
РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОДНОЇ КАМЕРИ ЕЛЕКТРОНАГРІВАННЯ ПРОТОЧНОГО ПАСТЕРИЗАТОРА МОЛОКА ДЛЯ ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

Жила В. І., Якушенко Є. М.
DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-445-0-16>

ВСТУП

Згідно Енергетичної стратегії України на період до 2030 року¹, передбачається зростання споживання електроенергії в сільському господарстві у три рази – із 3,4 до 10,1 млрд. кВтгод. При цьому основним завданням Стратегії є створення передумов для докорінного зменшення енергоємності вітчизняної продукції, в тому числі продукції підприємств АПК, за рахунок впровадження нових енергозберігаючих технологій. Сталий розвиток агропро-мислового комплексу України – одна з головних умов соціально-економічної стабільності суспільства, зміцнення економічної безпеки держави².

Молоко – цінний біологічний продукт до складу якого входять жири, білки, лактоза, вітаміни, мікроелементи тощо. Якість молока, як продукту споживання, залежить від наявності в ньому різних мікроорганізмів, в тому числі і патогенних. Мікроорганізми існують у молоці на будь-якому етапі його заготовки і переробки.

Пастеризація є найпоширенішим методом знищення мікроорганізмів, які знижують якість молока, викликають захворювання людей і тварин. Від температури і тривалості пастеризації молока, а також від засобів теплової обробки залежить збереження природної цінності й технологічних властивостей молока при його подальшій обробці. Найкращим виходом з даної ситуації є застосування технологічного обладнання, яке в процесі обробки мінімально змінювало б властивості молока та зберігало його поживність для

¹ Енергетична стратегія України на період до 2030 року // Офіційний сайт. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13#Text> (дата звернення 16.04.2024).

² Стратегія розвитку аграрного сектору економіки на період до 2020 року // Офіційний сайт. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/806-2013-%D1%80#Text> (дата звернення 16.04.2024).

споживача. Практика показує, що теплова обробка молока, як правило, проводиться на молокопереробних підприємствах, а для селян обов'язковим є очищення і охолодження продукту до температури 4–8 °С³.

Транспортування отриманого молока на молокозаводи здійснюється транспортом цих же підприємств⁴. Така система заготівлі дозволяє задовольнити високі санітарні та гігієнічні вимоги, що ставляться до продукту.

Багато приватних господарств зацікавлені в тому, щоб виконувати переробку отриманого молока безпосередньо на місцях. Наближення переробки сировини до об'єкта його отримання має переваги, зокрема: зниження кількості повторних операцій обробки, зниження енергетичних, транспортних витрат, збереження смакових якостей обробленої продукції, надходження додаткового прибутку за рахунок продажів готової продукції⁵⁶.

Ринок пропонує для споживачів використання традиційних ємнісних установок типу Г6 – ОПА – 600, Г6 – ОПБ – 1000, з об'ємом ванни відповідно 600 л і 1000 л, а також пластинчастих проточних установок типу ОПФ – 1 – 300, ОП2 – Ф – 1, ОПУ – 3М, ОП2 – У5, ОКЛ – 3 тощо. Їх відносять до конвективних теплообмінних апаратів, теплоносієм в яких є гаряча вода або пара. Але ці установки мають певні недоліки, зокрема: низький ККД (55 – 60%) та будівництво котельної або встановлення електроводонагрівача для отримання теплоносія. При використанні цих установок втрачаються природні якості і властивості молока через нерівномірне нагрівання, що потребує підвищених по температурі та часу режимів пастеризації.

Тому удосконалення ресурсозберігаючих технологій та обладнання, спрямованих на зниження затрат палива та електроенергії при збереженні якості продукту має вирішальне значення.

Мета та завдання досліджень. Метою роботи є підвищення енергоефективності електропастеризації молока шляхом застосування нової конструкції електродної камери нагрівання, яка забезпечує

³Сухенко, Ю.Г. Сарана В.В., Сухенко В.Ю. Технологічне обладнання та лінії молокопереробних підприємств : навчальний посібник. Київ: Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2013. 658 с.

⁴Ніколаєнко С.М. Теоретичні аспекти і передумови створення кластеру молочної промисловості. Наукові праці Національного університету харчових технологій. Київ: НУХТ, 2015. Т. 21, № 2. С. 62–69.

⁵Про безпечність та якість харчових продуктів : закон України : чинне законодавство зі змінами та допов. станом на 15 січ. 2015 р. // Офіційний сайт. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771/97-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення 16.04.2024).

⁶Інструкція з профілактики та боротьби з туберкульозом тварин: Наказ Державного комітету ветеринарної медицини України 03.09.2009 N 316 // Офіційний сайт. – URL: https://zakononline.com.ua/documents/show/295827___295892 (дата звернення 16.04.2024).

необхідні параметри термообробки продукту для тривалої роботи в установках проточного типу.

Задачі дослідження:

1. Обґрунтувати раціональну конструкцію камери нагрівання низькочастотного електропастеризатора молока прямої дії.

2. Провести дослідження камери електродного нагрівання та запропонувати методику розрахунку вибраної конструкції електропастеризатора молока прямої дії.

1. Задачі досліджень

Низькочастотні електропастеризатори являють собою електротеплові установки, в яких середовищем перетворення електричної енергії в теплову є продукт, що пастеризується, тобто молоко. Змінний електричний струм з частотою від 50 до 500 Гц безпосередньо нагріває молоко, відповідно закону Джоуля – Ленца.

Враховуючи те, що молоко має властивості колоїдного розчину і суспензії, потрібно враховувати його полідисперсність, що обумовлює в ньому наявність частинок з різними електричними зарядами. Молоко має також електронейтральні молекули, позитивно і негативно заряджені іони солей і заряджені колоїдні частинки білка. В перенесенні електричного струму в молоці, за наявності різниці потенціалів, беруть участь іони і заряджені частинки білків. Жир і лактоза, наявні в молоці, здійснюють опір електричному струму⁷.

Вищевказані дані дозволяють стверджувати, що молоко є провідником другого роду і необхідно дослідити розподіл електричного поля між електродами.

Методи розрахунку електродних водонагрівачів і парових котлів, що пропонуються авторами^{8,9,10}, зводяться до визначення опору фази R_{ϕ} , тобто опору рідини, що знаходиться між електродами, вибору оптимальних параметрів електродів і конструкції апарату відповідно до напруженості електричного поля E_{\max} або щільності струму j_{\max} , що забезпечують задані умови нагрівання.

⁷ Скарбовійчук О.М., Кочубей-Литвиненко О.В., Чернюшок О.А., Федоров В.Г. Хімічний склад і фізичні характеристики молочних продуктів : навч. посібник-довідник : Київ. МОН України, Національний університет харчових технологій. 2012. 311 с.

⁸ Баженов І.Г. Дослідження розподілу струму та впливу матеріалу електродів на конструктивні параметри та експлуатаційну надійність електродних водонагрівачів: автореф. дис. ... канд. техн. Наук: Харків, 1970. 25 с.

⁹ Магда В.Й., Жила В.І., Кунденко Н.П. Розробка нового обладнання для теплової обробки молока. *Вісчарство*. 1998. Вип. 30. С. 117 – 120.

¹⁰ Магда В.Й., Жила В.І. Обґрунтування оптимальних параметрів пастеризаторів молока електричного нагрівання опором: Збірник праць. Харків: ХДТУСГ. 1999. С.47-50.

