

РОЗРОБКА ІННОВАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ІНАКТИВАЦІЇ МІКРОФЛОРИ МОЛОКА

В. М. Задорожна, аспірантка

E-mail: verazadorozna@meta.ua

В. І. Жила, кандидат технічних наук, доцент

E-mail: Viz.10@ukr.net

М. Л. Лисиченко, доктор технічних наук, професор

E-mail: 1prlysychenko@ukr.net

Н. Г. Косуліна, доктор технічних наук, професор

E-mail: kosnatgen@btu.kharkiv.ua

Є. М. Євтушенко, кандидат технічних наук, доцент

E-mail: kosnatgen@btu.kharkiv.ua

Державний біотехнологічний університет

Анотація. *Стаття присвячена розробці інноваційного обладнання для інактивації мікрофлори молока. Представлено аналіз існуючих способів пригнічення розвитку та знищення мікроорганізмів у молоці для покращення показників якості продукту, показані переваги та недоліки існуючого обладнання для пастеризації. Проведено огляд альтернативних способів інактивації молока, зокрема впливу ультрафіолетових променів на бактерії та нижчі організми та зроблено узагальнення, що є основною перевагою ультрафіолетової (УФ) обробки молока крім його бактерицидного ефекту є можливість забезпечення при ощадних режимах мінімального впливу на білки.*

Зважаючи на обмежену проникність УФ променів у молоко запропоновано пристрій – знезаражувач-молокоочисник, який відділяє мікроорганізми від основної частини продукту, розміщуючи їх у вигляді тонкої ламінарної плівки доступної для ефективного опромінення. Особливу увагу приділено обґрунтуванню параметрів секції ультрафіолетового опромінювання, викладено методику гідравлічного розрахунку руху пристрою, надано методику визначення бактерицидної ефективності УФ-опромінювання мікроорганізмів та необхідної для цього летальної дози. Задаючи продуктивність установки, знаючи бактерицидну дозу для інактивації бактерій та щільність випромінювання джерела УФ-променів, визначаються розміри секції опромінювання і встановлена електрична потужність обладнання.

У статті запропоновані сучасні світлодіодні збірки з необхідним діапазоном УФ-випромінювання, схеми їх з'єднання та управління устаткуванням.

Ключові слова: *секція УФ опромінювання, інактивація молока, знезаражувач-молокоочисник, летальна доза опромінення, світлодіоди*

Актуальність. Конкурентоздатність продукції залежить від багатьох чинників, зокрема, від вартості сировини, собівартості виробництва, якості готових товарів, важливості для життя, її поширення та насичення на ринку, тощо. Традиційні методи, що застосовуються у виробництві, практично вичерпали свої можливості щодо ефективності та кардинального покращення якісних, технологічних, економічних та споживчих можливостей. Людство увійшло в еру нанотехнологій та мікросвіту, де є широке поле для вдосконалення більшості виробничих та технологічних процесів, урізноманітнення продукції, підвищення енергоефективності та зниження її собівартості.

Молоко та молочні продукти є обов'язковими складовими раціону харчування людини і від технології виробництва, заготовки та переробки залежить безпечність, смак та вартість кінцевого продукту. Молоко – цінний біологічний продукт, до складу якого входять жири, білки, лактоза, вітаміни, мікроелементи тощо. Якість молока залежить від наявності в ньому різних мікроорганізмів, у тому числі і патогенних. При чому, чим більша кількість бактерій, тим нижча якість молока. Мікроорганізми існують у молоці на будь-якому етапі його заготівлі та переробки [1].

Первинне молоко за своїми властивостями містить такі недопустимі компоненти, як мікрочастинки забруднення і крові, клітини з вимені, осад, домішки і, звичайно, бактеріальну флору, тому молоко підлягає первинній обробці: очищенню від твердих домішок, слизу, іншого бруду та подальшого охолодження до 4-8 °С.

Відомі такі способи пригнічення, розвитку та знищення мікроорганізмів у молоці, їх можна поділити на три групи: біологічні, хімічні і фізичні.

Біологічні.

До біологічних способів, відносять засоби боротьби, що пригнічують розвиток колоній мікроорганізмів, наприклад, при активізації ферментів, антитіл та

лейкоцитів наступає бактерицидна фаза здатна призупинити процес розмноження мікрофлори в молоці, а застосування антибіотиків може знезаражувати сире молоко.

Перший спосіб вже застосовується під час первинної обробки продукту інфрачервоним низькоінтенсивним лазерним випромінюванням, зокрема на підприємствах Казахстану [2], а другий має суттєві недоліки, зокрема тому, що антибіотики залишаються в молоці навіть після термічної обробки та його зберігання і чинять негативний вплив на організм споживача, а також ускладнюють технологію при виробництві молочних продуктів. В Україні цей спосіб у молочній промисловості не застосовується [3].

Хімічні.

Ця група способів впливу на молоко консервантами, дезінфектантами і їх комбінаціями. Найкращим з них вважається спосіб консервування перексидом водню (H_2O_2) [3, 4].

В Україні цей спосіб заборонений [5], тому що консервувати будь-якою хімічною речовиною молоко, призначене для харчових цілей, категорично заборонено, оскільки в результаті реакції з молоком можлива залишкова токсичність хімічних речовин.

