

## DETERMINATION OF SPECIFIC POWER DURING COMPONENTS MIXING

I. Stadnyk, Y. Pankiv

*Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University*

V. Piddubnyi

*Kyiv National University of Trade and Economics*

---

**Key words:**

*Medium*

*Parameters*

*Mechanical watering*

*Specific power*

---

**Article history:**

Received 09.11.2020

Received in revised form  
24.11.2020

Accepted 09.12.2020

---

**Corresponding author:**

I. Stadnyk

**E-mail:**

npuht@ukr.net

**ABSTRACT**

---

The concept of providing circulating mixing, which was carried out by repeated mechanical action on the liquid in a closed circuit of the working chamber, was considered. The technological process of interaction of components in the conditions of operation of the developed design of the mixer with new working bodies at a stage of power influence at the set its constructive parameters was described.

The important role of the design features of the mixer in compliance with the main condition for obtaining disperse systems with specified properties when implementing the parameters of mechanical treatment was emphasized. The feature of ensuring the limiting destruction of the structure at the initial stages in the entire volume of components with the maximum homogeneity of the phase distribution at the very beginning of structure formation was considered.

An analysis of the energy balance of mixing under the influence of mechanical and other factors on the intensity of the process was proposed. The diagram of the energy balance of the medium (yeast dough) at the discrete-pulse mixing section and the diagram of the energy balance of the liquid subsystem were presented. On their basis, a physical model was developed and a mathematical model was created, where the liquid was considered to be viscous and not compressible.

The equations of the working process in a working chamber with a homogeneous state of the working medium were considered. On this basis, a thermodynamic description of the working process was proposed in the form of an open-type thermomechanical system, which is in energy interaction with the environment in quasi-stationary equilibrium. The thermodynamic model was considered in the general system of the working chamber and was described by two subsystems. The subsystems were considered with a two-phase state of the working medium and with energy exchange through an open boundary separating these subsystems.

The directions of improvement of mechanical influences by working bodies on the medium, ways of perfection of design features of the power influences directed on maintenance of a parity of the basic geometrical sizes of the mixer were offered.

## ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОЇ ПОТУЖНОСТІ ПРИ ЗМІШУВАННІ КОМПОНЕНТІВ

І. Я. Стадник, Ю. Ю. Паньків

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

В. А. Піддубний

Київський національний торговельно-економічний університет

*У статті розглянуто концепцію забезпечення циркуляційного перемішування, що здійснюється багатократним механічним впливом на рідину по замкненому контуру робочої камери. Описано технологічний процес взаємодії компонентів в умовах експлуатації розробленої конструкції змішувача з новими робочими органами на стадії енергетичного впливу при заданих його конструктивних параметрах.*

*Підкреслено важливу роль конструктивних особливостей змішувача в дотриманні основної умови одержання дисперсних систем із заданими властивостями при реалізації параметрів механічного впливу. Розглянуто особливість забезпечення граничного руйнування структури на початкових стадіях в усьому обсязі компонентів з максимальною однорідністю розподілу фаз на самому початку структуроутворення.*

*Запропоновано аналіз енергобалансу змішування при впливі механічних та інших чинників на інтенсивність процесу. Подано схему енергобалансу середовища (дріжджове тісто) на ділянці дискретно-імпульсного змішування та схему енергобалансу рідинної підсистеми. На їх основі розроблено фізичну модель і створено математичну модель, де рідина вважається в'язкою і нестисловою.*

*Розглянуто рівняння робочого процесу в робочій камері з гомогенним станом робочого середовища. На цій основі запропоновано термодинамічний опис робочого процесу у вигляді термомеханічної системи відкритого типу, що знаходиться в енергетичній взаємодії з навколишнім середовищем у квазістаціонарній рівновазі. Розглянута термодинамічна модель у загальній системі робочої камери описана двома підсистемами. Підсистеми розглядалися з двофазним станом робочого середовища та з енергообміном через відкриту межу, що розділяє ці підсистеми.*

*Запропоновано напрямки удосконалення механічних впливів робочими органами на середовище, шляхи удосконалення конструктивних особливостей енергетичних впливів, спрямованих на забезпечення співвідношення основних геометричних розмірів змішувача.*

**Ключові слова:** *середовище, параметри, механічні впливи, питома потужність.*

**Постановка проблеми.** Енергоємність ВВП України за показником умовного палива у 2,6 раза перевищує аналогічний показник індустріально розвинутих країн світу, що знайшло відображення у Загальнодержавній програмі розвитку промисловості. До пріоритетних напрямів віднесено запровадження ресурсо- та

енергозберігаючих технологій, освоєння виробництва нового покоління технологічного обладнання. Це означає доцільність продовження пошуків та інновацій для реалізації вказаної Державної програми.

