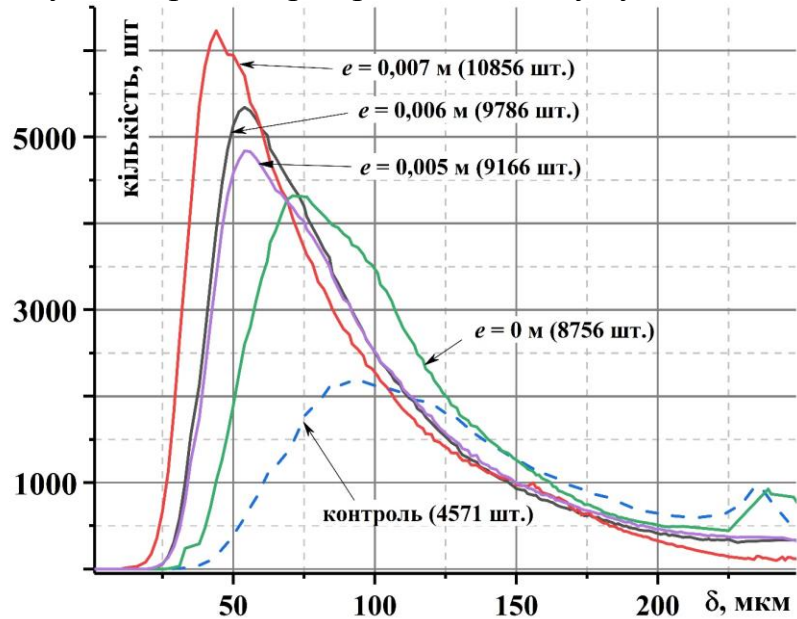


Рис. 16. Функції щільності розподілу твердої фази у дисперсійному середовищі

У п'ятому розділі встановлено оптимальні конструктивні та режимні параметри промислового зразка машини. Експлуатаційні витрати для ефективного функціонування змішувача в основному залежать від споживаної енергії. Поточні технологічні та ремонтні витрати до уваги можна не брати, прийнявши їх сталими. Таким чином, при мінімізації капітальних і експлуатаційних витрат слід оптимізувати: споживану потужність P ; об'ємні витрати ВБС Q ; амплітуду імпульсів тиску p_n . При розрахунку і проектуванні змішувача потрібно прагнути мінімізувати P , прагнути до максимального значення амплітуди p_n , витримувати Q в межах заданої.

Зі збільшенням геометричних розмірів ротора d , питомі витрати енергії зменшуються (рис. 17), але максимальне зменшення відбувається до певних значень.

