

хранение и переработка

ЗЕРНА

научно-практический журнал

№3 (200)

март

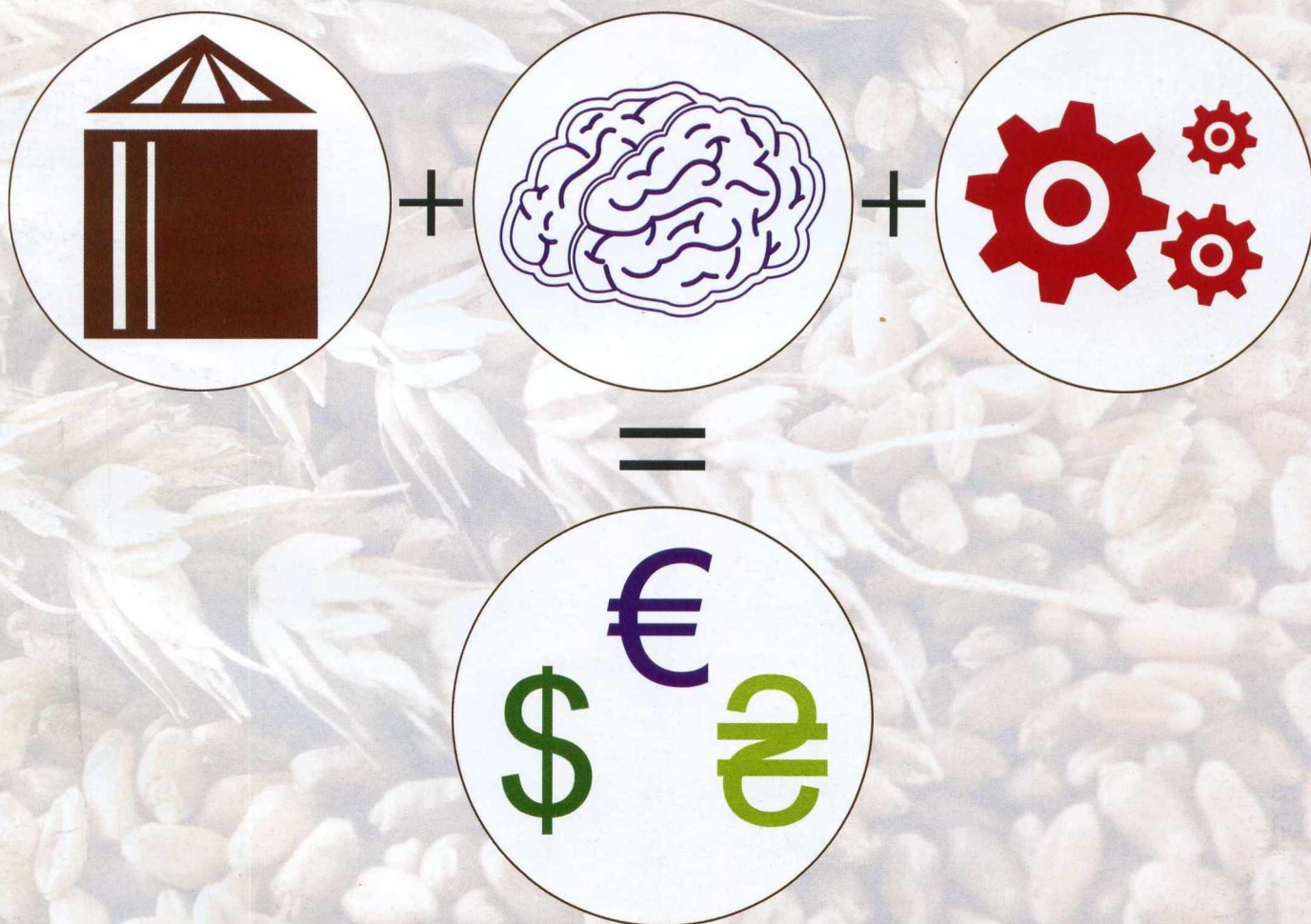
2016

www.hipzmag.com

Конференция-практикум

Эффективный элеватор - прибыльный бизнес

24-25 мая 2016, "ЛУБНЫМАШ", Полтавская обл.