Одним із шляхів зменшення собівартості продукції є оптимізація апаратурної реалізації виробництв з енергетичної точки зору, тобто зменшення споживання теплової та (або) електричної енергії на одиницю кінцевого продукту. Для досягнення такого ефекту необхідно на кожному етапі технологічного процесу виробництва визначати енергетичний потенціал матеріальних потоків, потребу в енергії для реалізації заданих перетворень матеріального потоку та можливі шляхи мінімізації втрат теплової енергії й енергії хімічних зв'язків.

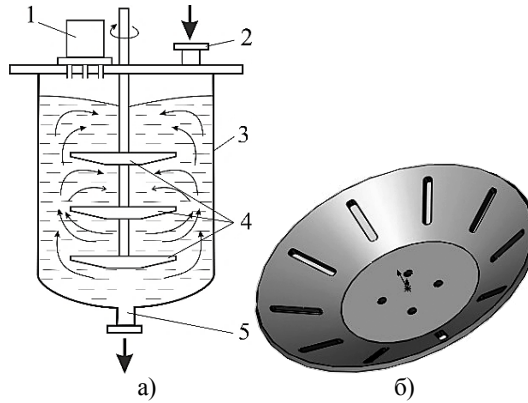
Аналітичний огляд наукових праць, пов'язаних з виробництвом якісної продукції українських і зарубіжних вчених, свідчить про шляхи ефективного використання робочих характеристик технологічного обладнання та основні закономірності удосконалення процесів при підготовчих та основних технологічних операціях виготовлення продукції. Тож до теоретичних напрацювань і проектних рішень вчених щодо виробництва якісної продукції необхідно віднести і чинники робочих характеристик обладнання.

Відомо [1—3], що змішувальні машини застосовуються у різних галузях промисловості України. Серед багатьох напрямків хочеться виділити харчову та переробну галузі. Машини для формування в'язкого середовища, повинні впливати на нього таким чином, щоб втрати сировини і готової продукції були мінімальними, а якість виробів висока. Такий підхід спонукає до необхідності забезпечення повної відповідності режимів обробки, конструктивних форм і параметрів робочих змішувальних органів структурно-механічним властивостям в'язкого середовища.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідники [4—6] відзначають значний вплив частоти обертання місильних органів на інтенсивність замішування та якість готової продукції. Стверджується [7—9], що при утворенні структури тіста з реологією впливу на поверхню робочого органу існує критичне значення швидкості його обертання та витраченої енергії. Критичним рівнем витраченої енергії вважається таке значення, при якому тісто замішують до отримання максимальної консистенції. Поставлена проблема визначила сучасні тенденції конструювання змішувальних робочих органів у машин різного класу, де вони виконують робочі процеси: перемішування, нагнітання, замішування, транспортування. Винахідники постійно спрямовують свої розрахунки, конструкції на оптимізацію профілю і конструктивних елементів, застосування збірних конструкцій, використання матеріалів і покриттів. Як варіант виконання такого змішувального вузла можна навести його схему, запроповану на рівні патенту України на корисну модель UA№ 137278 [10], зображену на рис. 1.

З метою отримання однорідного середовища запропоновано циркуляційне перемішування, що здійснюється багатократним механічним впливом на рідину по замкненому контуру робочої камери. До схеми перемішування належать: робоча камера — гравітаційний змішувач, робочий орган, вібродозатор борошна, трубопроводи з форсунками, запірно-регулююча апаратура. Завдяки тому, що в корпусі робочої камери встановлено робочі органи (рис. 1б), забезпечується рівномірне пошарове перемішування емульсії в зоні її розміщення. При попаданні на стінку камери з нижньої частини гравітаційного розділювача перемішаний шар

емульсії опускається нижче, забезпечуючи додаткове змішування в умовах меншого рівня турбулізації суспензії і за рахунок цього досягається підвищення якості середовища.



