

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЦУКРУ ПРИ ПРОТИТЕЧІЙНО-СТРУМИННОМУ ЗМІШУВАННІ НАПОЇВ

Самойчук К. О., Полудненко О. В., Паляничка Н. О., Верхоланцева В. О., Петриченко С. В.

1. Вступ

В Україні великим попитом користуються солодкі безалкогольні напої. Сьогодні у технології їх виробництва спостерігається тенденція повернення до використання натуральної сировини. Раніше напої виготовлялись на основі натуральних соків з додаванням екстрактів та концентратів настоїв різноманітних зборів лікарських трав. Таким чином, при виготовленні солодких безалкогольних напоїв одним з основних процесів є перемішування рідких компонентів.

З огляду на зростаючі об'єми виробництва солодких безалкогольних напоїв, актуальними є розробка і впровадження у виробництво змішуючих апаратів, які забезпечать якісне перемішування рідких компонентів при мінімальних витратах енергії і часу.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом даного дослідження є процес перемішування рідких компонентів (а саме, води з купажним сиропом) при виготовленні солодких безалкогольних напоїв.

В залежності від методу підведення енергії в середовища, що перемішуються, перемішування може бути пневматичним, інерційним в потоці рідини, циркуляційним, механічним або струминним [1].

На підприємствах у переважній більшості застосовується механічне перемішування. Для цього використовують апарати з мішалками періодичної дії. Процеси перемішування в таких апаратах є достатньо добре вивченими. Відомо багато різноманітних конструкцій апаратів з мішалками. Розроблено технологічні процеси з їх виготовлення і налагоджено їх виробництво. Поряд з цими явними перевагами апарати з мішалками мають і значні недоліки. Для досягнення одного і того ж технологічного ефекту в апаратах з мішалками витрачається більше часу і енергії на перемішування ніж в струминних змішувачах безперервної дії. Якщо у звичайних апаратах час перебування обчислюється в хвилинах, то в апаратах безперервної дії – в секундах. Ступінь і ефективність перемішування тут дуже високі внаслідок підведення значних потужностей до невеликого об'єму.

Струминне перемішування являє собою передачу кінетичної енергії одного потоку іншому потоку шляхом безпосереднього контакту (змішування). Підвищення тиску інжектваного потоку без безпосередніх затрат механічної енергії є основною, принциповою якістю струминних апаратів. Завдяки цій якості використання таких апаратів у багатьох галузях виробництва дозволяє

отримувати більш прості і надійні технічні рішення порівняно з використанням інших змішувальних пристроїв. Тому струминне перемішування було виділено як найбільш ефективний та перспективний спосіб змішування рідких компонентів.

Процес змішування рідин у протитечійно-струминних змішувачах на сьогоднішній день є практично не дослідженим.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – експериментальне визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів процесу протитечійно-струминного змішування води з купажем сиропом для отримання необхідної концентрації цукру в готовому продукті.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

1. Визначити фактори процесу протитечійно-струминного змішування напоїв та межі їх варіювання.
2. Розробити експериментальну установку для дослідження процесу протитечійно-струминного змішування та обґрунтувати методику експериментальних досліджень.
3. Визначити оптимальні умови для виготовлення солодкого напою «Лимонад» із використанням сиропу на основі цукру.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Струминні змішувачі стали альтернативою більш дорогим у використанні змішувачам з мішалками більше 50 років тому. Вони мають значні переваги над апаратами з мішалками. Струминні змішувачі не мають рухомих частин, а значить потребують значно менших витрат на технічне обслуговування. Їх значно легше встановлювати ніж механічні мішалки. Мішалки, як правило, встановлюють у верхній частині резервуару, а для цього потрібні більш товсті стінки з більш міцних матеріалів. У біохімічних процесах бажано використовувати струминні змішувачі, тому що вони потребують значно менших витрат на їх обслуговування і стерилізацію ніж апарати з мішалками.

Дослідження струминного змішування рідин є складним процесом. Встановлення необхідних фізичних величин процесу змішування в лабораторних умовах є дуже проблематичним. Отримання деяких даних процесу є зовсім неможливим, тому звертаються до симуляції процесу в програмному комплексі ANSYS. В проаналізованих роботах представлені результати комп'ютерного моделювання [2–5] і експериментальних досліджень [6, 7] процесу струминного змішування рідин в резервуарі. Результати експериментальних досліджень підтверджують вірність залежностей, отриманих при моделюванні процесу в програмному комплексі.