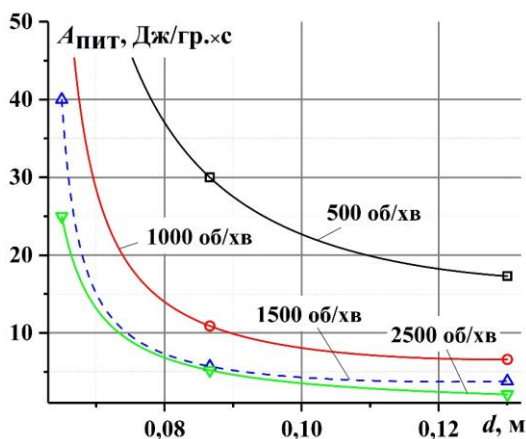


Рис. 17. Питомі витрати енергії

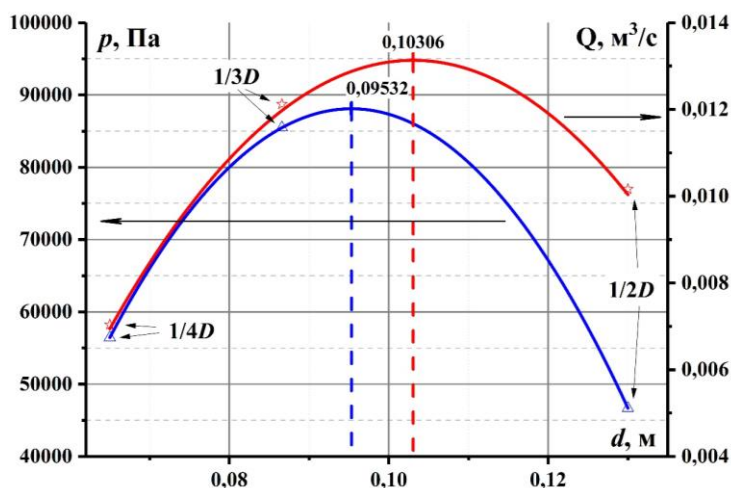
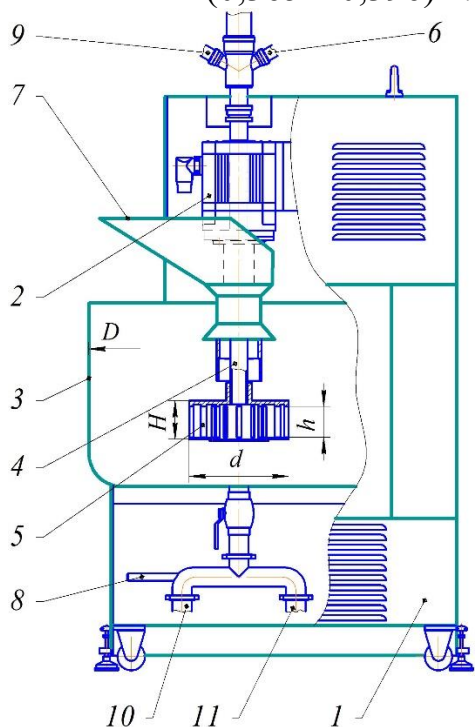


Рис. 18. Зміна тиску та об'ємних витрат

Так збільшення діаметру ротора більше 0,1 м не є доцільним, через те, що воно не дає суттєвого зменшення питомої енергії.

Графіки наведені на рис. 18 вказують на те, що максимальне значення тиску p буде створюватися при діаметрі ротора $d = 0,095$ м, тоді як максимальне значення об'ємних витрат Q наступають при $d = 0,103$ м. Таким чином результатами досліджень встановлено, що оптимальні експлуатаційні характеристики роторного змішувача знаходяться у діапазоні абсолютних значень від 0,095 до 0,103 м його зовнішнього діаметру d , відповідно у відносних числах цей діапазон буде становитиме $(0,365 \dots 0,396)D$.



Промисловий варіант запропонованого обладнання наведено на рис. 19. Геометричні розміри основних конструктивних елементів якого будуть залежати від заданої продуктивності та структурно-механічних характеристик суміші, що виробляється.

Рис. 19. Конструкційна схема машини для приготування рідких водно-борошняних сумішей:

1 – корпус; 2 – електродвигун із порожнистим валом; 3 – чаша; 4 – вертикальний полий вал; 5 – ротор; 6 – патрубок для борошна; 7 – воронка; 8 – перемикач з електроприводом; 9 – патрубок для мийного розчину; 10 – патрубок для виходу продукту; 11 – патрубок для виходу мийного розчину

ВИСНОВКИ

На підставі узагальнення теоретичних і експериментальних досліджень обґрунтовано доцільність і технологічну можливість використання інтенсивного механічного оброблення ВБС запропонованим роторним робочим органом з визначеними оптимальними параметрами, які забезпечують ефективну роботу.

Аналіз отриманих результатів досліджень дав можливість зробити такі висновки:

1. Проведений огляд інформаційних джерел показав, що у результаті змішування створюється турбулентний режим руху рідини, але створити високу турбулентність по всьому об'єму апарату зазвичай не вдається. Тому в машинах прагнуть до того, щоб вся рідина пройшла через зони, де турбулентність найбільш інтенсивна. Встановлено, що ефективність змішування залежить як від ступеня турбулентності, так і від інтенсивності циркуляції, яка визначається часом, необхідним для того, щоб вся рідина пройшла через певний перетин.

2. Доведено доцільність використання для змішування водно-борошняних сумішей робочого органу роторного типу, що підтверджується досягненням високого рівня концентрації дисперсної фази у дисперсійному середовищі уже на 15 секунді процесу.