По вопросам участия обращаться в редакцию журнала "Хранение и переработка зерна":

Святослав Ткаченко

+380633577359, +380562320795

zerno2@apk-inform.com

УДК 664.653.122

Вплив конструктивних та кінематичних параметрів змішувача на витрати потужності при приготуванні рідкої пшеничної опари

Доломакін Ю.Ю., Національний університет харчових технологій

Опара з пшеничного борошна змішувалася за допомогою оригінальної конструкції змішувача при різних робочих умовах, швидкість обертання змінювалася від 500 до 2500 об/хв, розміри робочого органу також змінювалися і залежали від внутрішнього діаметра змішувальної чаші та складали 1/2, 1/3 та 1/4 її частини. Потужність, яка була необхідна на цей процес, розраховувалась з різниці потужності, необхідної для змішування, та потужності холостого ходу приводу змішувача, варіювалась від 500 до 650 Вт в залежності від співставлення вищезгаданих параметрів.

Отримані результати підтверджують значний вплив досліджуваних параметрів на витрати потужності, що в подальшому дасть змогу обрати конструкцію змішувача та режимів його роботи.

Ключові слова: пшенична опара, змішування, потужність, 3D друк.

Опара из пшеничной муки смешивалась с помощью оригинальной конструкции смесителя при различных рабочих условиях, скорость вращения изменялась от 500 до 2500 об/мин., размеры рабочего органа также менялись и зависели от внутреннего диаметра смесительной чаши и составляли 1/2, 1/3 и 1/4 ее части. Мощность, которая была необходима на этот процесс, рассчитывалась по разнице мощности, необходимой для замеса, и мощности холостого хода привода смесителя, варьировалась от 500 до 650 Вт в зависимости от сопоставления вышеупомянутых параметров.

Полученные результаты подтверждают значительное влияние исследуемых параметров на затраты мощности, что в дальнейшем позволит выбрать конструкцию смешивающего устройства и режимов его работы.

Ключевые слова: пшеничная опара, смешивание, мощность, 3D печать.

Sourdough of wheat flour was mixed with a mixer using the original design at various operating conditions, the rotational speed was varied from 500 to 2500 min⁻¹, the working body dimensions are also varied and dependent on the inner diameter and the mixing bowl were 1/2, 1/3 and 1/4 parts. The power which was necessary for this process is calculated by the difference of the power required for the kneading and the idling drive power mixer was varied from 500 to 650 watts, depending on the comparison of the above parameters.

The results confirm a significant effect on the studied parameters of power costs, which further allows you to choose the design of the mixing device and the mode of its operation.

Keywords: wheat sourdough, mixing, power, 3D printing.

Постановка проблеми. Основна проблема механічних змішувачів у випадку приготування суспензій – забезпечити положення дисперсних частинок в підвищеному вигляді, запобігаючи їх накопиченню в будь-якій частині об'єму змішувача з мінімальним споживанням потужності.

Для встановлення закономірностей утворення, умов збереження стійкості і, навпаки, руйнування структур в концентрованих дисперсних системах необхідно визначити взаємозв'язок між реологічними характеристиками дисперсних систем і інтенсивністю механічних впливів на них.

Найбільш важливими характеристиками перемішувачів пристроїв, які покладені в основу їх порівняльної оцінки, є: ступінь, інтенсивність і ефективність перемішування.

Під ступенем перемішування в загальному випадку розуміють взаємний розподіл компонентів суміші після закінчення перемішування всієї системи. У спеціальній літературі використовують й інші назви цієї величини, наприклад, ступінь гомогенізації, показник перемішування, ступінь однорідності, ступінь сегрегації і т.д. [1].

Інтенсивність перемішування зазвичай визначають за такими параметрами: числу обертів мішалки при постійному часі процесу перемішування; часу досягнення заданого технологічного результату при постійній частоті обертання мішалки; потужності N , затрачуваної на перемішування одиниці об'єму V або маси M рідини.

Кожна з цих величин є мірою інтенсивності перемішування для конкретного змішувача, що ускладнює їх порівняння. Більш точно інтенсивність перемішування визначається за значенням питомої потужності N/V або N/M , однак і в цьому випадку внаслідок відмінностей характеру розсіювання енергії в апаратах різних конструкцій показник питомої потужності не можна вважати універсальним.