Протитечійно-струминне змішування є одним з різновидів струминного змішування. При розробці конструкції протитечійно-струминного змішувача також було застосовано комп'ютерне моделювання процесу у змішувачі.

У науково-практичних роботах [8–12] представлені різні конструкції струминних змішувачів, які можуть бути використаними при виготовленні солодких безалкогольних напоїв.

Серед конструкцій струминних змішувачів, найбільш ефективними є:

- гідродинамічний змішувач [10];
- багатоконусний струминний апарат [12].

Перевагою гідродинамічного змішувача є висока продуктивність перемішування при достатньо простій конструкції. Недоліком – необхідність попередньо з'єднувати компоненти у ємності для забезпечення необхідної концентрації розчину, тобто при виготовленні напоїв він буде працювати як змішувач періодичної дії.

Багатоконусний струминний апарат забезпечує якісне перемішування рідин. Дозволяє з високою точністю регулювати кількість підмішуваного компоненту. Але він має більш складну конструкцію (а значить меншу надійність), ніж гідродинамічний змішувач. Також енерговитрати є надмірними.

Для різних конструкцій струминних змішувачів проведені експериментальні дослідження і визначено велику кількість залежностей, але ці залежності не є універсальними і не можуть бути використаними для будь-якого струминного змішувача.

На сьогоднішній день найбільш дослідженим є процес струминного перемішування в резервуарі. Стосовно виготовлення солодких безалкогольних напоїв змішування в резервуарі має ряд недоліків. Таке змішування має періодичний характер. Інтенсивне перемішування компонентів відбувається тільки в одній зоні, близькій до сопла змішувача. У всіх інших зонах змішування відбувається із значно меншою інтенсивністю. Для забезпечення однорідності суміші (концентрації розчину) у всьому резервуарі необхідне багаторазове проходження рідини через зону інтенсивного змішування. Це призводить до небажаних витрат енергії і часу на перемішування.

Ця робота є складовою частиною циклу статей, присвячених струминному змішуванню рідких компонентів. В попередніх роботах було обґрунтовано спосіб перемішування [13]. Представлено конструкцію змішуючого апарату, конструктивні особливості якого захищені патентом України на корисну модель [14]. Визначено метод оцінювання якості перемішування [15]. В програмному комплексі ANSYS Workbench проведено моделювання процесу змішування рідин в розробленому змішувачі і теоретично визначено відстань між соплами форсунок (один з найважливіших конструктивних параметрів) [16].

Внаслідок великої кількості факторів та недостатності апріорної інформації про об'єкт дослідження було проведено пошуковий експеримент [17]. Результати експерименту дозволили встановити оптимальний діапазон варіювання факторів основного експерименту: тиск подачі основного компоненту (води) 1,2–5 атм; напір подачі підмішуваного компоненту (купажного сиропу) 0,3–0,5 м; відстань між соплами форсунок 16–24 мм.

5. Методи досліджень

В результаті проведених раніше аналітичних досліджень існуючих струминних змішувачів [13] було розроблено конструкцію протитечійно-струминного змішувача [14].

Схему розробленої конструкції змішувача представлено на рис. 1.