3. Запропонована конструкція робочого органу змішувальної машини вирішує задачу створення високоефективного змішувача з нестационарними потоками речовини, що у силу своєї циклічності призводить до створення пульсаційного ефекту, який активізує процес змішування компонентів суміші. Поряд із цим виконується перенос процесу змішування у середину ротора, у якому можна створити прогнозовані та контрольовані сприятливі кінематичні умови оброблення.

4. Побудовані аналітичні залежності розподілу швидкостей, об'ємних витрат, крутного моменту та роботи на змішування від геометричних і кінематичних характеристик робочого органу та структурно-механічних характеристик суміші, які дають можливість визначити раціональні геометричні і кінематичні параметри під час конструювання високоефективного змішувального обладнання.

5. Запропоновано рівняння енергетичного балансу приводу змішувача:

$$P = \frac{2\omega\tau_0 HR_2^2}{b-1} (\pi S e n^{-1} + \ln \sqrt{b}) + \frac{2\pi K z_{\kappa} r^{2+n} \omega^{n+1} h^{1-n}}{n-1}$$

та знайдено вплив ексцентрикового розташування внутрішнього циліндра ротора на гідродинамічні параметри, зокрема пульсаційного тиску:

$$p_{\pi}(\varphi) = \frac{6\eta R \lambda \sin \varphi}{\varepsilon^2 (\lambda^2 - 1)(\lambda \cos \varphi - 1)} \left(\omega R + \frac{Q(3\lambda \cos \varphi + \lambda^2 - 4)}{\varepsilon h (\lambda^2 - 1)(\lambda \cos \varphi - 1)} \right).$$

6. Експериментально визначені структурно-механічні характеристики ВБС та встановлено вплив на них основних технологічних параметрів вологості та температури. Доведено вплив кінематичних та геометричних параметрів, а також положення робочого органу у середині змішувальної чаші на зміну активної потужності приводу.

7. На основі експериментальних досліджень отримано критеріальне рівняння, що описує залежність енергетичних витрат приводу змішувача від його основних параметрів:

$$P = 149,4 Re^{-1,369} K_Q^{-0,11} K_t^{4,739} \rho \omega^3 d^4 h.$$

Отримане рівняння є адекватним реальному процесу, розходження складо не більше 15 %.

8. Розроблено метод що дає можливість визначати кількість введеної механічної енергії необхідної для досягнення певної консистенції готового продукту.

Встановлено раціональний час готовності (72,6 с) водно-борошняної суміші.

9. Визначені оптимальні експлуатаційні характеристики роторного змішувача, що мінімізують енергетичні витрати, створюють максимальні робочі тиски та підтримують продуктивність в межах заданої. Такими параметрами є діаметр робочого органу d , діапазон розмірів якого буде становитиме $(0,365 \dots 0,396)D$, величина ексцентриситету $e = 0,007$ м та швидкість його обертання – 1500 об/хв.

10. Результати досліджень впроваджені на ПАТ “Київхліб” та у навчальний процес Національного університету харчових технологій і використовуються під час виконання кваліфікаційних робіт ОС бакалавр, магістр та на практичних заняттях із дисциплін “Технологічне обладнання харчових виробництв” і “Процеси та обладнання фармацевтичних виробництв” для студентів спеціальності “Галузеве машинобудування” фахового спрямування “Інженерія харчових виробництв” та “Інженерія фармацевтичних виробництв”.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях:

1. Dolomakin, Y. Simulation of liquid dough mixing in the machine with the rotor unit // *Ukrainian Journal of Food Science*. – 2016. – Volume 4, Issue 1. – pp. 120-130 (стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз *Google Scholar*, *Index Copernicus*, *DRJI*, *Universal Impact Factor*, *EBSCO*, *Directory of Open Access scholarly Resources*).

2. Доломакін, Ю.Ю. Вплив температури на реологічні характеристики рідкої пшеничної опари // *Наукові праці НУХТ*. – 2016. – Том 22, № 1. – С. 129-136 (стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз *Index Copernicus*, *EBSCOhost*, *CABI full text*, *Universal Impact Factor*, *Google Scholar*).