**Рис. 1. Схема змішувача напівфабрикатів:** а) 1 — циліндрична камера; 2 — робочі органи; 3 — подача рідких компонентів; 4 — дозатор борошна; б) — робочий орган

Запропонована фізична модель, яка схематично показана на рис. 1а, вперше розглядає процеси, що відбуваються при виникненні гідродинамічних потоків рідини при дії тарільчастого змішувача та зваженого стану (псевдошару) з іншого боку. У запропонованій фізичній моделі і створеній на її основі математичній моделі рідина вважається в'язкою і нестисливою.

Вартим уваги може бути той факт, що в більшості випадків у дослідженнях не враховувались втрати енергії фізико-хімічних зв'язків при визначенні оптимальних методів процесу. Аналіз існуючих методів розрахунку змішувальних машин з визначення коефіцієнта подачі, конструктивних параметрів, споживаної потужності та впливу реології на течію маси середовища між робочими органами та робочою камерою, свідчить про розрізненість підходів різних авторів. Вони пов'язані з введенням великої кількості експериментальних коефіцієнтів для співвідношення робочих середовищ. Спостерігається практична відсутність у визначенні режимів роботи машини. Вплив тепломасообмінних процесів на роботу машини з різними конструктивними параметрами робочих органів і робочої камери враховувався не всіма дослідниками та різною мірою.

У більшості досліджень доцільність вибору певних технологічних і конструктивних параметрів оцінюється з точки зору збільшення виходу напівфабрикату й кінцевого продукту. Розроблені методики визначення питомих витрат на процес утворення в'язкого середовища при змішуванні компонентів дають змогу встановити необхідну потужність залежно від конструктивних параметрів машини. Комплексне порівняння різних технологічних схем з енергетичної точки зору проведено не було. Це зумовило напрям наших досліджень у цьому руслі, тож до завдань віднесено:

- поглиблений аналіз теплофізичних процесів при змішуванні;
- оцінка енергетичних ресурсів і розробка пропозицій щодо їх зменшення;

- удосконалення апаратурного виконання технології змішування, пов'язаної з суміщенням в часі процесу дозування, розпилення, контактної взаємодії компонентів у зваженому стані, стискання та змішування;

- визначення факторів, які впливають на температурні потоки на основі термодинамічної моделі робочого процесу змішувальної машини;

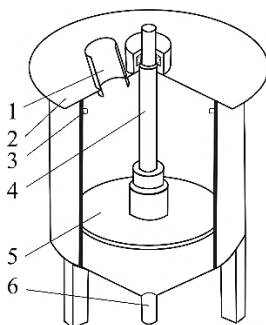
- теоретичне дослідження температурних потоків;

- експериментальні дослідження температурних потоків.

Проведені теоретичні дослідження показали, що далеко не завжди доцільно використовувати реологічні залежності при робочих процесах змішування середовища. З іншого боку, всі літературні джерела свідчать про відсутність альтернативних досліджень, навіть теоретичних, про деформаційні процеси, пов'язані із зміною температури оброблюваного середовища. Це пояснюється складністю процесів, що відбуваються в робочій камері при утворенні середовища робочими органами машини.

**Метою дослідження** є термодинамічна модель енергообміну в зазорі між робочими органами нової конструкції.

**Викладення основних результатів досліджень.** Завантаження компонентів у робочу камеру машини дискретної дії здійснюється у вигляді дискретно-імпульсних впливів. При цьому завантаження, зазвичай, здійснюють з одного торця камери, а відбір — з іншого (рис. 2), що подається на подальший технологічний процес [8; 10]. Так, при дозуванні компонентів на перших хвилинах процесу відбувається їх хаотична взаємодія та перемішування. Утворене середовище послідовно проходить ділянки робочої камери. Ділянки чергуються із зонами контакту середовища з нагрітим до певної температури. Ефективність дискретно-імпульсного впливу, з одного боку, і навколишнім безперервним впливом великої поверхні робочого органу — з іншого впливає на температуру середовища. При цьому температура середовища поступово зростає до своєї межі. З метою інтенсифікації процесу винахідники прагнуть до зменшення кількісних впливів конструктивних параметрів робочого органу на середовище, однак при цьому знижується продуктивність. Так, інтенсивні дії при змішуванні компонентів існуючими спіральними робочими органами спричиняють зростання небезпеки термодеструкції компонентів середовища.