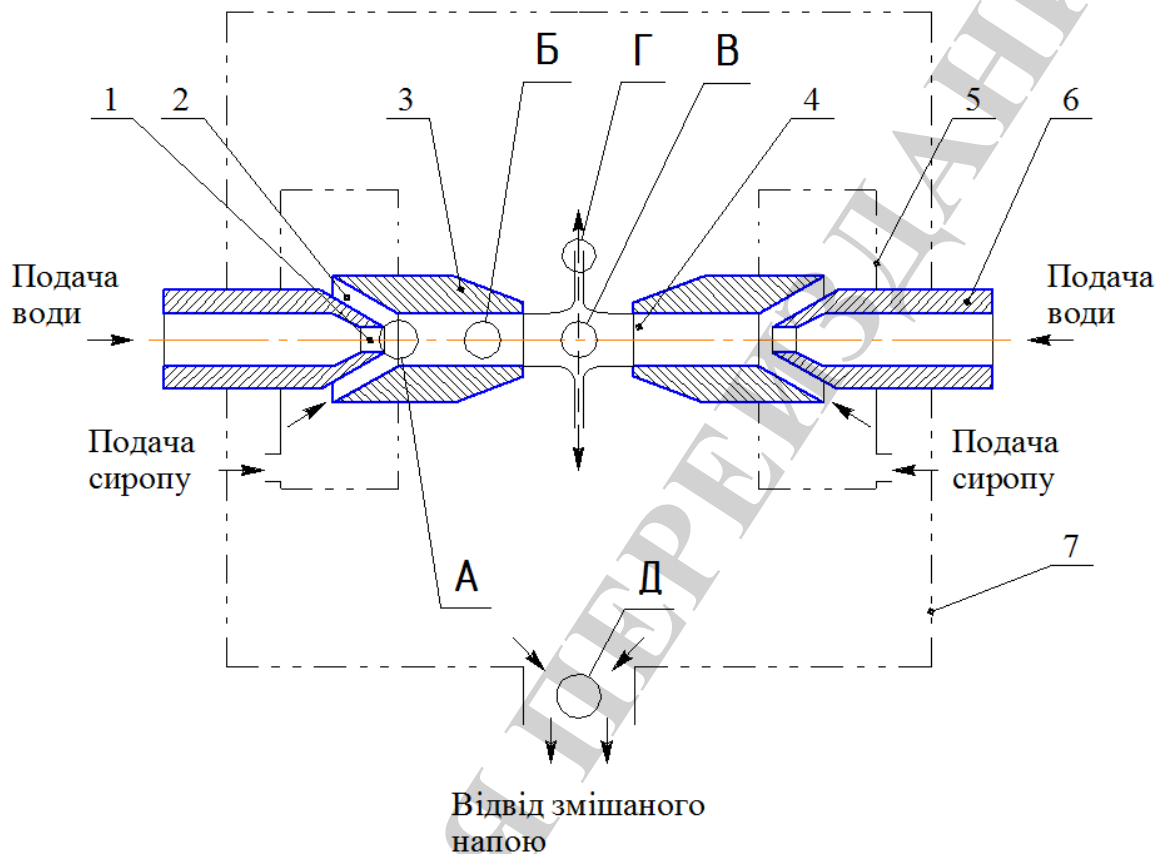


Рис. 1. Схема протитечійно-струминного змішувача рідин: 1 – робоче сопло; 2 – приймальна камера; 3 – камера змішування; 4 – сопло камери змішування; 5 – камера подачі сиропу; 6 – робочий патрубок; 7 – камера збору рідини. А, Б, В, Г, Д – зони змішування

Змішувач являє собою два струминні апарати, розташовані співвісно один до одного (рис. 1). Вихідні циліндричні сопла цих апаратів формують зустрічні струмені рідини, які після зіткнення утворюють характерне, візуально симетричне «віяло», яке має назву пелена [18]. Співвісні струминні апарати розташовані у камері 7, де збирається рідина і відводиться зі змішувача.

Кожний струминний апарат складається з робочого патрубку 6 та камери змішування 3. Основний компонент (вода) подається у робочий патрубок кожного струминного апарату, робоче сопло 1 яких формує струмені води. Підмішуваний компонент (сироп) подається з камер подачі сиропу (5) у зазор приймальної камери 2. Швидкісні потоки води на вході камери змішування захоплюють підмішуваний компонент. В камері змішування відбувається вирівнювання швидкостей води та підмішуваного компонента. На виході з сопел камер змішування 4 відбувається зіткнення струменів змішаних компонентів.

Змішування починається з вхідної ділянки камери змішування і відбувається безперервно до виходу суміші зі змішувача. Найбільш інтенсивно цей процес протікає при захопленні підмішуваного компонента водою. А також при формуванні потоку в камері змішування (зона А) та при русі у камері змішування (зона Б). У цих зонах відбувається змішування води та підмішуваного компонента, які подаються в один струминний апарат. При зіткненні потоків (зона В), змішуванні у пелені (зона Г) і зборі рідини та відведенні з камери збору (зона Д) відбувається змішування потоків компонентів правого та лівого струминних апаратів.

Головним чинником змішування в зонах А і Б є турбулентність і турбулентні пульсації рідин основного та підмішаного компонентів. У зонах В, Г і Д змішування відбувається за рахунок взаємопроникнення потоків, струменів і шарів компонентів.

Для проведення експериментальних досліджень процесу змішування води з купажним сиропом було розроблено і виготовлено експериментальну установку. Загальний вид експериментальної установки представлений на рис. 2.



Рис. 2. Експериментальна установка: 1 – вихровий насос; 2 – манометр; 3 – канал подачі основного компонента (води); 4 – ємність з підмішуваним компонентом (сиропом); 5 – канал підведення підмішуваного компонента; 6 – протитечійно-струминний змішувач; 7 – канал відведення змішаного продукту; 8 – кондуктометр

На рис. 2 вихровий насос 1 створює необхідний тиск подачі основного компонента. Контроль тиску здійснюється за допомогою манометру 2. По каналу підводу основного компонента 3 вода надходить у протитечійно-

струминний змішувач 6. Підмішуваний компонент потрапляє до змішувача з ємності 4 через канал підведення 5. Після змішування у протитечійно-струминному змішувачі змішаний продукт відводиться через канал 7.