Потрібно враховувати, що застосування електродного способу нагрівання для пастеризації рідкого харчового продукту створює додаткові вимоги до нагрівного апарату.

Перш за все конструкція пастеризатора відповідати таким вимогам:

1. Забезпечувати рівномірне нагрівання рідини по всьому об'єму електродної камери відповідно режиму термообробки.

2. Інтенсифікувати процес термообробки (швидкість нагрівання більша 10 – 15 °C/c), звівши до мінімуму час електротеплової дії на молоко, що дозволяє забезпечити пастеризаційний ефект без суттєвих змін первинної якості продукту.

3. Не допускати шкідливих відкладень «молочного каменю» на електродах, які призводять до місцевих перегрівань і пригорянь.

4. Забезпечувати мінімальні втрати теплової енергії в оточуюче середовище.

5. Матеріал електродів і камери електронагрівання, має відповідати медичним і санітарно – гігієнічним нормам до харчового обладнання.

6. Гарантувати тривалу, надійну і безпечну експлуатацію.

Виходячи з вищезазначеного програма досліджень електродного низькочастотного пастеризатора молока включає :

1) вибір конструкції камери нагрівання;

2) дослідження розподілу електричного поля в міжелектродному середовищі;

3) визначення максимально допустимої напруженості електричного поля E_{max} і густини струму j_{max} ;

4) визначення Γ – геометричного коефіцієнту електродного пастеризатора і швидкості нагрівання молока.

2. Вибір конструкції електродної камери нагрівання

За конструктивним виконанням електродна камера нагрівання пастеризатора може бути обладнана одно – чи трифазною системою електроживлення, з проточним чи непроточним рухом рідини, з різною формою електродів.

Зважаючи на досвід роботи електропастеризаторів молока в сільському господарстві України питоме споживання електроенергії для пастеризації молока складає 15-18 кВт·год/т¹¹. Тому електродна система камери електропастеризації має отримувати живлення від трьохфазної промислової мережі напругою 380 В та частотою 50 Гц.

Форма і розташування електродів мають забезпечувати рівномірне нагрівання продукту в усьому об'ємі, виключаючи можливість виникнення «застійних зон», тобто місць, де дія електричного струму на

¹¹ Кассіч Ю.Я. Знешкодження збудника туберкульозу в молоці на пастеризаторі інфрачервоного електричного нагріву. *Ветеринарна медицина України*. 1999. Вип. 12. С. 14-17.

рідину послаблена і термообробка не відповідає режиму пастеризації. Окрім цього, струм, що протікає в молоці має забезпечувати швидкість нагрівання продукту $10 - 15 \text{ }^\circ\text{C/s}$.

Відомо, що розподіл електричного заряду на поверхні сфери найбільш рівномірний. Сфера має мінімальну обмежуючу поверхню з усіх геометричних тіл ($S_{\text{шт.}} = 4,8$) і, відповідно, мінімальну поверхню теплопередачі при максимальному внутрішньому об'ємі. Вона ідеальна для камери електродного нагрівання. Для електродної камери використовуємо половину сфери з дном (рис. 1).



Рис. 1. Загальний вигляд моделі електродного нагрівача

Для забезпечення швидкості нагрівання молока більш ніж 10°C/s необхідна щільність струму в потоці $j \geq 7000 \text{ A/m}^2$. В той же час максимально допустимі значення щільності струму не можуть перевищувати 1000 A/m^2 для харчової нержавіючої сталі і 5000 A/m^2 для харчового титану¹². Область найбільш інтенсивного нагрівання і максимальної щільності струму доцільно змістити від електродів у напрямі до центру сфери (рис. 1). Це можливо забезпечити за умови, коли три діелектричні радіальні перегородки ділять внутрішній об'єм камери нагрівання на три симетричних частини, що мають спільний виріз напівсферичної форми, радіусу $r_{\text{ц.в.}}$, розташований у центрі напівсфери. Електроди застосовуємо з титанового проводу харчових марок (ВТ – 1-0, ВТ – 1 – 00), зібрані з зазором $0,57d$ проводу для проходу рідини в жорстку конструкцію, яка являє собою напівсферичний сегмент радіусу $r_{\text{ел}}$, і встановлені на відстані r від центру камери нагрівання в кожній частині.

В дні знаходиться вивідний отвір, а подача сирого молока забезпечується через отвори в кожній частині пастеризаційної камери.

¹² Васецький Ю.М. Електродинаміка. Основні поняття, потенціальні та квазістационарні поля. Навчальний посібник. Київ: Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друку», 2009. 160 с.

Вхідні канали розташовані таким чином, щоб молоко, що надходить до кожної частини, обмивало внутрішню поверхню корпусу електродного нагрівача і електроди, розташовані в ньому, прямуючи до вивідного каналу, що розташований в центрі камери нагрівання. Кількість електродів в кожному відділі однакова і залежить від необхідної потужності.

Нагрівання молока відбувається між електродами безпосередньо трифазним струмом промислової частоти. Нагрівання продукту, зважаючи на особливості конструкції інтенсифікується в напрямі до центру за рахунок зменшення площі перерізу потоку та збільшення щільності струму. Максимальна щільність струму і область максимальних температур знаходиться біля вихідного патрубку в центрі сфери, що забезпечує полегшений режим роботи електродів. Параметри кожної частини нагрівача однакові, що створює симетричне навантаження. Пройшовши термообробку, молоко через вивідний патрубок рухається в теплообмінник, де проходить теплообмін із зустрічним потоком через розділяючі металеву пластину.

Для підтвердження відповідності сферичної конструкції електродного нагрівача вимогам, що поставлені до електродного пастеризатора, необхідно дослідити розподіл електричного поля в камері пастеризації.

3. Теоретичні дослідження розподілу електричного поля в електродній камері нагрівання

Розміри нагрівача, що забезпечує потрібну продуктивність установки, можуть бути розраховані аналітично, якщо відомі залежності, що описують електричне поле, між електродами, а також залежність питомого опору від визначаючих його факторів (температури, тиску та ін.) і визначені експериментально. Для цих цілей найбільш часто використовуються методи моделювання електромагнітного поля¹³.

Електромагнітне поле характеризується чотирма векторами : \vec{E} – напруженості електромагнітного поля, \vec{D} – електричної індукції, \vec{B} – магнітної індукції, \vec{H} – напруженості магнітного поля. Ці вектори, як відомо, пов'язані залежностями :

$$\begin{aligned} D &= \zeta \cdot \zeta_0 \cdot E, \\ \vec{B} &= \mu_B \mu_{OB} \vec{H} \end{aligned} \quad (1)$$

¹³ Матвійчук В.А., Рубаненко О.С., Стаднійчук І.П. Електротехнології в АПК. Навчальний посібник. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2020. 272 с.

де ζ, ζ_0 – відповідно діелектрична проникність і електрична стала, Ф/м;

μ_B, μ_{OB} – магнітна проникність і магнітна стала, Гн/м.

Тому при розрахунку достатньо визначити тільки два вектори. Визначимо вектори \bar{E} і \bar{H} з рівнянь Максвелла :

$$\begin{aligned} \text{rot} \bar{H} &= \gamma \bar{E} + \zeta_a \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \\ \text{rot} \bar{E} &= -\mu_{ab} \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \end{aligned} \quad (2)$$

де γ – відносна електропровідність середовища, Сім/м;

ζ_a – абсолютна діелектрична проникність, $\zeta_a = \zeta \cdot \zeta_0$, Ф/м;

μ_{ab} – абсолютна магнітна проникність, $\mu_{ab} = \mu_b \cdot \mu_{ob}$, Гн/м.