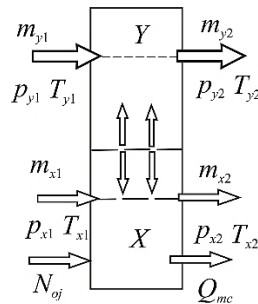
**Рис. 2. 3Д модель змішувача:** 1 — патрубок подачі борошна; 2 — кришка змішувача; 3 — сопло подачі рідких компонентів; 4 — вал; 5 — робочий орган; 6 — патрубок вивантаження сотової суміші

Одним із факторів, який характеризує процес перетворення середовища при дії нових робочих органів, є зміна загальної внутрішньої енергії хімічних зв'язків матеріального потоку. Ця енергія може бути виділена при руйнуванні хімічних зв'язків сполук під час механічних впливів оброблюваного середовища [2; 3; 11]. Прикладом таких процесів можуть слугувати дискретно-імпульсні впливи, змішування і пластифікація тіста тощо. При цих процесах енергія частково витрачається на утворення нових хімічних зв'язків і частково втрачається в навколишньому середовищі.

Розглянемо рівняння робочого процесу в робочій камері з гомогенним станом робочого середовища. При розрахунках утворені газові бульбашки вважаємо ідеальними і внаслідок незначної зміни їх температури в процесі дії робочих органів (стиснення, дроблення, розтягування) беремо сталість величин питомих теплоємностей.

Запропонований термодинамічний опис робочого процесу здійснений на основі термомеханічної системи відкритого типу, що знаходиться в енергетичній взаємодії з навколишнім середовищем у квазістаціонарній рівновазі. Термодинамічна модель у загальній системі робочої камери має дві підсистеми з двофазним станом робочого середовища та з енергообміном через відкриту межу, що розділяє ці підсистеми.

Розрахункову схему енергобалансу змішування можна подати за методом «чорного ящика» (рис. 3).



**Рис. 3. Розрахункова схема енергобалансу середовища (дріжджове тісто) на ділянці дискретно-імпульсного змішування, де  $X$  — рідинна підсистема;  $Y$  — газова підсистема**

Із деяким припущенням загальної системи стосовно області  $Y$  вважаємо, що підсистема  $X$  отримує від зовнішнього джерела енергію. Ця енергія характеризується величиною споживаної потужності робочого органу без урахування потужності механічних втрат в ущільненні вала та підшипниковому вузлі,  $N_{oi}$ . Одержавши цю механічну енергію, підсистема  $X$  здатна виконати в підсистемі  $Y$  технічну роботу. Внаслідок її дії відбувається зміна параметрів тиску  $p_Y$  і температури  $T_Y$  газової підсистеми та всієї системи в цілому. Така зміна параметрів необхідна для реалізації цільового призначення течії системи.

Процес зазначеного енергообміну між підсистемами супроводжується дисипацією частини підведеної енергії, яку, як правило, відносять до категорії гід-

равлічних втрат. У багатьох розрахункових визначеннях енергетичних характеристик використовується коефіцієнт гідравлічних втрат [11; 12]. У нашому випадку, через складність процесів руху загальної системи, неможливо користуватися кореляційними коефіцієнтами при визначенні енерговитрат у змішувальних машинах. Тому запропонована термодинамічна модель енергообміну в зазорі між робочими органами, яка не вимагає введення кореляцій на основі дослідних даних за розподіленням швидкостей рідини. Їхня точність порівняно нижча відносно вимірювань полів температур (рис. 4).