3. Доломакін, Ю.Ю. Тривалість основних етапів приготування рідкої опари, визначена непрямим методом / Ю.Ю. Доломакін, І.Г. Бабанов, І.В. Житнецький // *Збірник наукових праць ХДУХТ*. – Харків: ХДУХТ, 2016. – Вип. І(23), с. 201-211 (стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз *Index Copernicus*, *Google Scholar*, *Academic resource index ResearchBib*, *Directory of Open Access scholarly Resources*).

4. Dolomakin, Y. Determination of the main stages of mixing wheat sourdough relative method // *Journal of food and packaging science, Technique and Technologies*. – 2016. – Year V, № 9. – pp. 49-54 (стаття у закордонному виданні).

5. Доломакин, Ю. Исследование структурно-механических характеристик жидкой пшеничной опары // *Научные трудове университет по хранителни технологии*. – Пловдив, 2015. – Т. LXII. – С. 101-104 (стаття у закордонному виданні).

6. Доломакін, Ю.Ю. Вплив вологості на структурно-механічні характеристики рідкої пшеничної опари // «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв»: *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. – Харків, 2015. – Вип. 166. – С. 104-111 (стаття у науковому фаховому виданні України).

7. Доломакін, Ю.Ю. Вплив конструктивних та кінематичних параметрів змішувача на витрати потужності при приготуванні рідкої пшеничної опари // *Хранение и переработка зерна*. – 2016. – № 3. – С. 47-52 (стаття у фаховому виданні України).

8. Dolomakin, Y. Influence of eccentricity of internal rotor's cylinder for mixing water-flour mixture on its kinematic and dynamic parameters / Y. Dolomakin, I. Babanov, A. Shevchenko, I. Babkina // *Scientific Letters of Academic Society of Michal Baludansky*. – 2017. – Volume 5, Issue 4. – pp. 26-29 (стаття у закордонному виданні).

9. Доломакин, Ю.Ю. Определение величины энергии затрачиваемой на разрушение структуры пшеничной опары / Ю.Ю. Доломакин, И.Н. Литовченко // *Научни трудове Русенски университет "Ангел Кънчев"*. – 2015. – Т. 54, серия 2. – С. 51-54 (стаття у закордонному виданні).

Особистий внесок до п. 3, 8 та 9: проведення експериментів, формулювання результатів і висновків, підготовка матеріалів до друку.

Патенти на винаходи та корисні моделі України:

10. Патент України на винахід №113459, МПК А21С 1/02 В01F 7/28 В01F 3/12; Пристрій для змішування рідких напівфабрикатів / Ю.Ю. Доломакін, І.М. Литовченко; заявник НУХТ. – № а 2015 06029; Заявлено 18.06.2015; Опубліковано 25.01.2017, бюл. №2.

11. Патент України на винахід №113924, МПК А21D 8/02 А21С 1/00; Спосіб приготування опари/ Ю.Ю. Доломакін, І.М. Литовченко; заявник НУХТ. – № а 2015 12277; Заявлено 11.12.2015; Опубліковано 27.03.2017, бюл. №6.

12. Патент на корисну модель №103656 UA, МПК В01F 3/12 (2006.01) В01F 7/16 (2006.01) А21С / (2006.01) Пристрій для змішування рідких напівфабрикатів / Доломакін Ю.Ю., Литовченко І.М.; заявник Національний університет харчових технологій. – № u 21509039; Заявл. 18.06.2015; Опубл. 25.12.2015, Бюл. № 24, 2015 р.

13. Патент на корисну модель №107829 Україна МПК А21D 8/02 Спосіб приготування опари / Ю.Ю. Доломакін, І.М. Литовченко; заявник НУХТ. – № u201512278 Заявл. 11.12.15, Опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12.

Особистий внесок до п. 11, 12, 13 та 14: патентний пошук, розроблення конструкції обладнання, підготовка матеріалів до патентування.

Матеріали та тези конференцій:

14. Доломакин Ю. Выбор рабочего органа смесителя при интенсивном замесе жидких опар / Межд. научно-практическая конференция, 17 апреля 2015 г., г. Кутаиси, Грузия. – Кутаиси: ГУАЦ, 2015. – С. 469-471.

15. Dolomakin Y.Y. Searching for the limit yield stress of liquid sourdough // *Збірник наукових праць молодих учених, аспірантів та студентів ОНАХТ*. – Одеса: 2016. – с. 43-44.