Але для однозначності визначення E і H додатково задають їх дивергенцію. За теоремою Гауса, в диференціальній формі, при постійному значенні ζ ,

$$\text{div} \bar{E} = \frac{\rho_q}{\zeta_a},$$

де ρ_q – об'ємна щільність заряду, Кл/м³.

Головна властивість магнітного поля – його синусоїдальність ($\text{div} \bar{H} = 0$) дозволяє визначити дивергенцію вектора \bar{H} . При постійному значенні магнітної проникності $\text{div} \bar{H} = 0$.

Звідки, повна система рівнянь електричного поля виглядає:

$$\begin{aligned} \text{rot} \bar{H} &= \gamma \cdot \bar{E} + \zeta_a \cdot \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}, \text{div} \bar{H} = 0, \\ \text{rot} \bar{E} &= -\mu_{ab} \cdot \frac{\partial \bar{H}}{\partial t}, \text{div} \bar{E} = \frac{\rho_q}{\zeta_a} \end{aligned} \quad (3)$$

Електромагнітне поле промислової частоти для даного моменту часу в провідному середовищі обмеженої протяжності з достатньою для практики точністю можна вважати постійним або квазістаціонарним, тобто таким, що в одних і тих же умовах практично зберігає свою конфігурацію незмінною¹⁴. Ця обставина дозволяє скористатися наявною аналогією між електричним полем постійного струму і електростатичним полем, тобто, використовувати формули розрахунку електростатичного поля при дослідженні поля постійного струму. В цьому випадку поле визначається :

¹⁴ Тозон О.В., Маєргойз І.Д. Розрахунок тривимірних електромагнітних полів. Київ. Техніка. 1974. 371 с.

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0, \operatorname{div} \zeta a \vec{E} = \rho_q, \quad (4)$$

тобто, електричне поле безвихрове, а це означає, що можна знайти таку скалярну функцію U , градієнт якої по абсолютній величині рівний вектору напруженості поля \vec{E} .

$$\operatorname{grad} U = \pm E.$$

Розділивши розподілені заряди в просторі на елементарні частини dq , розглянемо їх як точкові заряди (рис. 2). Потенціал в точці А, що визначається кожним таким елементом, відповідно закону Кулона, дорівнює :

$$dU = \frac{1}{\zeta} \frac{dq}{4\pi r_q^2}$$



Рис. 2. Схема розподілу точкових зарядів dq в об'ємі V

Звідси, потенціал, що визначається сукупністю розподілених в просторі зарядів, рівний :

$$U = \int \frac{dq}{4\pi\zeta r_q} = \frac{1}{4\pi\zeta} \int \frac{dq}{r_q} \quad (5)$$

Заряди розподілені по об'єму V , причому об'ємна густина заряду в деякій точці простору являє собою ρ_q . Тому

$$U = \frac{1}{4\pi\zeta} \int \frac{\rho_q dV}{r_q} \quad (6)$$

Отриманий вираз є результатом рівняння Пуассона у випадку, коли заряди розподілені в кінцевій області простору. В диференційній формі рівняння Пуассона має вигляд :

$$\frac{d^2 U}{dx^2} + \frac{d^2 U}{dy^2} + \frac{d^2 U}{dz^2} = -\frac{\rho_q}{\zeta}. \quad (7)$$

Якщо в області простору, що розглядається, відсутні об'ємні електричні заряди, то рівняння Пуассона перетворюється в рівняння Лапласа :

$$\frac{d^2U}{dX^2} + \frac{d^2U}{dY^2} + \frac{d^2U}{dZ^2} = 0. \quad (8)$$

I, відповідно, електричне поле в просторі без зарядів задовольняє рівняння Лапласа.

Для спрощення дослідів, електричне поле трифазного сферичного електродного пастеризатора потрібно умовно розділити на ділянки :

1 – створену внутрішніми електродами, дном і центральним вирізом в перегородках ;

2 – створену концентричними електродами в кожній секції.

Відповідна схема представлена на (рис. 3).

Розглянемо 1-у ділянку

Аналітичне рішення задачі з трьома електродами одночасно досить складне. Тому пропонується наближений метод розрахунків шляхом переходу від 3-х фазної моделі до однофазної, в якій сфера розділена на дві симетричні частини тонкою ізолюючою перегородкою з круглим отвором в центрі.

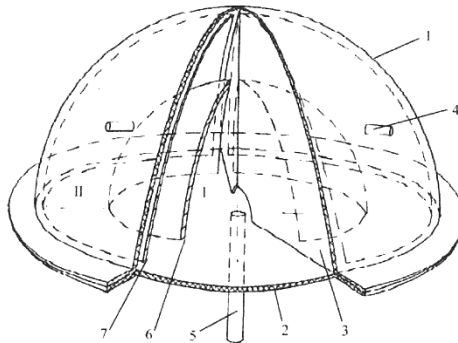


Рис. 3. Схема напівсферичного електродного нагрівача молока:
1 – кришка; 2 – дно; 3 – діелектрична перегородка; 4 – вхід;
5 – вихід; 6 – внутрішній електрод; 7 – зовнішній електрод;
I – ділянка; II – ділянка

При дослідженні електродного пастеризатора сферичної форми потрібно застосувати, відповідно, сферичну систему координат. Але в розрахунках зручніше використовувати спеціальну систему ортогональних координат – координати σ , τ , φ – сплюсненого еліпсоїда обертання (рис. 4).

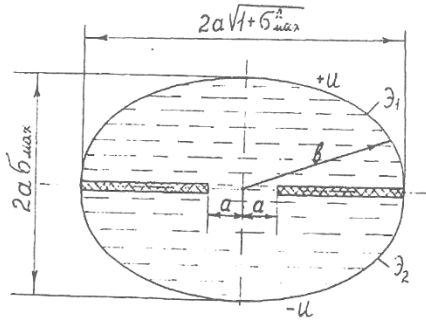


Рис. 4. Розріз однофазної моделі сферичного електродного нагрівача

Відповідно поверхня сплюсненого еліпсоїда обертання описується рівнянням :

$$\frac{X^2 + Y^2}{a_{\text{нб}}^2(\sigma^2 + 1)} + \frac{Z^2}{a_{\text{нб}}^2\sigma^2} = 1 \quad (9)$$

при $\sigma \geq 0$ і $-1 \leq \tau \leq 1$,

де σ, τ, φ – координати сплюсненого еліпсоїда обертання;

X, Y, Z – координати декартової прямокутної системи (рис. 5).

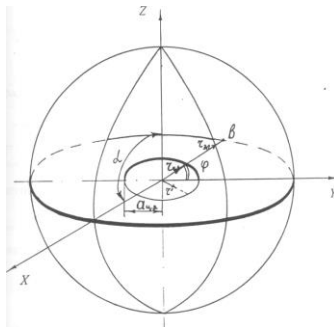


Рис. 5. Схема однофазного сферичного електродного нагрівача

Перетворення до координат сплюсненого еліпсоїда обертання, відповідно, має вигляд :

$$X^2 = a^2(1 + \sigma^2)(1 - \tau^2)\cos^2\varphi; \dots Y^2 = a^2(1 + \sigma^2)(1 - \tau^2)\sin^2\varphi; \dots Z = a\sigma\tau.$$

В даній системі радіус електроду $E1$ (або $E2$) визначається так :

$$a_{цв.} \sigma_{max} \leq r_{ел1} \leq a_{цв.} \sqrt{\sigma^2 + 1}, \quad (10)$$

де $r_{ел1}$ – радіус сферичного електроду ;

$a_{цв.} \cdot \sigma_{max}$ – мала піввісь еліпсоїда;

$a_{цв.} \cdot \sqrt{\sigma^2 + 1}$ – велика піввісь еліпсоїда;

$a_{цв.}$ – відстань до фокуса еліпсоїда обертання, або радіус центрального

створу $r_{цв.}$.