З огляду на результати аналітичних досліджень і пошукового експерименту [17, 18] для проведення основного експерименту були визначені такі границі варіювання факторів:

– відстань між соплами форсунок (нижня границя 8 мм, верхня – 24 мм, крок зміни фактору – 8 мм);

– тиск подачі води (нижня границя 0,12 МПа, верхня – 0,36 МПа, крок зміни фактору – 0,12 МПа);

– напір подачі купажного сиропу (нижня границя 150 мм, верхня – 450 мм, крок зміни фактору – 150 мм).

Експериментальні дослідження проводились за такою методикою: основа, якою виступає водопровідна вода ГОСТ 2874-82 температурою 20 °С (290 °К) і щільністю 1000 кг/м³, подається в ежектор під тиском. При проходженні крізь ежектор кінетична енергія потоку води підвищується, а потенційна знижується до створення розрідження, що досягає максимального значення у місці найбільшого звуження потоку, тобто на виході з ежектора. В камеру вводу підмішуваного компоненту підводиться купажний сироп «Лимонад» на основі цукру 20 °С (290 °К) і щільністю 1229 кг/м³ під атмосферним тиском (0,1 МПа).

При проходженні струменя води крізь камеру вводу підмішуваного компоненту, у потік води ежекується купажний сироп. При проходженні струменя крізь форсунку відбувається попереднє змішування основного компоненту з підмішуваним, а при зіткненні струменів відбувається остаточне змішування рідких компонентів.

Розмір приймальних камер змінюється осьовим переміщенням робочих патрубків і при проведенні досліджень розміри обох камер фіксуються однаковими. Відстань між соплами форсунок змінюється осьовим переміщенням форсунок в напрямних втулках.

Тиск подачі води створюється за допомогою вихрового насосу (виробник KENLE, Китай, $H_{\max}=50$ м, $Q_{\max}=50$ л/хв). Тиск змінюється за допомогою обертового крану. Контроль тиску подачі води в змішувач здійснюється за допомогою манометру МПЗ-У, Росія. Згідно з ГОСТ 2405-88 межі вимірювання 0–10 кгс/см² (0–1,0 МПа), 0,2 атм.

Напір купажного сиропу при подачі його в приймальну камеру змінюється встановленням ємності з купажним сиропом на необхідній висоті відносно осі форсунок змішувача.

Визначення концентрації купажного сиропу в змішаному розчині здійснюється за допомогою ареометру-цукроміру АС-3, Україна (ГОСТ 18481-81, 0–25 %; 0,5 %).

6. Результати досліджень

За інструкцією концентрація цукру у готовому напої «Лимонад» повинна бути $9,5 \pm 0,2$ %.

Залежності зміни концентрації цукру від тиску подачі води при напорі купажного сиропу 150–450 мм і величині кільцевого зазору в приймальній камері 0,9 мм представлені на рис. 3. Вони показують, що при тиску подачі води 1,2 атм і напорі подачі сиропу 150 мм концентрація сиропу в готовому розчині є однаковою – 3,5 %.

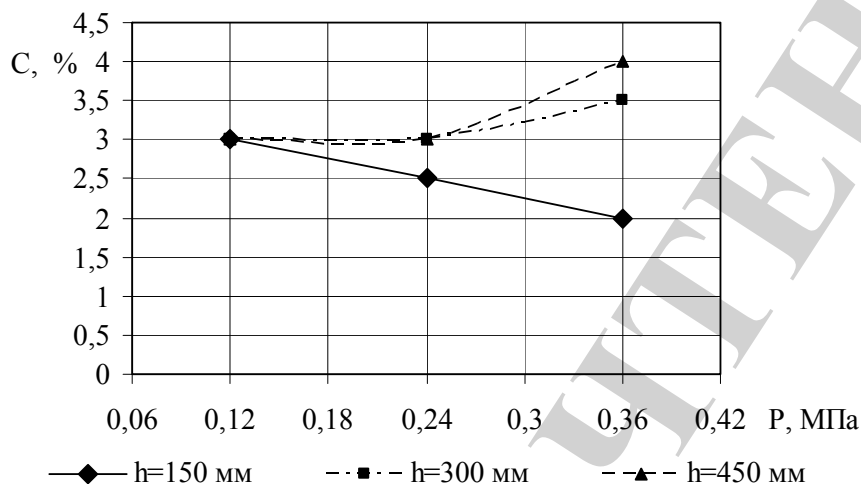


Рис. 3. Залежність концентрації сиропу С в змішаному розчині від тиску подачі води Р при напорі купажного сиропу 150–450 мм і величині кільцевого зазору в приймальній камері 0,9 мм. Діаметр сопла форсунки 8 мм, відстань між форсунками 24 мм