16. Доломакин Ю.Ю. Определение динамических характеристик смесителя для приготовления жидких хлебопекарных опар / Ю.Ю. Доломакин, Ю.С. Теличкун // X международная научно-практическая конференция, 28-29 апреля 2016 г. Беларусь. – Могилев: МГУП, 2016. – С. 275.

17. Доломакін, Ю.Ю. Реологічні моделі харчових суспензій / Ю.Ю. Доломакін, І.Г. Бабанов, І.В. Житнецький // Міжнародна науково-практична конференція, 19 травня 2016 р., м. Харків / Харківський державний університет харчування та торгівлі. – Харків: ХДУХТ, 2016. – Ч.1. – С. 278-280.

18. Доломакин Ю.Ю. Определение динамических характеристик смесителя // XI международная научно-практическая конференция, 20-21 апреля 2017 г. Беларусь. – Могилев: МГУП, 2017. – С. 262.

19. Доломакін, Ю.Ю. Пристрій для приготування рідких хлібопекарських напівфабрикатів / Ю.Ю. Доломакін, І.М. Литовченко // Міжнародна наукова конференція, присвячена 130-річчю НУХТ, 13-17 жовтня 2014 р. – К.: НУХТ, 2014. – С. 383.

20. Доломакін, Ю.Ю. Структурно-механічні характеристики рідких хлібопекарських опар // IV Міжнародна спеціалізована науково-практична конференція, 8 вересня 2015 р., м. Київ. – К.: НУХТ, 2015. – С. 59-61.

21. Доломакін, Ю.Ю. Встановлення раціональних параметрів процесу сумішоутворення рідких пшеничних опар / Ю.Ю. Доломакін, І.М. Литовченко // 81-а міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ ст.», 23-24 квітня 2015 р., К.: НУХТ, 2015. – Ч.2. – С. 50.

22. Доломакін, Ю. Роторний змішувач для приготування рідкої пшеничної опари // 82-а міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів “Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті”, 13-14 квітня 2016 р. – К.: НУХТ, 2016 р. – Ч.2. – С. 48.

23. Dolomakin, Y. The device for the interfusing of liquid semi-finished products / *8th Central European Congress on Food 2016 – Food Science for Well-being (CE-Food 2016): Book of Abstracts.* – 23-26 May 2016. – К.: NUFT, 2016. – p. 234.

24. Доломакін, Ю.Ю. Вплив ексцентриситету на витрати потужності роторного змішувача / Ю.Ю. Доломакін // V Міжнародна спеціалізована науково-практична конференція “Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції”, 14 вересня 2016 р., м. Київ. – К.: НУХТ, 2016. – С. 72-74.

25. Доломакін Ю.Ю. Вплив положення висоти ротора на витрати потужності змішувача / Ю.Ю. Доломакін // Міжнародна науково-практична конференція присвячена 65-річчю кафедри процесів і апаратів харчових виробництв НУХТ, 8-10 листопада 2016 р., – К.: НУХТ, 2016. – С. 190-191.

26. Доломакін, Ю. Вплив ексцентриситету на розподіл тиску у середині ротора змішувача // 83-а міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів “Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті”, 5-6 квітня 2017 р. – К.: НУХТ, 2017. – Ч. 2. – С. 34.

Особистий внесок до п. 16, 17, 19 та 21: проведення експериментальних досліджень, обробка отриманих даних, підготовка матеріалів до публікації.

АНОТАЦІЯ

Доломакін Ю.Ю. Наукове обґрунтування параметрів періодичного змішування водно-борошняних сумішей та створення високоефективного обладнання. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Національний університет харчових технологій, Київ, 2018.

Дисертацію присвячено моделюванню процесу змішування компонентів водно-борошняних сумішей і визначенню раціональних геометричних і кінематичних параметрів робочого органу змішувальної машини періодичної дії.

Отримані структурно-механічних характеристик суміші, дозволили побудувати функціональні залежності напруження зсуву і в'язкості суміші від швидкості

деформації, які використані в подальшому при аналітичному моделюванні процесу.