Підвівши вираз (9) до квадрату, отримаємо :

$$a_{цв.}^2 \sigma_{max}^2 \leq r_{ел1}^2 \leq a_{цв.}^2 (\sigma^2 + 1),$$

Хоча $a_{цв.}^2 \sigma_{max}^2 \langle r_{ел1}^2 \rangle$, але $a_{цв.}^2 \sigma_{max}^2 \langle r_{ел1}^2 \rangle - r_{цв.}^2$, звідси виходить, що

$$\sqrt{r_{ел1}^2 - r_{цв.}^2} \langle a \sigma_{max} \langle r_{ел1} \rangle$$

Розділивши обидві частини на $r_{цв.}$, отримаємо :

$$\sqrt{\left(\frac{r_{ел1}}{r_{цв.}}\right)^2 - 1} = \frac{r_{ел1}}{r_{цв.}} \sqrt{1 - \left(\frac{r_{цв.}}{r_{к1}}\right)^2} \approx \frac{r_{ел1}}{r_{цв.}} \left(1 - \frac{r_{цв.}^2}{2r_{ел1}^2}\right) = \frac{r_{ел1}}{r_{цв.}} - \frac{r_{цв.}}{2r_{ел1}}$$

Це означає, що

$$\frac{r_{ел1}}{r_{цв.}} - \frac{r_{цв.}}{2r_{ел1}} \langle \sigma_{max} \langle \frac{r_{ел1}}{r_{цв.}} \rangle \rangle. \quad (11)$$

Підстановка значень $r_{ел1}$ і $r_{цв.}$ показує, що при відношенні $r_{ел1}/r_{цв.} = 3/1$ похибка складає 5,5%, при $r_{ел1}/r_{цв.} = 4/1 \approx 3\%$ і т. д. Це означає, що зміна сферичних координат на координати сплюсненого еліпсоїда обертання σ , τ , φ не призводить до великих похибок і може бути прийнята при аналітичному розрахунку розподілу електричного поля пастеризатора молока.

В цьому випадку лапсасіан скалярної функції рівний

$$\begin{aligned} \nabla^2 \Phi = & \frac{1}{a_{цв.}^2 (\sigma^2 + \tau^2)} \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial \sigma} \cdot \left[(1 + \sigma^2) \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \right] + \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial \tau} \left[(1 - \tau^2) \frac{\partial \Phi}{\partial \tau} \right] + \frac{(\sigma^2 + \tau^2)}{(1 + \sigma^2)(1 - \tau^2)} \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} \right\}. \quad (12) \end{aligned}$$

Рівняння, що описує характер розподілу потенціалу між електродами, отримаємо застосовуючи метод розподілу змінних. Для цього загальний вираз, що має декілька змінних, розділимо і вирішимо

окремо, відносно кожної змінної, а потім просумуємо отримані результати. Так, наприклад, вирішуючи залежність

$$u = \int (\sigma) \cdot T(\tau) \cdot F(\varphi),$$

відносно кожної змінної, отримаємо :

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{d\sigma} &= \int (\sigma) \cdot T \cdot F; \\ \frac{du}{d\tau} &= \int T(\tau) \cdot F; \\ \frac{du}{d\varphi} &= \int T \cdot F'(\varphi); \end{aligned} \right\}$$

Використовуючи в якості вихідного рівняння (12), можна записати :

$$\frac{1}{a_{\text{ин}}^2 (\sigma^2 + \tau^2)} \left\{ \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[(1 + \sigma^2) \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right] + \frac{\partial}{\partial \tau} \left[(1 - \tau^2) \frac{\partial u}{\partial \tau} \right] + \frac{(\sigma^2 + \tau^2)}{(1 + \sigma^2)(1 - \sigma^2)} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} \right\} = 0 \quad (13)$$

Звідси можна зробити висновок, що потенціал залежить тільки від координати σ , і, відповідно, другий і третій доданки рівняння можна вважати рівним 0.

Тобто

$$\frac{d}{d\sigma} (1 + \sigma^2) \frac{du}{d\sigma} = 0,$$

а

$$(1 + \sigma^2) \frac{\partial u}{\partial \sigma} = U_o = \text{const},$$

відповідно,

$$\frac{du}{d\sigma} = \frac{U_o}{1 + \sigma^2} \quad (14)$$

Звідси виходить, що

$$dU = U_o \frac{d\sigma}{1 + \sigma^2} \quad (15)$$

Проінтегрувавши обидві частини рівняння (15), отримаємо :

$$u(\sigma) = U_o \arctg \sigma + c_u.$$

Внаслідок того, що конструкція напівсферичного пастеризатора, має симетрію відносно центру, очевидно, що $c_u = 0$. Тоді вираз (15) має вигляд:

$$u(\sigma_{\text{max}}) = U_o \arctg \sigma_{\text{max}} \quad (16)$$

З рівняння (10) $\sigma_{\max} \approx \frac{r_{e2}}{r_{цв.}}$, отже розподіл потенціалу в камері нагріву визначається відношенням радіусу електрода і радіусу центрального отвору ізолюючої перегородки :

$$u\left(\frac{r_{e1}}{r_{цв.}}\right) = U_o \operatorname{arctg} \frac{r_{e1}}{r_{цв.}},$$

або

$$U_1 - U_{цв.} = 2U_o \operatorname{arctg} \frac{r_{e1}}{r_{цв.}},$$

Звідки потенціал U_o в будь – якій точці між електродного простору рівний

$$U_o = \frac{U_1 - U_{цв.}}{2 \operatorname{arctg} \frac{r_{e1}}{r_{цв.}}} \quad (17)$$

де U_1 – потенціал I електрода ;

$U_{цв.}$ – потенціал центрального вирізу.

Відповідно¹⁵ напруженість поля в будь – якій точці між електродами може бути представлена як

$$|\bar{E}_r| = \frac{du}{dr},$$

де dr – елемент радіусу камери нагріву.