При напорі подачі сиропу 150 мм із зростанням тиску подачі основного компоненту – води, частка сиропу в розчині зменшується. Це відбувається внаслідок збільшення подачі води у більшому ступені ніж підвищення напору подачі сиропу, що призводить до зменшення його концентрації в готовому розчині (від 3,5 до 2 %).

При напорах подачі сиропу більше 300 мм із зростанням тиску подачі води зростає концентрація сиропу в розчині. При такому напорі сиропу із зростанням тиску подачі води зростає кількість інжектваного в розчин сиропу (із зростанням подачі води зростає кількість сиропу, захопленого основним потоком) – від 3,5 до 4 %.

При напорі подачі сиропу 450 мм зростання концентрації сиропу в готовому розчині відбувається більш інтенсивно – від 3,5 до 4,5 %.

Але така концентрація сиропу в готовому розчині є занадто низькою для солодкого напою «Лимонад».

Залежності зміни концентрації від тиску подачі води при напорі купажного сиропу 150–450 мм і величині кільцевого зазору в приймальній камері 1,8 мм представлені на рис. 4. Вони показують, що при зростанні тиску подачі основного компоненту і підвищенні напору зростає концентрація підмішуваного компоненту в готовому розчині. Ця залежність близька до лінійної. Це свідчить про те, що величина кільцевого зазору 1,8 мм достатня для функціонування вузла ежекції у дослідному діапазоні напору подачі сиропу у нормальному режимі.

При зміні напору з 150 до 450 мм, концентрація збільшується з 8,5 до 10 % (на 16 %), а при підвищенні тиску з 1,2 до 3,6 атм – на 40 %. Тобто вплив тиску подачі води справляє більш вагомий внесок, ніж напір подачі сиропу.

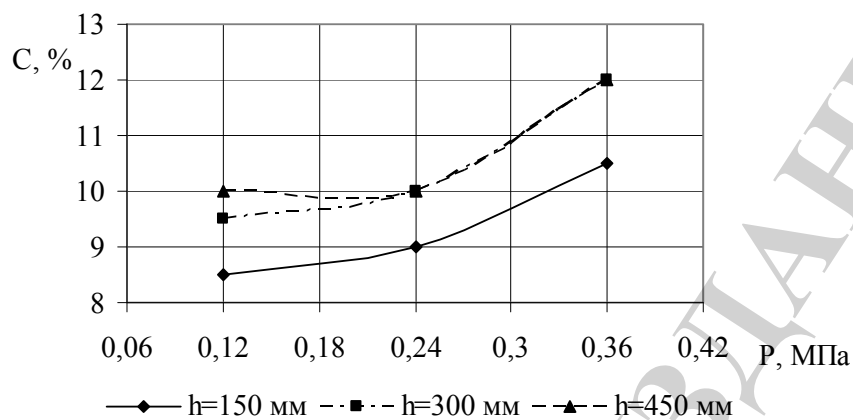


Рис. 4. Залежність концентрації сиропу C в змішаному розчині від тиску подачі води P при напорі купажного сиропу 150–450 мм і величині кільцевого зазору в приймальній камері 1,8 мм. Діаметр сопла форсунки 8 мм, відстань між форсунками 24 мм

Така концентрація сиропу в готовому розчині є достатньою для виготовлення солодкого напою «Лимонад». Забезпечити необхідну концентрацію можливо регулюванням тиску подачі води, зазором в камері подачі підмішуваного компонента або напором подачі сиропу.

Залежності зміни концентрації сиропу від тиску подачі води величині кільцевого зазору в приймальній камері 2,7 мм представлені на рис. 5. Вони показують, що при зростанні тиску подачі основного компонента концентрація підмішуваного компонента в готовому розчині знижується.