Ефективність перемішування визначається значенням характерного для даного процесу параметра (ступеня перемішування, характеру диспергування, коефіцієнта тепло- або масопереносу і т.д.). Ефективність перемішування є зручним параметром для порівняння і вибору оптимального режиму роботи змішувачів. З двох апаратів з мішалками більш ефективно працює той, в якому досягається заданий технологічний результат при меншій витраті енергії.

Однак ці показники є в певній мірі узагальнюючими і не дозволяють зробити висновок про існуючу в змішувачі нерівномірність перемішування. Так, величина енергії, що вкладається в одиницю об'єму чаші, багато в чому залежить від місця введення енергії, що багато в чому визначає хід біохімічного процесу в даній області.

Процес змішування компонентів є ключовим етапом і відіграє основну роль як фактор, від виконання якого залежить якість кінцевого продукту і його собівартість.

Вочевидь зміна конструктивних та кінематичних параметрів змішувача призводить до зміни потужності приводу за одиницю часу, яка йде на приготування рід-

кої пшеничної опари. Тому питання вивчення впливу таких параметрів на процес приготування продукту є актуальним.

Аналіз наукових публікацій. Утворення опари залежить як від гідратації компонентів борошна, так і від структурних змін, які викликаються в результаті механічного перемішування [2]. У кінцевому рахунку, в процесі приготування, перемішування приводить до аерації опари, під час чого утворюються ядра бульбашок, а ті, в свою чергу, утворюють остаточну структуру м'якуша. Під час змішування утворення клейковини залежить від внеску механічної енергії, необхідної для утворення якісного продукту. На додаток до геометрії змішувачів, добре описаних в роботі Пеймбардеста та ін. [3], робочі умови перемішування (швидкість, час, об'єм чаші) були необхідні для визначення даного механічного вкладу.

Зв'язок між різними умовами перемішування і реологічними властивостями опари вивчалися паралельно з їх впливом на клейковину і якість кінцевого продукту [4]. Виникали труднощі при порівнянні опари, замішаної різними способами (геометрією) і з різних сортів пшеничного борошна, що іноді призводило до протилежних результатів. Використовуючи різні мішалки, Мані та ін. [5] пояснили зв'язок між реологічними властивостями і якістю випеченого хліба з пшеничного борошна. Модуль накопичення G' , пов'язаний з оптимальною якістю кінцевого продукту, був однаковим і не залежав від змішувального обладнання. Зі збільшенням часу перемішування автори вищезгаданої роботи встановили зменшення модуля накопичення в той час як Женг та ін. [6] і окремо Анжелоні та Делла Роса [7] повідомляли про його збільшення. Рао та ін. [8] відзначили, що ударно-релаксаційна поведінка всіх видів тіста позитивно корелювала з мікрограмою часу перемішування. Конелі та Макінтайер [9] у своїй роботі встановили, що тип мішалок більше впливає на невеликі деформаційні властивості, ніж швидкість перемішування. Вайперт [10] використовував динамічно-термомеханічний аналіз для безперервного моніторингу залежності часу і температури від поведінки тіста та інтерпретував її в залежності від змін в полімерній структурі. Використовуючи вищезгаданий аналіз, Анжелоні та Делла Роса [11] показали, що тісто, вироблене в жорстких умовах перемішування (високі швидкості перемішування і енергія), стає більш еластичним, в'язким і таким, що важко обробляється. Труднощі з дослідженням тістом були також пов'язані з його безперервною змінною поведінкою. Завдяки невеликій деформаційній динаміці і значними подовжуючим деформаціям тіста, Кім та ін. [12] відзначили збільшення модуля накопичення (G') для слабо замішаного тіста, в той час як більш перемішане тісто показало протилежну тенденцію; вони також підкреслили важливість розтягуючого і зсувного потоків при перемішуванні. Хараші та ін. [13] показали, що штифтове перемішування передає більшу енергію тісту, ніж перемішування Z-подібною мішалкою, і тягне за собою більш низьку кількість полімерного білка, що міститься у тісті. Порівнюючи перемішування в концентричному пристрої Куетта і в мішалці з Z-подібною лопаттю, Пеймбардест та ін. [14] пока-

зали вплив зсуву на аерацію тіста і підкреслили зниження здатності тіста утримувати газ при більш високих показниках швидкості.