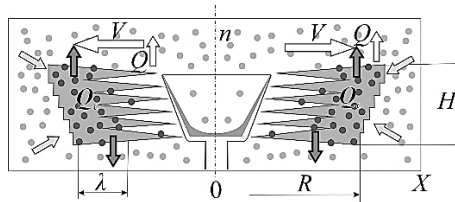


Рис. 4. Розрахункова схема процесу змішування суміші: 1 — розподілення утвореної суміші при виході з поверхні робочого органу; 2 — тарільчастий робочий орган

Рівняння теплового балансу елемента диспергованої газової фази можна записати у такому вигляді [4]:

$$q_{гр} = -\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial \rho} \right)_{гр} = r \rho_{газ} \frac{dR}{d\tau}, \quad (1)$$

де  $r$  — питома теплота випаровування,  $R$  — радіус елемента диспергованої газової фази;  $\tau$  — час.

За умови інтегрування в межах радіуса елемента диспергованої газової фази від 0 до  $R_{дгф}$  та часу  $\tau$  від 0 до  $\tau_0$  ( $\tau_0$  — загальний час існування елемента диспергованої газової фази). В результаті отримуємо:

$$\int_0^{\tau_0} q_{гр} d\tau = \int_0^{\tau_0} r \rho_{газ} \frac{dR}{d\tau}; \quad (2)$$

$$q_{гр} \tau_0 = r \rho_{газ} R_{дгф}; \quad (3)$$

$$q_{гр} = \frac{r \rho_{газ} R_{дгф}}{\tau_0}. \quad (4)$$

Загальний тепловий потік від середовища до окремого елемента диспергованої газової фази визначається залежністю [4]:

$$Q_{гр} = N_{заг} q_{гр} = (N + N_{пyx}) \frac{r \rho_{газ} R_{дгф}}{\tau_0}. \quad (5)$$

З іншого боку, густина теплового потоку відповідає тепловому потенціалу, який за час  $\tau_0$  переноситься через межу поділу фаз (рідина/газова фаза) з молекулами речовин, які випаровуються.

Припускаємо відсутність енергомасообміну в робочій камері із зовнішнім середовищем (витоки через стінку), тоді рівняння балансу енергії в межах системи має вигляд:

$$N_{oi} \pm \dot{Q}_{\text{н.с.}} \pm \dot{Q}_m = \Sigma \Delta H, \quad (6)$$

де  $\Sigma \Delta H$  — сума змін повної ентальпії робочого середовища (у перетині межі системи);  $N_{oi}$  — потужність, що підводиться до робочого органа;  $\pm \dot{Q}_{\text{н.с.}}$  — тепловий потік між системою і навколишнім середовищем;  $\pm \dot{Q}_m$  — тепловий потік у системі (в'язке тертя).

У переважній більшості випадків цей потік спрямований у навколишнє середовище, тому надалі він розглядатиметься як від'ємна величина у загальному рівнянні енергобалансу.

Що стосується величини  $\Sigma \Delta H$ , то її можна визначити на основі зазначеної схеми (рис. 1) таким рівнянням:

$$\Sigma \Delta H = \Delta H_Y + \Delta H_X \quad (7)$$

або

$$\Sigma \Delta H = (m_{Y2} \cdot h_{Y2} - m_{Y1} \cdot h_{Y1}) + (m_{X2} \cdot h_{X2} - m_{X1} \cdot h_{X1}), \quad (8)$$

де  $m_Y$  і  $m_X$  — масові витрати робочого середовища;  $h_Y$ ,  $h_X$  — питомі ентальпії середовища; індексами «1» і «2» у вказаних величинах позначені вхідні й вихідні стани складових робочого середовища.

У ряді окремих випадків індексація параметрів для складових  $\Delta H$  може відрізнятися від записаної в рівнянні (8).

З огляду на запропоновані зміни масових витрат як газу, так і рідини при протіканні їх між робочими органами, рівняння (6) з урахуванням (8) можна подати в питомих величинах. Для цього позначимо частинне співвідношення масових витрат щодо вхідної величини для середовища  $Y$ , оскільки це співвідношення постійно змінне:

$$g = \frac{m}{m_{Y1}}. \quad (9)$$

На основі цього отримаємо з рівняння (6) вираз для питомої роботи змішування:

$$l_{oi} = (g_{Y2} \cdot h_{Y2} - h_{Y1}) + c_f \cdot (g_{X2} \cdot T_{X2} - g_{X1} \cdot T_{X1}) + \tilde{q}_{\text{н.с.}} \quad (10)$$

або

$$l_{oi} = l_Y + l_X + \tilde{q}_{\text{н.с.}}. \quad (11)$$

Отже, величину питомої роботи змішування і, як наслідок, питомої потужності можна визначити, знаючи питомі роботи кожної підсистеми та втрати тепла в навколишнє середовище [12; 13]. З рівняння (11) бачимо, що питому роботу можна знайти, визначивши питомі масові витрати середовищ і термічні параметри кожної підсистеми.