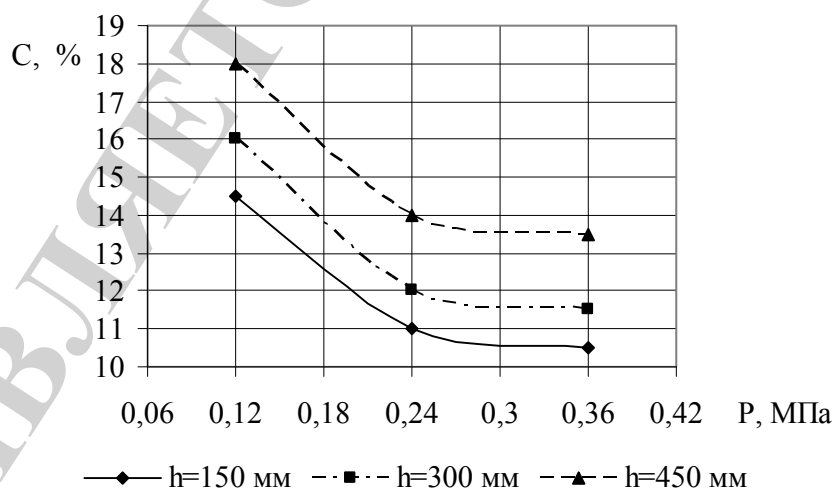


Рис. 5. Залежність концентрації сиропу C в змішаному розчині від тиску подачі води P при напорі купажного сиропу 150–450 мм і величині кільцевого зазору в приймальній камері 2,7 мм. Діаметр сопла форсунки 8 мм, відстань між форсунками 24 мм

Високі значення концентрації сиропу в готовому розчині зумовлені збільшеним зазором в камері подачі підмішуваного компонента.

Із зростанням тиску подачі основного компонента зростає швидкість руху потоку. Два співвісних струменя, що витікають з форсунок, стикаються, що призводить до підвищення тиску у зоні зіткнення. Відтак перепад тисків Δp зменшується, це призводить до зменшення коефіцієнту інжекції.

Аналіз залежностей, побудованих за результатами проведених експериментальних досліджень показує, що для виготовлення солодкого напою «Лимонад» із використанням сиропу на основі цукру (50%), діаметрі сопла форсунки 8 мм оптимальними умовами є:

- відстань між форсунками 24 мм;
- напір подачі купаного сиропу 200–450 мм;
- тиск подачі води 3,5–4 атм.

Отримані дані є необхідною основою для подальших досліджень і проектування експериментальних зразків протитечійно-струминного змішувача напоїв. Вони також можуть бути корисними при розробці протитечійно-струминних змішувачів рідких компонентів інших галузей народного господарства.

7. SWOT-аналіз результатів дослідження

Strengths. Серед сильних сторін даного дослідження необхідно відзначити те, що досліджено одночасно вплив практично всіх факторів, що впливають на процес змішування:

- тиск подачі води;
- напір купажного сиропу;
- величина кільцевого зазору в приймальній камері;
- відстань між форсунками.

Вплив останнього фактору вкрай важко визначити за допомогою аналітичних досліджень.

Впровадження у виробництво протитечійно-струминних змішувачів безперервної дії дозволить значно знизити вартість виробництва солодких напоїв.

У порівнянні з апаратами періодичної дії (апаратами з мішалками, струминними змішувачами для змішування в резервуарі) протитечійно-струминні змішувачі мають значно меншу енерго- і матеріалоемність. Їх габарити значно менші.

Протитечійно-струминні апарати є більш надійними, ніж апарати з мішалками. Це зумовлено відсутністю рухомих частин. Завдяки простоті конструкції вони значно дешевші та легші в обслуговуванні.

На відміну від струминних змішувачів в резервуарі, протитечійно-струминні змішувачі мають безперервний спосіб дії. При значно менших габаритах забезпечують більш інтенсивне перемішування.

Weaknesses. Слабкі сторони даного дослідження пов'язані з невідповідністю температурних показників змішуваних рідин. При виготовленні солодких газованих безалкогольних напоїв для кращого розчинення в напої двоокису вуглецю воду охолоджують до 4 °С, а експериментальні дослідження проводились при температурі води 20 °С.

У подальшому необхідно провести дослідження впливу температури змішуваних компонентів на процес змішування. Також необхідно провести дослідження якості перемішування у протитечійно-струминному змішувачі.

Хоча сьогодні і відбувається повернення до виробництва напоїв на основі цукру (що є більш здоровим продуктом) все ж переважна більшість солодких напоїв виготовляється на основі підсолоджувачів. Використання підсолоджувачів, таких як аспартам, сахарин, тощо, надає концентрату напою (тобто підмішуваному компоненту) інших фізичних властивостей. Наприклад, концентрат на основі підсолоджувачів має набагато нижчу щільність ніж цукровий купажний сироп. Тому необхідні подальші дослідження для визначення конструктивно-технологічних параметрів протитечійно-струминного змішувача для виготовлення напоїв на основі підсолоджувачів.