Незважаючи на важливість галузі дослідження і достатню кількість вже наявних робіт по моделюванню рідинного перемішування, моделювання замісу опари не достатньо вивчене, за наявності різноманіття геометрії мішалок та складної мінливої реологічної її поведінки. Кембел і Шах запропонували модель масового балансу та експериментальної технології для визначення параметрів аерації при замісі тіста. Чен та ін. використовували дану модель для визначення швидкості обороту газу в процесі перемішування. Аналогічно Мартін та ін. надали сукупну модель балансу для газу і відзначили її застосовність для моделювання поведінки тіста. Біндінг та ін. змодельували перемішування методом кінцевих елементів і зробили висновок, що зовнішня частина лопаті мішалки тягне за собою найбільші швидкості зсуву та енергетичний внесок. Використовуючи подібний підхід в 2D геометрії, Конелі та Кокіні запропонували даний напрямок для рідин, що мають різну реологічну поведінку. Альтернативою численним методам може бути використання аналітичних моделей, розроблених Деллапласом та ін. з метою прогнозування енергоспоживання в процесі перемішування тонко-зсувних рідин для складної геометрії робочих органів.

Отже, енергетичні витрати, які супроводжують заміс опари, все ще не вирішені. Тому зв'язок між енергетичним внеском та реологічною поведінкою опари із пшеничного борошна все ще визначають експериментально, підбираючи різні умови перемішування.

Мета дослідження. Виявлення впливу геометрії роторного типу та швидкості обертання робочого органу змішувача для приготування рідких пшеничних опар на величину потужності його привода.

Матеріали та методи дослідження. Матеріалом для досліджень була рідка пшенична опара вологістю 65%. Опара замішувалася з борошна пшеничного вищо-

го ґатунку, вологість борошна складала $13,9 \pm 0,2\%$. Температура опари знаходилась в межах $28 \pm 1^\circ\text{C}$. Об'єм опари в усіх випадках дорівнював $0,006 \text{ м}^3$, при цьому густина опари $\rho = 1066 \text{ кг/м}^3$.

Визначення величини потужності приводу проводили за допомогою експериментальної установки (рис. 1) з циліндричною чашею внутрішнім діаметром $D = 260 \text{ мм}$, індукційною муфтою для регулювання обертів робочого органу та приводом, що складається з асинхронного двигуна потужністю $0,6 \text{ кВт}$ та клинопасової передачі.

Форма складної геометрії робочих органів була реалізована за допомогою технології 3D друку, а саме адитивного виробництва органів із PLA або ABS пластику, розробка, яка надає можливість виготовити прототип розробленої конструкції по тривимірних кресленнях (рис. 2) з використанням відповідного автоматизованого програмного забезпечення, що дозволяє генерацію різних внутрішніх структур (в середині 3D-моделі), а також дозволяє встановити і змінювати масово-інерційні характеристики робочого органу, робити його повністю гнучким, пружинистим та ін.

Розміри робочих органів (зовнішні діаметри) залежали від внутрішнього діаметра чаші D і склали відповідно $1/2$, $1/3$ та $1/4$ її частини, що в абсолютних значеннях склали 130 , 86 та 65 мм , при цьому їх вага становила 283 , 101 та 49 г відповідно. Надруковані елементи, зображені на рис. 3.

На конструкцію пристрою з такими робочими органами було отримано патент на корисну модель.

Вимірювання електричної потужності двигуна здійснювались за допомогою цифрового ватметра 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 цифрового пристрою. Цей ватметр має порівняно високу швидкодію, що визначається характеристиками вбудованого мікропроцесора, АЦП двотактного інтегрування і перемножувача.