Як правило, при порівнянні енергоефективності використовують поняття питомої потужності:



$$N_{num} = \frac{N_e}{\dot{V}_{Y1}}$$

або після перетворень

$$N_{num} = \frac{N_{oi} \cdot \rho_{Y1}}{\dot{m}_{Y1} \cdot \eta_{мех}} = l_{oi} \cdot \frac{P_{Y1}}{R_{Y1} \cdot T_{Y1} \cdot \eta_{мех}}, \quad (12)$$

де  $N_e$  — ефективна потужність на валу змішувача;  $\dot{V}_{Y1}$  — об'ємна продуктивність машини за умов затягування;  $\eta_{мех}$  — механічний ККД машини;  $\rho_{Y1}$  — густина газового середовища  $Y$  на вході до робочого органу;  $R_{Y1}$  — газова стала за умов входу;  $\tilde{q}_{н.с.} = \dot{Q}_{н.с.} / \dot{m}_{Y1}$  — питомий тепловий потік у навколишнє середовище.

У більшості випадків для змішування застосовують гомогенні рідкі середовища, що дає змогу записати рівняння у вигляді:

$$N_{num} = \frac{P_{Y1}}{R_{Y1} \cdot T_{Y1} \cdot \eta_{мех}} \times \left[ (g_{Y2} \cdot h_{Y2} - h_{Y1}) + c_f \cdot (g_{X2} \cdot T_{X2} - g_{X1} \cdot T_{X1}) + \tilde{q}_{н.с.} \right]. \quad (13)$$

Для нашого випадку, коли вважаємо, що:

- газ однокомпонентний, ідеальний;
- рідина гомогенна, нестислива;
- відсутні розчинність газу, конденсація і випаровування рідини.

Зважаючи на вищесказане, рівняння (13) спрощується, оскільки  $\dot{m}_{Y2} = \dot{m}_{Y1}$ , звідки  $g_{Y2} = 1$ ;  $\dot{m}_{X2} = \dot{m}_{X1}$ :

$$h_{Y2} - h_{Y1} = c_p \cdot (T_{Y2} - T_{Y1}) = c_p \cdot T_{Y1} \cdot \left( \pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right).$$

Враховуючи вищенаведені спрощення рівняння (13), його можна переписати таким чином:

$$N_{num} = \frac{P_{Y1}}{R_{Y1} \cdot \eta_{мех}} \cdot \left[ c_p \cdot \left( \pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) + g_{X1} \cdot c_f \cdot \frac{\Delta T_X}{T_{Y1}} + \frac{q_{н.с.}}{T_{Y1}} \right], \quad (14)$$

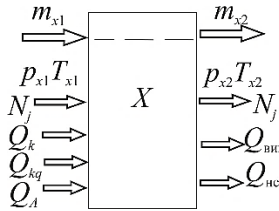
де  $c_p$  — питома масова ізобарна теплоємність робочої газової складової середовища;  $\pi = p_{Y2} / p_{Y1}$  — ступінь підвищення тиску газової складової середовища;  $n$  — показник політропи стиснення;  $c_f$  — питома масова теплоємність робочої рідини;  $\Delta T_X = T_{X2} - T_{X1}$  — нагрівання робочої рідини в системі. Отже, з рівняння (14) можна визначити значення питомої потужності.

Тепловий потік від газу при стисненні напрямлений не лише всередину до рідини, але й до поверхонь, що утворюють її об'єм, тобто до прилеглих поверхонь робочої камери й робочого органу.

Припустимо, що ці поверхні є тепловими мостами тільки до рідини, і таким чином виключаємо тепловий потік від газу в навколишнє середовище [12; 13].