Побудовано аналітичні залежності розподілу швидкостей, об'ємної витрати, крутного моменту і витраченої потужності, які залежать від геометричних і кінематичних характеристик робочого органу та структурно-механічних характеристик суміші.

Доведено вплив кінематичних і геометричних параметрів, а також положення ротора в середині змішувальної чаші на зміну активної потужності приводу і встановлено раціональний час готовності водно-борошняної суміші.

Визначені оптимальні експлуатаційні характеристики роторного змішувача, що мінімізують енергетичні витрати, створюють максимальні робочі тиски та підтримують продуктивність не менше заданої. Такими параметрами є зовнішній діаметр робочого органу d , діапазон розмірів якого буде становитиме $(0,365 \dots 0,396)D$ та швидкість його обертання – 1500 об/хв.

Ключові слова: змішування, водно-борошняна суміш, змішувальна машина, моделювання, роторний робочий орган.

ABSTRACT

Dolomakin Y.Y. Scientific substantiation parameters of periodic mixing of water-flour mixtures and creation of highly effective equipment. - Manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.18.12 – Processes and equipment of food, microbiological and pharmaceutical productions. – National university of food technologies, Kyiv, 2018.

The thesis is devoted to modeling the process of mixing components of water-flour mixtures(WFM) and the definition of rational geometric and kinematic parameters of the working body of mixing machine periodic action.

An experimental setup was developed and physical modeling of the mixing process. Analysis of the structural and mechanical characteristics of the mixture by means of rotational viscosimetry made it possible to construct functional dependences of the viscosity shear stress of the mixture on the strain rate, which were used in further analytical modeling of the mixing process.

The expediency of using the proposed rotor-type construction for mixing is proved, which is confirmed by the graph of the change in the concentration of the dispersed phase in the dispersed medium already at about 15 seconds of the process.

At the heart of the proposed design of the working body, the task of creating a highly efficient mixer with non-stationary flows of matter, which by virtue of their cyclicity leads to the creation of a pulsating effect, which activates the process of mixing the components of the mixture. The second task that is performed is the transfer of the process into the interior of the rotor in which predictable and controlled favorable kinematic processing conditions can be created.

Analytic dependences of velocity distribution, volumetric flow, torque and power consumption on mixing are constructed, which depend on the geometric and structural-mechanical characteristics of the mixture and are recommended for use in the design of equipment.

Structural and mechanical characteristics of the WFM and the influence of the main technological parameters of humidity and temperature on them have been established. The influence of kinematic and geometric parameters, as well as the position of

the working organ in the middle of the mixing bowl on the change of the active drive power, has been experimentally proved and the rational time of readiness of the WFM has been established.

On the basis of experimental studies, a mathematical model has been constructed that describes the dependence of the energy costs of the mixer drive on its main parameters:

$$P = 149,4Re^{-1,369}K_Q^{-0,11}K_t^{4,739}\rho\omega^3d^4h,$$

the results of which showed the adequacy of the obtained analytical model, the discrepancy was not more than 15 %.

Optimal performance characteristics of the rotary mixer are minimized, minimizing energy costs, creating maximum operating pressures and maintaining productivity of at least the specified. Such parameters are the geometry of the working element, the range of which will be $(0,365\dots0,396)D$ and the speed of its rotation – 1500 rpm.

The influence of the pulsating pressure created inside the rotor, which depends on the eccentricity, is confirmed. At a value of $e = 0,007$ m, the average particle size of the solid phase and the agglomerate size will be the smallest, and their total quantity is greatest, which indicates the quality of the mixture obtained.

A method is proposed that allows determining the amount of mechanical energy input required to achieve the optimum consistency of the finished product.

The design of a device for mixing liquid semi-finished products has been developed. Unsteady flows of matter are combined in it, which, due to their cyclicity, lead to the creation of a pulsation effect, which activates the process of mixing the components of the mixture with the transfer of the process of the rotor, in which predictable and controlled.

The results of the research have been introduced into the educational process of NUFT, implemented in the production workshop No.4 of Private Joint Stock Company “Kyivkhib”, which is confirmed by the acts of introducing scientific research into production.

Keywords: mixing, water-flour mixture, mixing machine, modeling, rotary working element.