Opportunities. Процес перемішування рідких компонентів – широко розповсюдженій технологічний процес у багатьох галузях народного господарства. Результати проведених досліджень можуть бути корисними при розробці протитечійно-струминних змішувачів рідких компонентів для інших галузей (наприклад для приготування маточних розчинів, що використовуються в рослинництві та тваринництві, тощо). При впровадженні такого змішувача в виробництво зменшиться собівартість виробництва продукції та підвищиться продуктивність технологічної лінії виробництва напоїв. Це відбудеться за рахунок збільшення продуктивності та зменшення енерговитрат,

Threats. Значних складнощів у впровадженні в виробництво отриманих результатів досліджень не передбачається, але можливі ускладнення в лініях виробництва напоїв, де використовуються лопатеві мішалки. Вони можуть бути пов'язані з:

- кардинальною зміною принципу змішування у новому обладнанні;
- необхідністю узгодження продуктивності розробленого струминного змішувача з продуктивністю попередньої машини у лінії виробництва напоїв;
- можливістю підвищеного утворення піни при використанні деяких видів натуральної сировини у рецептурному складі напоїв;

При впровадженні протитечійно-струминного змішувача підприємство понесе додаткові витрати, пов'язані з:

- потребою встановлення додаткових фільтрів грубого очищення перед струминним змішувачем, які необхідні для стабільного функціонування розробленого апарату;
- можливою потребою у встановленні автоматизованої системи контролю та керування вмістом сиропу у напоях.

Таким чином, SWOT-аналіз результатів досліджень дозволяє окреслити основні напрямки для успішного досягнення мети досліджень. Ними є:

- визначення якості змішування рідин у протитечійно-струминному змішувачі;
- визначення конструктивно-технологічних параметрів змішувача при змішуванні води з концентратом на основі підсолоджувачів;
- визначення впливу температури на якість перемішування рідких компонентів у протитечійно-струминному змішувачі.

8. Висновки

1. Визначено фактори процесу протитечійно-струминного змішування напоїв і границі їх варіювання:

- відстань між соплами форсунок (8–24 мм);
- тиск подачі води (0,12–0,36 МПа);
- напір подачі купажного сиропу (150–450 мм);
- зазор у приймальній камері (0,9–2,7 мм).

2. Розроблено і виготовлено експериментальну установку, яка дозволяє досліджувати вплив основних факторів на концентрацію сиропу у готовому продукті. Обґрунтовано методику експериментальних досліджень процесу змішування води з купажним сиропом у протитечійно-струминному змішувачі та підібране необхідне вимірювальне обладнання.

В результаті аналізу отриманих експериментальних даних визначено, що найсуттєвішим фактором впливу на концентрацію цукру в змішаному продукті є відстань між форсунками. Найменший вплив має напір подачі купаного сиропу. Відмічено дуже тісний зв'язок таких факторів, як величина зазору в приймальній камері і тиск подачі води. Причиною цього є підвищення тиску у зоні зіткнення співвісних струменів, що призводить до зменшення перепаду тиску на вході та виході з форсунок і, як наслідок, до зменшення коефіцієнту інжекції.

3. Встановлено, що для виготовлення солодкого напою «Лимонад» із використанням сиропу на основі цукру (вміст цукру в сиропі 50 %), діаметрі сопла форсунки 8 мм оптимальними умовами є:

- відстань між форсунками 24 мм;
- напір подачі купаного сиропу 200–450 мм;
- тиск подачі сиропу 3,5–4 атм.

Отримані дані є необхідною основою для подальших досліджень і проектування експериментальних зразків протитечійно-струминного змішувача напоїв на основі сиропів з натуральної сировини.