Розрахункове визначення компонентів  $l_X$  і  $l_Y$ , як і головного зв'язку  $\Delta T_X = f(g_{X1}, n)$ , вимагає розгляду енергетичних балансів відповідних підсистем, але оскільки вони взаємозв'язані між собою, то достатньо для визначення шуканого параметра  $l_X$  та інших величин, пов'язаних із ним, розглянути енергетичний баланс рідинної підсистеми.

Розглянемо енергетичний баланс рідинної підсистеми, схема якої подана на рис. 5.



**Рис. 5. Схема енергобалансу рідинної підсистеми**

Рівняння збереження енергії для цієї підсистеми має вигляд:

$$Q_k + Q_{кд} + Q_A - Q_{вих} - Q_{н.с.} + N_{oi} - N_i = \Delta H_X, \quad (15)$$

де  $Q_k$  — конвективний тепловий потік, що відводиться від газового середовища, яке стискається;  $Q_{кд}$ ,  $Q_{вих}$  — теплові потоки, пов'язані з процесами конденсації і випаровування робочої рідини;  $Q_A$  — тепловий потік, зумовлений процесом абсорбції газу (або окремого компонента газу) в робочій рідині;  $N_i$  — потужність політропного процесу стиснення газу;  $N_{oi}$  — потужність на валку.

По суті, це рівняння показує, від чого залежить нагрівання утвореної рідинної суміші при дії робочих органів, оскільки  $\Delta H_X$  пропорційне  $\Delta T_X$ .

У взятих раніше питомих величинах рівняння (15) набуде такого вигляду:

$$\begin{aligned} c_f \cdot (g_{X2} \cdot T_{X2} - g_{X1} \cdot T_{X1}) = \\ = q_k + q_{кд} + q_A + q_{вих} + q_{н.с.} + l_{гидр}, \end{aligned} \quad (16)$$

де  $l_{гидр} = (N_{oi} - N_i) / m_{Y1}$  — питома робота, що затрачується на подолання гідравлічних опорів у середовищі (дисипативна складова витрат енергії на рух робочого середовища). Ця величина визначена з експериментальних досліджень. Рівняння (16) розв'язується відносно параметра  $T_{X2}$ :

$$T_{X2} = \frac{g_{X1} \cdot T_{X1} + \frac{q_k + q_{кд} + q_A - q_{вих} - q_{н.с.} + l_{гидр}}{c_X \cdot g_{X2}}}{g_{X2}} \quad (17)$$

за наявності додаткових залежностей для кожного із шести членів правої частини цього рівняння: питомих теплових потоків від конвективного теплообміну між газовою фазою та рідинною  $q_k$ , від процесу конденсації парової фази рідинної

суміші  $q_{\text{кд}}$ , від абсорбції компонентів газової суміші у робочу рідину  $q_A$ , від випаровування робочої рідини у стискуваний газ  $q_{\text{вип}}$ , від теплообміну з навколишнім середовищем  $q_{\text{н.с.}}$  та питомої роботи гідродинамічних втрат у робочій камері. Визначення вказаних величини можливе, виходячи із загальноприйнятих законів і закономірностей процесів тепломасообміну.

Температурні показники в процесі нагнітання стосуються одночасно мікробіологічних, фізичних і хімічних впливів. Вони можуть бути такими [13; 14], що наближаються до оптимальних у процесах можливості стабілізації температури за рахунок теплообміну середовищ при його змішуванні. Тому для одержання однорідності суміші з якісними показниками важливим є додержання теплоти в середовищі. Процеси конденсації парової фази рідини  $q_{\text{кд}}$ , абсорбції компонентів газової суміші у робочу рідину  $q_A$ , випаровування робочої рідини у стискуваний газ  $q_{\text{вип}}$  не враховуємо, адже всі вони мають досить обмежений період свого існування або компенсуються теплообміном. На основі цього:

$$T_{X2} = \frac{g_{X1}}{g_{X2}} \cdot T_{X1} + \frac{q_{\text{к}} - q_{\text{н.с.}} + l_{\text{гидр}}}{c_X \cdot g_{X2}}. \quad (17)$$