З урахуванням того, що величина напруги U , залежить від координати σ , маємо

$$|\bar{E}_r| = \frac{du}{dr} = \frac{dU}{d\sigma} \cdot \frac{d\sigma}{dr} \quad (18)$$

В свою чергу,

$$dr = \sqrt{(dX)^2 + (dY)^2 + (dZ)^2} = \sqrt{\left(\frac{dX}{d\sigma}\right)^2 + \left(\frac{dY}{d\sigma}\right)^2 + \left(\frac{dZ}{d\sigma}\right)^2} \cdot d\sigma \quad (19)$$

Використовуючи перетворення до координат сплюсненого еліпсоїда обертання і про диференціювавши їх, отримаємо :

$$\begin{aligned} \left|\frac{\partial X}{\partial \sigma}\right| &= \frac{a_{цв.} \sqrt{1 - \tau^2}}{\sqrt{1 + \sigma^2}} \sigma \cos \varphi ; \\ \left|\frac{\partial Y}{\partial \sigma}\right| &= \frac{a_{цв.} \sqrt{1 - \tau^2}}{\sqrt{1 + \sigma^2}} \sigma \sin \varphi ; \end{aligned} \quad (20)$$

¹⁵ Бойко В.С., Бойко В.В., Видолоб Ю.Ф. та ін. Теоретичні основи електротехніки : підручник: У 3 т.; Т. 3: Кола з розподіленими параметрами. Теорія електромагнітного поля. Київ: ІВЦ "Видавництво «Політехніка»", 2013. 241 с.

$$\frac{\partial Z}{\partial \sigma} = a_{\text{цв.}} \tau$$

Підставивши в рівняння (18) вирази (14) і (20), маємо :

$$\begin{aligned} |\bar{E}| &= \frac{du}{dr} = \frac{U_o}{1+\sigma^2} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{a_{\text{цв.}}\sqrt{1-\tau^2}}{\sqrt{1+\sigma^2}}\sigma\cos\varphi\right)^2 + \left(\frac{a_{\text{цв.}}\sqrt{1-\tau^2}}{\sqrt{1+\sigma^2}}\sigma\sin\varphi\right)^2 + (a_{\text{цв.}}\cdot\tau)^2}} = \\ &= \frac{U_o}{1+\sigma^2\sqrt{\frac{a_{\text{цв.}}^2(1-\tau^2)}{1+\sigma^2}}\sigma^2(\cos^2\varphi+\sin^2\varphi)+a_{\text{цв.}}\tau^2} = \\ &= \frac{U_o}{a_{\text{цв.}}\sqrt{\frac{[(1-\tau^2)\sigma^2+\tau^2(1+\sigma^2)](1+\sigma^2)^2}{1+\sigma^2}}} = \frac{U_o}{a_{\text{цв.}}\sqrt{(\sigma^2+\tau^2)(\sigma^2+1)}} \end{aligned}$$

тобто

$$|\bar{E}| = \frac{U_0}{a_{\text{цв.}}\sqrt{(\sigma^2+\tau^2)(\sigma^2+1)}} \quad (21)$$

Очевидно, що напруженість електричного поля в між електродному просторі буде максимальною поблизу країв отвору виділеної зони нагрівання. Тому визначимо значення напруженості поля \bar{E} , як функції відстані від центру еліпсоїда до отвору : $r_q = \sqrt{X^2 + Y^2}$.

З рівняння (11), маємо :

$$\begin{aligned} \frac{Z^2}{a_{\text{цв.}}^2\sigma^2} &= 1 - \frac{r_q^2}{a_{\text{цв.}}^2(1+\sigma^2)}; \\ Z &= a_{\text{цв.}}^2\sigma^2 - \frac{r_q^2\sigma^2}{1+\sigma^2} = \sigma^2\left(a_{\text{цв.}}^2 - \frac{r_q^2}{1+\sigma^2}\right); \\ Z &= \sigma\sqrt{a_{\text{цв.}}^2 - \frac{r_q^2}{1+\sigma^2}}. \end{aligned} \quad (22)$$

У середині отвору $|r_q| \leq a_{\text{цв.}}$; $r_q^2 \leq a_{\text{цв.}}^2$, і, тому,

$$a_{\text{цв.}}^2 - \frac{r_q^2}{1+\sigma^2} > 0,$$

$Z = 0$, якщо $\sigma = 0$.

Продиференціювавши рівняння (22) по σ , отримаємо :

$$\frac{\partial Z}{\partial \sigma} = \sqrt{a_{\text{цв.}}^2 - \frac{r_q^2}{1+\sigma^2}} + \frac{\sigma}{2\sqrt{a_{\text{цв.}}^2 - \frac{r_q^2}{1+\sigma^2}}} \frac{2r_q^2\sigma}{(1+\sigma^2)^2};$$

якщо

$$\frac{\partial Z}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=0} = \sqrt{a_{\text{цв.}}^2 - \frac{r_q^2}{1 + \sigma^2}} = \sqrt{a_{\text{цв.}}^2 - r_q^2};$$

тоді

$$\frac{\partial \sigma}{\partial Z} \Big|_{z=0} = \frac{1}{\sqrt{a_{\text{цв.}}^2 - r_q^2}}. \quad (23)$$

Напруженість електричного поля в виділеній області нагріву, з врахуванням рівнянь (14) і (23)

$$\frac{\partial u}{\partial Z} = E \Big|_{z=0} = \frac{du}{d\sigma} \frac{d\sigma}{dZ} = \frac{U_0}{1 + \sigma^2} \frac{1}{\sqrt{a_{\text{цв.}}^2 - r_q^2}}.$$

Але так як $\sigma = 0$, то

$$E = \frac{U_0}{\sqrt{a_{\text{цв.}}^2 - r_q^2}} \quad (24)$$

або з врахуванням (17),

$$E = \frac{U_1 - U_2}{\sqrt{a_{\text{цв.}}^2 - r_q^2} 2 \arctg \frac{r_{\text{ел1}}}{r_{\text{цв.}}}} \quad (25)$$

Вираз (25) показує, що максимальна напруженість поля, а значить і найбільш інтенсивне нагрівання має місце біля країв виділеної області, тобто, біля краю напівсферичного центрального отвору.

Величина електричного струму в камері нагріву, як і значення потенціалу залежить від опору фази, який визначається не тільки величиною відносного опору середовища, але і конструктивними особливостями камери нагрівання. В даному випадку опір фази залежить

від співвідношення радіусу електрода $r_{\text{ел1}}$, і радіусу виділеної області нагрівання в центрі камери. Звідси справедлива залежність :

$$I = \gamma \int_0^{2\pi} \int_0^{\alpha} E(r_q) r_q dr_q d\varphi.$$

Продиференціювавши даний вираз, та прийнявши що $r_q = a_{\text{цв.}} \sin \alpha^0$, або $dr_q = a_{\text{цв.}} \cos \alpha^0 d\alpha^0$ і враховуючи, що $\varphi^0 = 2\pi$, $0 \leq \alpha^0 \leq \frac{\pi}{2}$.

Тоді з врахуванням (24),

$$\begin{aligned} I &= 2\pi\gamma \int \frac{U_0}{\sqrt{a_{\text{цв.}}^2 - r_q^2}} r_q dr_q = 2\pi U_0 \gamma \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{a_{\text{цв.}}^2 \sin \alpha^0 \cos \alpha^0 d\alpha^0}{a_{\text{цв.}} \sqrt{1 - \sin^2 \alpha^0}} = \\ &= 2\pi U_0 a_{\text{цв.}} \gamma \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \alpha^0 d\alpha^0 = 2\pi U_0 a_{\text{цв.}} \gamma \left[-\cos \alpha^0 \right]_0^{\frac{\pi}{2}} = 2\pi U_0 a_{\text{цв.}} \gamma; \\ I &= 2\pi U_0 a_{\text{цв.}} \gamma = 2\pi U_0 r_{\text{цв.}} \gamma \end{aligned} \quad (26)$$

Знаючи, що $U_1 - U_{цв.} = 2U_0 \arctg \frac{r_{ел.}}{r_{цв.}}$, визначимо опір фази

$$R_{\phi} = \frac{U_1 - U_{цв.}}{I} = \frac{2U_0 \arctg \frac{r_{ел.}}{r_{цв.}}}{\pi U_0 \gamma_{цв.}} = \frac{2 \arctg \frac{r_{ел.}}{r_{цв.}}}{\pi \gamma_{цв.}}; \quad (27)$$

$$R_{\phi} = \frac{2 \arctg \frac{r_{ел.}}{r_{цв.}}}{\pi \gamma_{цв.}}.$$

Опір фази реального електродного пастеризатора молока, відповідно до схеми заміщення, (рис. 3) складає:

$$R_{\phi} = \frac{2 \arctg \frac{r_{ел.}}{r_{цв.}}}{\varphi^{\circ} \gamma_{цв.}} \quad (28)$$

де φ° – центральний кут, що визначає величину відсіку.