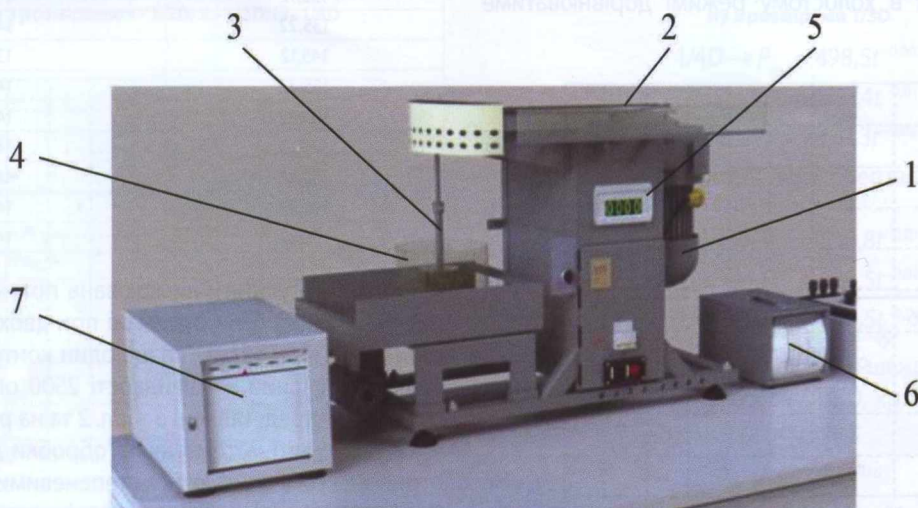


Рис. 1. Експериментальна установка:

1 – електродвигун; 2 – клинопасова передача; 3 – вал з робочим органом; 4 – прозора циліндрична чаша; 5 – електронний тахометр; 6 – ватметр; 7 – потенціометр

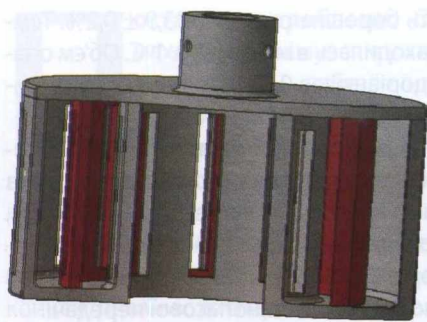


Рис. 2. Робочий орган змішувача, 3D модель в розрізі



Рис. 3 Робочі органи, надруковані на 3D принтері

Результати та обговорення. Вимірювання потужності, що витрачається на перемішування, має важливе значення в конструюванні нових машин. На основі цих вимірів визначаються характеристики потужності для змішувачів нових конструкцій. Отже, від точності вимірювань потужності, що витрачається на перемішування, залежить точність запропонованих кореляційних рівнянь.

В дослідженні для вимірювання потужності, що витрачається на перемішування, був використаний електричний метод. Цей метод полягає у вимірі корисної потужності електродвигуна (активна потужність), що приводить у рух мішалку, встановлену в чашу. Потужність електродвигуна вимірювалася безпосередньо цифровим ватметром. Потужність, споживану мішалкою P (корисна потужність), можна розрахувати по різниці електричної потужності двигуна на змішування $P_{\text{дв}}$ і на холостому ході P_0 (без мішалки) при тих же самих числах оборотів.

$$P = P_{\text{дв}} - P_0 \quad (1)$$

Спочатку були отримані результати миттєвої потужності двигуна, який працював в холосту в проміжку часу 200 сек., отримані значення наведені в табл. 1 та у вигляді графіка, зображеного на рис. 4.

За цими даними середнє значення потужності двигуна при роботі в холостому режимі дорівнюватиме $P_0 = 139,3$ Вт.

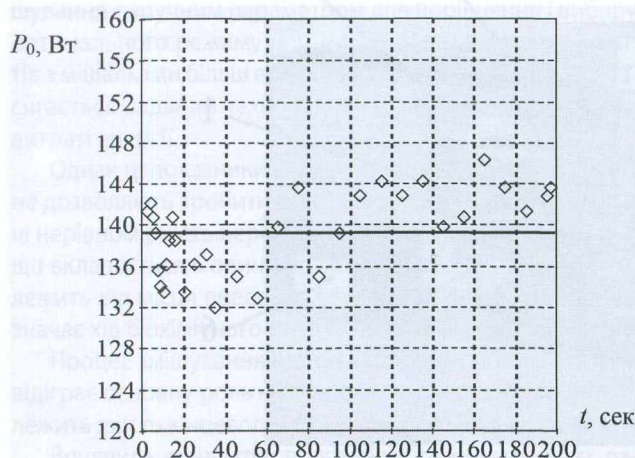


Рис. 4. Залежність потужності електродвигуна на холостому ході від часу

Таблиця 1. Зміна активної потужності двигуна за часом на холостому ході

Час, сек.	Потужність холостого ходу P_0 , Вт
2,4	141,3
3,8	142,2
5,14	140,7
6,45	139,2
7,74	135,6
9	134,1
10,3	133,5
11,64	136,2
13,04	138,6
14,3	140,7
15,7	138,6
20,5	133,5
25,2	136,2
30,8	137,1
35,22	132
45,2	135
55,24	132,9
65,18	139,8
75,22	143,7
85,3	135
95,21	139,2
105,22	142,8
115,22	144,3
125,12	142,8
135,22	144,3
145,12	139,8
155,22	140,7
165,22	146,4
175,12	143,7
185,22	141,3
195,22	142,8
196,82	143,7

Типові результати вимірювань потужності в процесі перемішування були отримані при двох різних швидкостях (500 і 1500 об/хв.), та ще один контрольний варіант був реалізований на швидкості 2500 об/хв., відповідно результати представлені в табл. 2 та на рис. 5, 6 і 7.