Питома робота гідродинамічних втрат у робочій камері може бути визначена з виразу:

$$l_{\text{гидр. оберт}} = \frac{k_{\text{оберт}} \cdot \rho_X \cdot \omega^3 \cdot r_2^5}{m_{Y1}}, \quad (18)$$

де  $\rho_X$  — густина робочого середовища;  $\omega$  — частота обертання робочого органа;  $k_{\text{оберт}}$  — коефіцієнти потужності, що визначається експериментально;  $r$  — радіус тістової маси на поверхні робочого органа. Радіус залежить від геометрії машини та чисел Рейнольдса  $Re_{\text{оберт}}$  і визначається залежністю:

$$Re_{\text{оберт}} = \frac{2 \cdot \omega \cdot r_2^2}{\nu_X}, \quad (19)$$

де  $\nu_X$  — кінематична в'язкість робочого середовища при середній температурі.

Вплив температури робочого середовища  $T_X$  визначається величиною кінематичної в'язкості  $\nu_X$ .

### **Висновки**

Для подальшого використання процесу змішування у змішувальних машинах необхідно створювати різні конструктивні й технологічні схеми, які забезпечують умови додержання допустимих температурних потоків. Додержання температурних режимів середовища при дії різної конструкції робочих органів повинно якісно здійснюватися за рахунок конвективного теплообміну з навколишнім

середовищем. При цьому напрями руху температурних потоків при використанні удосконалених теплообмінних процесів будуть більш розсіюватися.

### **Література**

1. Гулий І. С., Пушанко М. М., Орлов В. Г., Мирончук В. Г. Обладнання підприємств переробної і харчової промисловості. Вінниця: Нова книга, 2001. 576 с.
2. Лісовенко О. Т., Руденко-Грицюк О. А., Литовченко І. М., Дудко С. Д., Зірніс І. В. Технологічне обладнання хлібопекарських і макаронних виробництв. К.: Наукова думка, 2000. 283 с.
3. Сухенко Ю. Г., Стадник І. Я., Василів В. П., Сухенко В. Ю. Технологічне обладнання для виробництва виробів з борошна. К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2015. 388 с.
4. Stadnyk I., Pankiv J., Havrylko P., Karpyk H. Researching of the concentration distribution of soluble layers when mixed in the weight condition. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2020. Vol. 13, no. 1. P. 581—592.
5. Szwedziaka K., Stadnyk I., Golyachuk S., Grzywacz Z. Justification of the rheological model of process of plastic material injection by the rollers. *Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 23, no. 3. P. 101—110.
6. Stadnyk I., Piddubnyi V., Karpyk H., Kravchenko M., Hidzhelitskyi V. Adhesion effect on environment process injection. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2019. Vol. 13, no. 1. P. 429—437.
7. Pawel D., Derkach A., Stadnyk I., Vitenko T. Simulation of components mixing in order to determine rational parameters of working bodies. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2016. Vol. 9. P. 130—138.
8. Stadnyk Igor, Novak Larysa, Matenchuk Liudmyla. Global rheological approach to the quality of medium injected by the rollers. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2018. Vol. 12, no. 1. P. 24—35.
9. Apet T. K., Pashuk Z. N. 2004. Handbook of confectionery production technologist. SPb: GIOR. 560 p.
10. Патент на корисну модель №137278 «Змішувач напівфабрикатів» бюлетень № 19, від 10.10.2019.
11. Соколенко А. І., Мазаракі А., Піддубний В. А. Енергетичні трансформації і енергозбереження в харчових технологіях: монографія. К.: Фенікс, 2012. 484 с.
12. Казаков Е. Д., Кретович В. Л. Биохимия зерна и продуктов его переработки. М.: Агропромиздат, 1989. 367 с.
13. Козін В. М., Арсеньєв В. М., Левченко Д. О., Мелейчук С. С. Термомеханічний розрахунок рідинно-кільцевих компресорних машин: монографія. Суми.: Сумський державний університет, 2014. 158 с.
14. Деркач А., Стадник І., Василів В. Застосування експериментально-статистичного моделювання для досліджень параметрів надійності валкових машин. *Сборник научных трудов РИИЦ Sworld. Мир науки и инноваций*. 2016. № 1(3). 66 с.