Враховуючи, що допустима напруженість електричного поля $E_{доп.ел.}$ на електродах дорівнює

$$E_{доп.ел.} = \frac{j_{доп.}}{\gamma_{\Theta}} \quad (29)$$

де $j_{доп.}$ – допустима густина струму на поверхні електродів, А/м²;
а щільність струму

$$j_{доп.} = \frac{I}{S_{ел}} = \frac{U_{\phi}}{R_{\phi} S_{ел}} \quad (30)$$

де $S_{ел}$ – найменша активна поверхня елемента електродної групи, м²;

I – струм з цієї поверхні, А;

U_{ϕ} – напруга фази, В.

Обчислимо напруженість електричного поля безпосередньо біля електродів. Для цього з рівняння (29) підставимо (20) і (28), а також величину площі електрода з виразу (31) :

$$S_{ел.} = \frac{2}{3} \pi r_{ел.}^2. \quad (31)$$

В результаті нескладних розрахунків отримаємо :

$$E_{доп.ел.} = \frac{U_{\phi} r_{цв.}}{2 r_{ел.}^2 \arctg \frac{r_{ел.}}{r_{цв.}}}; \quad (32)$$

де $E_{доп.ел.}$ – напруженість електричного поля біля електродів, В/м.

Розглянемо іншу ділянку. Кожен відсік є середовищем між сусідніми концентричними напівсферичними електродами. Різниця потенціалів між концентричними сферами, відповідно, складе :

$$U_{1-2} = U_{e_n} - U_{e_2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_{e_n}} \right) - \left(\frac{1}{r_{e_2}} \right) = \frac{q(r_{e_2} - r_{e_n})}{4\pi\epsilon_0 r_{e_n} r_{e_2}}, \quad (33)$$

де r_{e_n} – радіус внутрішнього електроду, м ;

r_{e_2} – радіус зовнішнього електроду, м.

Використовуючи метод електростатичної аналогії¹⁶, з виразу (33) визначимо ємність між електродами

$$C_{1-2} = \frac{q}{U_{1-2}} = 4\pi\epsilon_0 \frac{r_{e_n} r_{e_2}}{r_{e_2} - r_{e_n}} \quad (34)$$

Замінивши ємність провідністю R^{-1} , а діелектричну проникність відносною електропровідністю γ , отримаємо :

$$R = \frac{1}{4\pi\gamma} \cdot \frac{r_{e_2} - r_{e_n}}{r_{e_n} r_{e_2}}.$$

Опір між концентричними електродами в кожному відсіку складе

$$R = \frac{180^\circ (r_{e_2} - r_{e_n})}{\pi\gamma r_{e_n} r_{e_2} \varphi^0}. \quad (35)$$

Так як напруженість електричного поля визначається як $\vec{E} = \frac{\vec{D}}{\epsilon}$, а індукція на внутрішньому електроді $\vec{D} = \frac{q}{4\pi r_{e_n}^2}$, то вираз для визначення напруженості поля перетворюється і має вигляд :

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_{e_n}^2} \quad (36)$$

Найбільша напруженість поля між концентричними електродами знаходиться біля поверхні внутрішнього електроду \vec{E}_{e_n} . Визначимо з рівняння (36), підставивши в нього q з виразу (34) :

$$\vec{E}_{\max,2} = U_{1-2} \frac{r_{e_2}}{r_{e_n} (r_{e_2} - r_{e_n})} \quad (37)$$

Таким чином, отримані вирази (25) і (33) доводять, що максимальна напруженість електричного поля збільшується в напрямі до вихідного отвору і набуває максимальне значення біля краю центрального напівсферичного отвору.

Вирази, що визначають величину опору (28) і (35) фази нагрівача, залежать від співвідношення між радіусами електродів і радіусом центрального напівсферичного отвору. З них отримуємо вирази для визначення геометричних коефіцієнтів системи електродів Γ_1 і Γ_2 :

¹⁶ Слободян Л.Р., Шеховцов В.І. Електромагнітні поля електротехнологічних установок. Навчальний посібник. Київ: Либідь. 1994. 176 с.

$$\Gamma_1 = \frac{2 \arctg \frac{r_{e1}}{r_{\text{цв.}}}}{\varphi^\circ r_{\text{цв.}}} ; \quad \Gamma_{1-2} = \frac{180^\circ (r_{e12} - r_{e1})}{\pi \rho^\circ r_{e1} r_{e12}} ; \quad (38)$$

де Γ_1 – коефіцієнт, що враховує геометричні параметри електродної системи: внутрішній електрод – центральний напівсферичний виріз, 1/м ;

Γ_{1-2} – коефіцієнт, що враховує геометричні параметри електродної системи : два найближчих концентрично розташованих електроди, 1/м.

З метою полегшення роботи внутрішніх електродів між концентричними електродами встановлюються додаткові діелектричні перегородки, що створюють канали для проходження рідини.

При цьому максимальна густина струму і напруженість електричного поля зміщується в область найменшого перерізу потоку – в щілиноподібний канал змінної площі, що створюється двома суміжними перегородками.

Таким чином, отримані вирази, що описують розподіл електричного поля електродної системи з одним або декількома електродами в кожному відсіку, дозволяє визначити електричні і геометричні параметри камери нагрівання.

Для підтвердження цих результатів необхідно провести експериментальні дослідження розподілу електричного поля сферичної камери електродного нагрівання.

4. Експериментальні дослідження електричного поля в між електродному просторі камери нагрівання

При експериментальному дослідженні електричного поля, розташованого в між електродному просторі, використовувався електролітний метод моделювання. В його основу закладені такі вимоги :

1. Розподіл потенціалу в однорідному середовищі не залежить від провідникових властивостей середовища, а значить потенціальне поле, що досліджується між електродами можна отримати в будь-якому однорідному середовищі електролітичної ванни.

2. При заданому потенціалі електродної системи в будь-якому однорідному середовищі, що проводить струм розміри екіпотенціальних поверхонь поля і відстань між ними визначаються тільки геометричними розмірами електродної системи.

3. Збільшення або зменшення напруги на електродах не порушує форми екіпотенціальних поверхонь поля і напряму вектора напруженості, а тільки викликає пропорційні зміни значень потенціалів поверхонь і напруженості поля.

Для визначення характеру електричного поля трифазного електродного пастеризатора з виділеною зоною нагрівання була використана модель (рис. 1), що складалася з напівсферичної ванни радіусом 500 мм, що виготовлена з листової міді, із заглибленими в неї трьома електродами у вигляді 1/3 частини на півсфері і розділеними між собою діелектричними перегородками під кутом 120° . В центральній частині перегородок був зроблений виріз радіусом r . Об'єм моделі заповнювався електролітом до рівня покриття електродів.