В результаті математичної обробки дослідних даних отримані криві описуються степеневими функціями типу $P = kt^n$. Отже, для робочого органу, який обертається зі швидкістю 500 об/хв. та має різні геометричні розміри, потужність $P_{\text{дв}}$ буде описуватися залежностями:

■ Таблица 2. Зміна активної потужності двигуна за часом

Час <i>t</i> , сек	Потужність електродвигуна <i>P</i> , Вт								
	500 об/хв.			1500 об/хв.			2500 об/хв.		
	1/4D	1/3D	1/2D	1/4D	1/3D	1/2D	1/4D	1/3D	1/2D
10	498	522,3	616,2	596,1	620,7	624,9	-	633,9	-
20	496,2	516	613,5	555,6	612	611,1	-	568,8	-
30	494,1	526,8	611,1	573,9	604,8	606,3	-	600,3	-
40	492	516,6	607,8	568,8	603,3	607,8	-	585,3	-
50	491,1	525,3	615,6	537,6	581,7	589,8	-	579,6	-
60	494,1	516	608,4	538,2	579,6	585,3	-	573,9	-
70	484,8	509,4	599,1	603,3	578,1	597,6	-	589,8	-
80	489,3	522,3	597	529,8	579,6	582,3	-	591,9	-
90	493,5	515,1	594,9	600,3	574,5	588,9	-	588,3	-
100	495	520,8	604,8	576,6	576,4	573,9	-	589,8	-
110	490,5	508,8	593,1	564,3	579	575,1	-	576	-
120	491,1	509,4	598,2	570	575,1	582,3	-	599,1	-
130	492	510	591	556,2	580	573	-	576	-
140	495	500,7	603,3	534	583,8	568,8	-	573	-
150	489,3	504,3	587,4	559,8	570	564,3	-	574,5	-
160	491,1	506,4	604,8	555	585,3	583,8	-	599,1	-
170	484,2	507,3	593,1	576	577,2	577,2	-	555	-
180	487,8	515,1	594,9	541,2	579,6	580,8	-	564,3	-
190	492	511,5	581,7	594,9	580,8	576,6	-	584,7	-
200	489,3	512,1	579,6	550,5	578,1	569,4	-	576,6	-

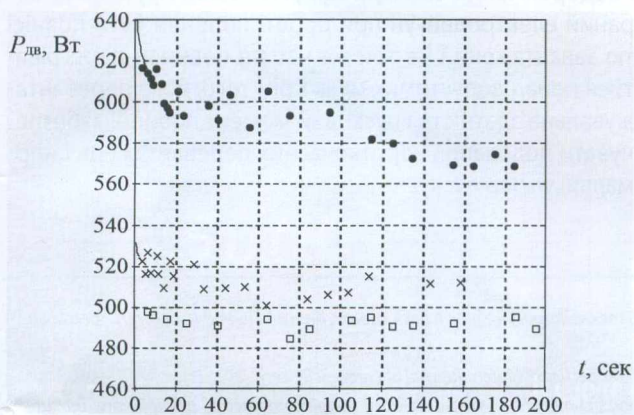


Рис. 5. Зміна потужності двигуна при 500 об/хв. для робочих органів з розмірами: • - 1/2D; x - 1/3D; □ - 1/4D