Література

1. Landau, L. D. Teoreticheskaja fizika [Text]. Vol. VI. Hidrodinamika / L. D. Landau, E. M. Lifshic. – Moscow: FIZMATLIT, 2001. – 731 p.
2. Wasewar, K. L. CFD Modelling and Simulation of Jet Mixed Tanks [Text] / K. L. Wasewar, J. V. Sarathi // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2008. – Vol. 2, № 2. – P. 155–171. doi:10.1080/19942060.2008.11015218
3. Sendilkumar, K. Computational fluid dynamic analysis of mixing characteristics inside a jet mixer for newtonian and non newtonian fluids [Text] / K. Sendilkumar, P. Kalaichelvi, M. Perumalsamy, A. Arunagiri, T. Raja // Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science. – 2007. – 9 p.
4. Saravanan, K. Studies on some aspects of jet mixers I: Hydrodynamics [Text] / K. Saravanan, N. Sundaramoorthy, G. Mohankumar, N. Subramanian // Modern Applied Science. – 2010. – Vol. 4, № 3. – P. 51–59. doi:10.5539/mas.v4n3p51

5. Wasewar, K. L. A design of jet mixed tank [Text] / K. L. Wasewar // Chemical and Biochemical Engineering Quarterly. – 2006. – Vol. 20, № 1. – P. 31–46.
6. Pan, G. Experimental study of turbulent mixing in a tee mixer using PIV and PLIF [Text] / G. Pan, H. Meng // AIChE Journal. – 2001. – Vol. 47, № 12. – P. 2653–2665. doi:10.1002/aic.690471205
7. Daas, M. Submerged Jet Mixing in Nuclear Waste Tanks: A Correlation for Jet Velocity [Text] / M. Daas, R. Srivasta, D. Roeltan // WM Symposia. – 2007. – Vol. 41, № 14. – 9 p.
8. Engelbrecht, J. J. Optimization of a Hydraulic Mixing Nozzle [Text] / J. J. Engelbrecht. – Iowa State University, 2007. – 65 p.
9. Espinosa, E. Design Optimization of Submerged Jet Nozzles for Enhanced Mixing [Text] / E. Espinosa. – Florida International University, 2011. – 101 p.
10. Hidrodinamicheskii smesitel' [Text]: Patent № 2016641 RU / Piatkov M. V. – Appl. № 4786991/26; Filed 09.11.1989; Publ. 30.07.1994, Bull. № 27. – 3 p.
11. Smesitel' [Text]: Patent № 2040322 RU / Egorov Yu. V., Belykh V. S. – Appl. № 5042290/26; Filed 15.05.1992; Publ. 25.07.1995, Bull. № 24. – 4 p.
12. Mnogokonusnyj strujnyj apparat [Text]: Patent № 2080164 RU / Borodin V. A. – Appl. № 93015447/25; Filed 24.03.1993; Publ. 27.05.1997, Bull. № 20. – 3 p.
13. Samoichuk, K. O. Analiz obladnannia dlia peremishuvannia ridkykh komponentiv [Text] / K. O. Samoichuk, O. V. Poludnenko // Pratsi Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu: naukove fakhove vydannia. – 2011. – Vol. 11, № 6. – P. 226–233.
14. Samoichuk, K. O. Obosnovanie konstruktsii smesitelia zhidkih komponentov s pomoshch'iu komp'iuternogo modelirovaniia [Text] / K. O. Samoichuk, O. V. Poludnenko // Materialy VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy nauchno-tehnicheskogo progressa v APK», 20–22 marta 2013 g., g. Stavropol. – Stavropol: SGAU, 2013. – P. 86–92.
15. Tsyb, V. H. Analiz metodiv otsiniuvannia yakosti zmishuvannia ridkykh komponentiv pry vyrobnytstvi bezalkoholnykh napoiv [Text] / V. H. Tsyb, O. V. Poludnenko // Pratsi Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu: naukove fakhove vydannia. – 2014. – Vol. 14, № 1. – P. 7–12.
16. Samoichuk, K. O. Vyznachennia vidstani mizh soplamy forsunok protytechiiino-strumynnoho zmishuvacha bezalkoholnykh napoiv [Text] / K. O. Samoichuk, O. V. Poludnenko, V. H. Tsyb // Pratsi Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu: naukovofakhove vydannia. – 2015. – Vol. 15, № 1. – P. 30–38.
17. Samoichuk, K. O. Eksperymentalne vyznachennia kontsentratsii syropu u protytechiiino-strumynnemu zmishuvachi [Text] / K. O. Samoichuk, V. V. Panina, O. V. Poludnenko // Materialy XVI Mizhnarodnoi naukovoii konferentsii «Udoskonalennia protsesiv i obladnannia kharchovykh ta khimichnykh vyrobnytstv», 5–9 veresnia 2016 r., m. Odesa. – Odesa: ONAKhT, 2016. – P. 327–331.
18. Mayer, I. Simple Theorems, Proofs, and Derivations in Quantum Chemistry [Text] / I. Mayer. – Springer US, 2003. – 337 p. doi:10.1007/978-1-4757-6519-9