Якщо на електроди моделі подати трифазну напругу, то між трьома електродами з'являється електричне поле, подібне до електричного поля електродного нагрівача.

Подача напруги і вимірювання проводилися відповідно до схеми приведеної на рисунку 6.

Один з електродів приєднувався до потенціального виводу генератора G змінної напруги, а інший – заземлювався на корпус ванни.

Вимірювання потенціалів точок у між електродному просторі проводились точковим зондом, потенціал якого до корпусу ванни вимірювався вольтметром V .

Потенціальний зонд являв собою тонку сталеву голку, добре ізольовану по всій довжині окрім самого кінця. Зонд закріплювався на ізольованій від корпусу ванни координатній рамці з міліметровою та кутовою шкалою і міг вільно рухатися від центру ванни до її стінок, в тому числі, і в глибину електроліту, а також по колу відносно центру з точністю, відповідно 1 мм і 1° . Рухаючись в просторі відсіку камери нагрівання, створеного двома суміжними перегородками і електродами, зонд приймав потенціал тієї точки середовища, в якій знаходився його відкритий кінець.

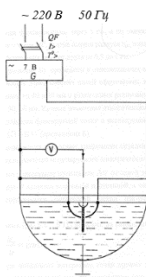


Рис. 6. Схема моделювання розподілу потенціалу між електродами в електролітичній ванні



Рис. 7. Загальний вигляд установки для моделювання розподілу електричного поля

Електробезпека забезпечувалася використанням низької напруги $U = 7В$ і малих щільностей струму на електродах, та виключають нагрівання електроліту і його поляризацію, а сама ванна, корпус генератора і вольтметр – заземлювалися. Потенціал точок, що знаходились в радіальному напрямі руху зонду фіксувалися через 1 см, а по колу відносно осі симетрії – через 20° .

В області центрального вирізу зондування проводилося в точках, що знаходяться на відстані від 0,5 см до 1 см одна від одної.

Враховуючи те, що приріст потенціалу u від однієї екіпотенціальної поверхні до іншої є величиною постійною, а число інтервалів цілим числом, використовувався графічний метод побудови картини поля (рис. 8).

Отримані картини полів для різних радіусів електродів і центральних вирізів дозволили експериментально визначити провідність області, що досліджується. Суворий розподіл поля на «криволінійні квадрати» дозволив також рахувати провідність елементарного об'єму, що не залежить від геометричних розмірів.

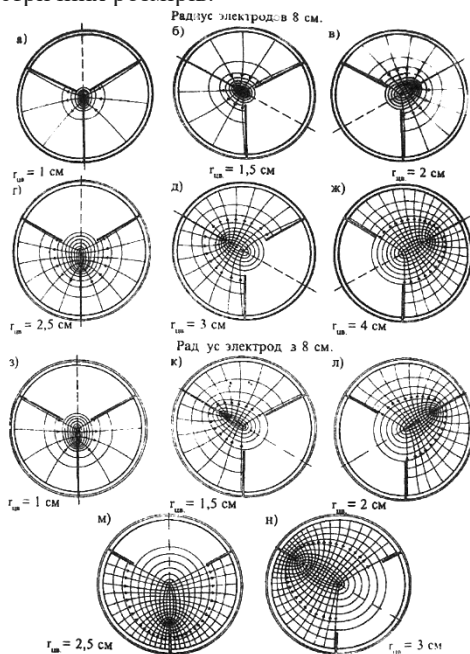


Рис. 8. Зображення електричного поля в між електродному просторі напівсферичних електродів моделі електропастеризатора

Тоді, позначивши число квадратів в площині, що перетинається кожною силовою лінією електричного поля через a , а число квадратів, що перетинаються кожною еквіпотенціальною лінією через b (рис. 9), сумарну провідність поля $1/R$ відповідно уявляємо як

$$\frac{1}{R} = \frac{m_{кв.}}{n_{кв.}} \cdot \frac{1}{R_{кв.}} \quad (39)$$

де $R_{кв.}$ – опір кожного «криволінійного квадрату», Ом.

Враховуючи, що $R = \frac{1}{\Delta b \gamma}$, отримаємо :

$$\frac{1}{R} = \frac{m_{кв.}}{n_{кв.}} \cdot \Delta b \gamma, \quad (40)$$

де γ – відносна електропровідність продукту, $Ом^{-1} \cdot м^{-1}$;

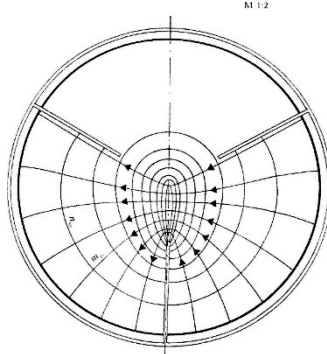


Рис. 9. Зображення електричного поля в між електродному просторі напівсферичних електродів моделі електропастеризатора з виділеною областю нагріву при радіусі електрода 4 см і радіусі центрального вирізу 1, 5 см (вид зверху)

b – висота неізолюваного кінця зонду або товщина провідного шару, м (в експерименті $b \approx 1,9$ мм).

Вираз $\left(\frac{m_{кв.}}{n_{кв.}}\right) \Delta b$ являє собою величину, що характеризує геометричні параметри електродної системи. Звідки коефіцієнт « Γ » дорівнює

$$\Gamma = \frac{n_{кв.}}{m_{кв.} \Delta b} \quad (41)$$

Формула (40) дає можливість розрахувати провідність будь – якого змодельованого поля систем сферичних електродів. Використовуючи аналітичні вирази (38) і відношення «Г» (41), отримане експериментально, проведемо порівняння результатів (табл. 1).

Таблиця 1

**Порівняльні результати визначення коефіцієнта «Г»
отриманого експериментально і аналітично**

Γ / $\frac{r_{enl}}{r_{ne}}$	$\frac{0,04}{0,03}$	$\frac{0,04}{0,025}$	$\frac{0,04}{0,02}$	$\frac{0,04}{0,02}$	$\frac{0,04}{0,01}$	
$\Gamma = \frac{2 \arctg \frac{r_{enl}}{r_{ne}}}{\varphi \cdot r_{ne}}$	29,52	38,66	52,86	77,16	126,6	При $\Phi^{\circ}=120^{\circ}$
$\Gamma = \frac{n_{en}}{m_{en} \cdot \Delta \varepsilon}$	34,1	36,2	52,63	75,19	131,58	

Експериментальне дослідження розподілу електричного поля в між електродному просторі, підтвердило припущення п. 4 і 5, викладені при обґрунтуванні конструкції електродної камери нагрівання, підрозділу 1. Крім цього, отримані при моделюванні значення геометричного коефіцієнту «Г» має високий збіг у значеннях, що визначені аналітичною залежністю (38). Визначивши величину геометричного коефіцієнту «Г», обчислимо значення інших параметрів електродного пастеризатора молока. Напруженість електричного поля біля поверхні електродів $E_{el.}$, знаходимо з виразу (32):

$$E_{el.} = \frac{U}{r_{enl}^2 \cdot \Gamma} \quad (42)$$

Зміну щільності струму в змінному перерізі потоку молока визначимо з відношення :

$$j_{nom.} = \frac{S_{el.}}{S_{nom.}} j_{el.}, \quad (43)$$

де $j_{nom.}$ – щільність струму в потоці молока з площею перерізу $S_{nom.}$, А/м²;

$j_{el.}$ – щільність струму на поверхні електродів площею $S_{el.}$, А/м².