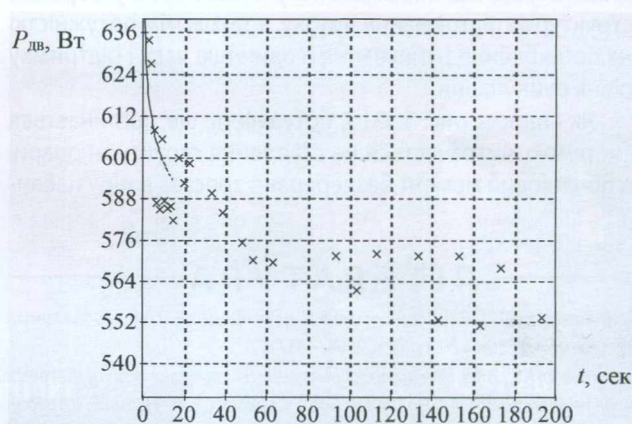


Рис. 7. Зміна потужності двигуна при 2500 об/хв. для робочого органу з розмірами 1/3D

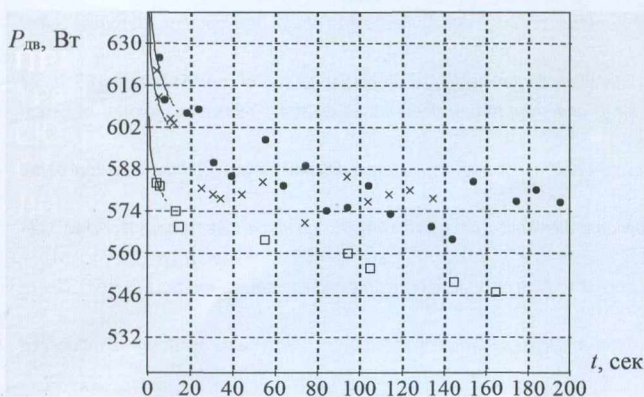


Рис. 6. Зміна потужності двигуна при 1500 об/хв. для робочих органів з розмірами: • - 1/2D; x - 1/3D; □ - 1/4D

$$1/4D \rightarrow P_{\text{дв}} = 498,5t^{-0,003} \quad (2)$$

$$1/3D \rightarrow P_{\text{дв}} = 527,4t^{-0,01} \quad (3)$$

$$1/2D \rightarrow P_{\text{дв}} = 637,3t^{-0,02} \quad (4)$$

Для робочого органу, який обертається зі швидкістю 1500 об/хв.:

$$1/4D \rightarrow P_{\text{дв}} = 596,8t^{-0,01} \quad (5)$$

$$1/3D \rightarrow P_{\text{дв}} = 628,5t^{-0,02} \quad (6)$$

$$1/2D \rightarrow P_{\text{дв}} = 644,5t^{-0,02} \quad (7)$$

І у контрольному випадку для швидкості 2500 об/хв. та розмірів робочого органу 1/3D, крива потужності від часу буде описуватися рівнянням:

$$P_{\text{дв}} = 652,2t^{-0,028} \quad (8)$$

Маючи ці результати, корисну потужність *P*, яка витрачається тільки на змішування компонентів опари, розраховуємо за формулою (1).

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити такі висновки.

При роботі двигуна в холостому режимі потужність має пряmlinійну залежність та змінюється з часом несуттєво.

Для всіх розглянутих випадків при навантаженні двигуна в початковий період пуску його потужність має максимальне значення, що зумовлено його конструкцією та пусковим струмом. Далі крива потужності плавно зменшується до певного середнього значення.

Для кількісного аналізу результатів візьмемо потужність робочого органу з найменшими розмірами та найменшою швидкістю обертання за порівняння.

При швидкості обертання 500 об/хв. очевидно, що найменшій потужності потребує робочий орган з мінімальними розмірами, відповідно найбільший споживає її більше. У процентному відношенні для робочого органу з розмірами 1/3D потужність збільшується на 5,8%, а для робочого органу з розмірами 1/2D – вже на 27,8%.

Для швидкості 1500 об/хв. ці відношення складають: 19,7%, 26,1% та 29,3% відповідно. Для останнього випадку робочий орган з розмірами 1/3D та швидкістю обертання 2500 об/хв. має цей показник рівним 30,8%.

Висновки. Кінетика процесу утворення добре описується співвідношенням між потужностями на утворення структури і підтримання потоку, а також між потужністю на поглиблення руйнування в одиницю часу і підтримку рівня руйнування.

Як видно з рис. 5, 6 і 7, потужність, що поглинається системою, витрачається на створення структури опари, в початковий момент безперервно зростає в міру набли-

ження до граничного максимального значення, відповідного рівноважному стану. Відповідно знижується потужність, необхідна на підтримку течії з заданим градієнтом швидкості безперервної зсувної деформації.

Відповідно до зміни dP/dt на початку процесу руйнування потужність витрачається головним чином на поглиблення руйнування структури. У міру збільшення ступеня руйнування все більше зростає частка потужності, що витрачається на підтримку досягнутої до фіксованого моменту ступеня руйнування.

Потужність, що витрачається на процес приготування рідкої опари, є функція в'язкості. Зі зменшенням в'язкості потужність, що витрачається, убуває. Тому, складаючи ту чи іншу рецептуру опари, потрібно знати її повну реологічну криву з тим, щоб за найменшою в'язкістю визначити необхідну потужність обладнання для її обробки.

Правильний вибір потужності двигуна забезпечує мінімальну вартість обладнання і мінімальні втрати енергії при експлуатації установки. Зниження потужності двигуна проти необхідної тягне швидкий вихід двигуна з ладу, підвищену вартість ремонту і неминучість аварій. Завищення потужності двигуна проти необхідної спричиняє погіршення його енергетичних показників ($\cos \phi$), збільшення непродуктивних втрат енергії і подорожчання експлуатації установки. Правильно обраний електродвигун при роботі повинен бути повністю завантажений і в той же час не повинен перегріватися понад допустимих меж. Крім того, його перевантажувальна здатність і пусковий момент повинні забезпечувати подолання короткочасних перевантажень і нормальні умови пуску.

ЛІТЕРАТУРА

1. Товажнянский Л.Л., Готлинская А.П. и др. Процессы и аппараты химической технологии. Учебник в двух книгах. Книга 1 Под общ. ред. Л.Л. Товажнянского. – Харьков НТУ «ХПИ», 2004. – 632 с.
2. Belton, P.S., 2005. New approaches to study the molecular basis of the mechanical properties of gluten. *Journal of Cereal Science* 41, 203–211
3. Peighambaroust, S.H., van der Goot, A.J., Boom, R.M., Hammer, R.J., 2006. Mixing behaviour of a zero-developed dough compared to a flour–water mixture. *Journal of Cereal Science* 44, 12–20
4. Dobraszczyk, B.J., Morgenstern, M.P., 2003. Rheology and the breadmaking process. *Journal of Cereal Science* 38, 229–245
5. Mani, K., Eliasson, A.C., Lindahl, L., Tragardh, C., 1992. Rheological properties and breadmaking quality of wheat flour doughs made with different dough mixers. *Cereal Chemistry* 69, 222–225
6. Zheng, H., Morgenstern, M.P., Campanella, O.H., Larsen, N.G., 2000. Rheological properties of dough during mechanical dough development. *Journal of Cereal Science* 32, 293–306
7. Angioloni, A., Dalla Rosa, M., 2007. Effects of cysteine and mixing conditions on white/whole dough rheological properties. *Journal of Food Engineering* 80, 18–23
8. Rao, V.K., Mulvaney, S.J., Dexter, J.E., 2000. Rheological characterisation of long- and short-mixing flours based on stress–relaxation. *Journal of Cereal Science* 31, 159–171
9. Connelly, R.K., McIntier, R.L., 2008. Rheological properties of yeasted and nonyeasted wheat doughs developed under different mixing conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 88, 2309–2323
10. Weipert, D., 1997. Determining rheological properties of cereal products using dynamic mechanical analysis in compression mode. *Cereal Foods World* 42, 132–137
11. Angioloni, A., Dalla Rosa, M., 2005. Dough thermo-mechanical properties: influence of sodium chloride, mixing time and equipment. *Journal of Cereal Science* 41, 327–331
12. Kim, Y.R., Cornillon, P., Campanella, O.H., Stroschine, R.L., Lee, S., Shim, J.Y., 2008. Small and large deformation rheology for hard wheat flour dough as influenced by mixing and resting. *Journal of Food Science* 73, E1–E8
13. Haraszi, R., Larroque, O.R., Butow, B.J., Gale, K.R., Bekes, F., 2008. Differential mixing action effects on functional properties and polymeric protein size distribution of wheat dough. *Journal of Cereal Science* 47, 41–51
14. Peighambaroust, S.H., Fallah, E., Hamer, R.J., van der Goot, A.J., 2010. Aeration of bread dough influenced by different way of processing. *Journal of Cereal Science* 51, 89–95