Швидкість нагрівання елементарного об'єму молока, в залежності від щільності струму, можемо визначити :

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{j_{nom.}^2}{\rho c \gamma_{\Theta}}, \quad (44)$$

де ρ – густина молока, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 c – теплоємність молока, $\text{Дж}/\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}$;

γ_{Θ} – електропровідність молока при температурі Θ° , $\text{Сім}/\text{м}$.

Взявши за основу геометричні відношення з табл. 1, і припустивши, що щільність струму на електродах з нержавіючої сталі $j_{\text{ел.}} = 1000 \text{ А}/\text{м}^2$, а на титанових електродах $j_{\text{ел.}} = 10000 \text{ А}/\text{м}^2$, проведемо розрахунки напруженості $E_{\text{ел.}}$, щільності струму $j_{\text{ел.}}$ і швидкості нагрівання $\frac{d\Theta}{dt}$.

Результати заносимо в табл. 2.

Аналізуючи результати експерименту, слід відмітити, що:

– при зменшенні відношення $r_{\text{ел.}}/r_{\text{цв.}} < 2,0$ знижується ефективність віддалення зони високих температур від поверхні електродів, а щільність струму, що забезпечує швидкість нагрівання більшу $8^{\circ}\text{C}/\text{с}$ (табл. 2) можлива тільки з титановими електродами;

– при збільшенні $r_{\text{ел.}}/r_{\text{цв.}} < 4,0$ – різко виражений ефект віддалення високих температур від електродів (рис. 8.а), максимальна щільність струму.

Виходячи з отриманих результатів, при конструюванні сферичних пастеризаторів, доцільно використовувати відношення між радіусами електроду і центрального вирізу в межах $2,5 < r_{\text{ел.}}/r_{\text{цв.}} < 4,0$ забезпечує швидкість нагрівання $240^{\circ}\text{C}/\text{с}$, але при цьому нераціонально використовується весь об'єм пастеризатора, зменшується загальна потужність і продуктивність апарату.

ВИСНОВКИ

У результаті дослідження проточного електродної камери нагрівання електропастеризатора молока прямої дії встановлено :

1. Сферична конструкція камери нагрівання забезпечує рівномірний розподіл електричного поля між електродами, при чому максимальна щільність струму віддалена від електродів і знаходиться в області центрального вирізу.

2. Максимальна напруженість електричного поля також зміщена в напрямку до центрального вирізу. Відношення радіусу електроду і центрального вирізу $2,5 < r_{\text{ел.}}/r_{\text{цв.}} < 4,0$, забезпечує швидкість нагрівання молока в потоці більшу $8^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

3. Аналітично визначені та експериментально доведені геометричні коефіцієнти електродної системи «Г» можуть використовуватися при розрахунку пастеризаторів молока зі сферичними електродами.

АНОТАЦІЯ

Коротко наведено стан та тенденції розвитку обладнання для первинної обробки молока в умовах фермерських господарств та можливості застосування електропастеризаторів. Висвітлені питання вибору конструкції електродної камери нагрівання проточного електропастеризатора молока. Особливу увагу приділено теоретичному дослідженню розподілу електричного поля в електродній камері для забезпечення рівномірного нагрівання молока в потоці. Розкрито питання експериментального підтвердження розподілу електричного поля між електродами в електролітичній ванні. Приведені картини побудови електричного поля в результаті дослідження. Розглянуто також актуальну задачу визначення геометричних коефіцієнтів електродної системи для розрахунку пастеризаційної камери зі сферичними електродами.

Література

1. Енергетична стратегія України на період до 2030 року // Офіційний сайт. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13#Text> (дата звернення 16.04.2024).
2. Стратегія розвитку аграрного сектору економіки на період до 2020 року // Офіційний сайт. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/806-2013-%D1%80#Text> (дата звернення 16.04.2024).
3. Сухенко, Ю.Г. Сарана В.В., Сухенко В.Ю. Технологічне обладнання та лінії молокопереробних підприємств : навчальний посібник. Київ: Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2013. 658 с.
4. Ніколаєнко С.М. Теоретичні аспекти і передумови створення кластеру молочної промисловості. Наукові праці Національного університету харчових технологій. Київ: НУХТ, 2015. Т. 21, № 2. С. 62–69.
5. Про безпечність та якість харчових продуктів : закон України : чинне законодавство зі змінами та допов. станом на 15 січ. 2015 р. // Офіційний сайт. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771/97-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення 16.04.2024).
6. Інструкція з профілактики та боротьби з туберкульозом тварин: Наказ Державного комітету ветеринарної медицини України 03.09.2009 N 316 // Офіційний сайт. – URL: https://zakononline.com.ua/documents/show/295827___295892 (дата звернення 16.04.2024).
7. Скарбовійчук О.М., Кочубей-Литвиненко О.В., Чернюшок О.А., Федоров В.Г. Хімічний склад і фізичні характеристики молочних продуктів : навч. посібник-довідник : Київ. МОН України, Національний університет харчових технологій. 2012. 311 с.

8. Баженов І.Г. Дослідження розподілу струму та впливу матеріалу електродів на конструктивні параметри та експлуатаційну надійність електродних водонагрівачів: автореф. дис. ... канд. техн. Наук: Харків, 1970. 25 с.

9. Магда В.Й., Жила В.І., Кунденко Н.П. Розробка нового обладнання для теплової обробки молока. *Вівчарство*. 1998. Вип. 30. С. 117 – 120.

10. Магда В.Й., Жила В.І. Обґрунтування оптимальних параметрів пастеризаторів молока електричного нагрівання опором: Збірник праць. Харків: ХДТУСГ. 1999. С.47-50.

11. Кассіч Ю.Я. Знешкодження збудника туберкульозу в молоці на пастеризаторі інфрачервоного електричного нагріву. *Ветеринарна медицина України*. 1999. Вип. 12. С. 14-17.

12. Васецький Ю.М. Електродинаміка. Основні поняття, потенціальні та квазістаціонарні поля. Навчальний посібник. Київ: Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2009. 160 с.

13. Матвійчук В.А., Рубаненко О.Є., Стаднійчук І.П. Електротехнології в АПК. Навчальний посібник. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2020. 272 с.

14. Тозон О.В., Маергойз І.Д. Розрахунок тривимірних електромагнітних полів. Київ. *Техніка*. 1974. 371 с.

15. Бойко В.С., Бойко В.В., Видолоб Ю.Ф. та ін. Теоретичні основи електротехніки : підручник: У 3 т.; Т. 3: Кола з розподіленими параметрами. Теорія електромагнітного поля. Київ: ІВЦ "Видавництво «Політехніка»", 2013. 241 с.

16. Слободян Л.Р., Шеховцов В.І. Електромагнітні поля електротехнологічних установок. Навчальний посібник. Київ: Либідь. 1994. 176 с.

Information about the authors:

Zhylya Viktor Ivanovych,

Candidate of Technical Sciences

Professor at the Department of Integrated Electrical Technologies and

Power Engineering

State Biotechnological University

44, Alchevskykh str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Yakushenko Yevgen Mykolaiovych,

Candidate of Technical Sciences

Associate Professor at the Department of Integrated Electrical

Technologies and Power Engineering

State Biotechnological University

44, Alchevskykh str., Kharkiv, 61002, Ukraine