Фізичні.

Найпоширеніші способи - фізичні. Вони діють як на знищення, так і на видалення мікроорганізмів із молока. Ці способи можуть здійснюватися без зміни температури молока і з її зміною (з підвищенням або зниженням).

До цих методів належать: фільтрація, відцентрове очищення, охолодження, заморожування, кип'ятіння, пастеризація, стерилізація, ультрапастеризація, поверхневе тертя, тонкошарова пастеризація, електропастеризація, обробка струмами надвисокої частоти, ультразвуком, електромагнітними коливаннями тощо [2, 4-6].

Зазвичай зниження показників забруднення продукту досягається традиційними способами: механічним очищенням - фільтрацією або сепарацією в центрифугі, обробкою теплом або холодом.

Загальним недоліком традиційних способів обробки молока для інактивації мікрофлори є:

- низька енергетична ефективність при інактивації (для знищення мізерної маси мікроорганізмів доводиться нагрівати до високих температур увесь об'єм продукту з витримуванням його за максимальної температури певний час);
- зміна природного смаку та руйнування цінних вітамінів при обробці;
- технологічні втрати продукту (вихід на режим та завершення процесу обробки).

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Застосування альтернативних способів обробки молока підвищує енергоефективність процесу, зменшує негативний вплив на біологічну цінність продукту, але, переважно, вимагає складного дорогого обладнання чи має обмеження.

«Холодна пастеризація» вже тривалий час цікавить виробників молочних продуктів через високу енергоефективність та мінімальний вплив на природну якість молока. Особливо це стосується виробників твердих сирів. Сучасна технологія виробництва твердого сиру передбачає бактеріальне очищення сирого молока в бактофузі (за необхідності) при температурі вище 60 °С, але це не гарантує знешкодження патогенної мікрофлори. Тому, інтерес до вивчення впливу ультрафіолетового випромінювання (УФВ) на компоненти і мікрофлору харчових продуктів обумовлений перспективою їх цілеспрямованого використання для поглибленого регулювання властивостей одержуваних продуктів. Зміни, що відбуваються під дією УФВ у бактеріях і нижчих організмах, проходять наступні три стадії: збудження і посилення руху, початок деструктивних змін, смерть клітини в результаті фотохімічних процесів. Крива бактерицидної ефективності УФВ відповідає спектру поглинання нуклеїнових кислот, тобто мішенню УФВ є молекули ДНК. Найчутливішою до його дії функція клітини - поділ. Опромінення при певній дозі викликає зупинку поділу близько 90 % бактеріальних клітин, викликаючи в нуклеїнових кислотах зміни, які згубним чином впливають на ріст, поділ, спадковість клітин, тобто на їх основні прояви життєдіяльності [7].

З іншого боку, існують дані, які доводять, що окрім прямої дії на ДНК, УФВ індукує непрямим шляхом мутації, викликаючи в клітинах утворення вільних радикалів і перекисів, що мають мутагенні властивості. Такі ж мутагенні речовини виникають в рідких живильних середовищах для культивування бактерій, що помітно збільшує у них частоту мутацій [8].

Летальна дія УФВ на хвороботворні мікроорганізми і його безсумнівна ефективність давно добре відомі і підтверджені багатьма дослідженнями. Найбільш позитивні результати і успішна ефективність досягнуті за рахунок використання УФВ при дезінфекції води через її високу прозорість при знешкодженні вірусів, бактерій, дріжджів, найпростіших організмів і інших патогенів людини [9]. Велике коло досліджень присвячене харчовим рідинам, що має обмежену прозорість (меланж, молоко тощо) [10-15].

Наприклад, при впливі УФВ дозою $\sim 2,860$ мДж/мл, та середній швидкості потоку 168 мл/хв, досягається зниження *Mycobacterium avium subsp.* Цей тип бактерій вкрай стійкий до ультрафіолетового опромінення, що підтверджує дослідження інших авторів [16-18], які досліджували інактивацію *Mycobacterium avium subsp. Paratuberculosis* при УФ-впливі в повітрі і воді.

У 2002 р., група дослідників [19] провела досить серйозне випробування, метою якого було вивчення впливу пульсаційного УФ лазерного випромінювання (248 нм) на знезараження коров'ячого молока. Об'єм молока, в кварцовій кюветі, становив 1 мл. Ріст мікроорганізмів - мезофільних аеробів (*E. coli* O157: H7, *L. monocytogenes*, *Salmonella choleraesuis*, *Yersinia enterocolitica*, *Staphylococcus aureus*, *Aeromonas hydrophila*, *Serratia marcescens*) був відзначений у зразках, опромінених дозами від 0,3-6,66 Дж/см², однак при збільшенні дози до 12,6 Дж/см² та тривалості впливу до 56 с, не було виявлено росту жодного із зазначених мікроорганізмів протягом 21 дня. Таким чином, автори встановили, що, в принципі, рівень бактеріального обсіменіння можливо контролювати за допомогою лазерного пульсаційного ультрафіолетового випромінювача, і досягти принаймні скорочення кількості бактерій на 2 порядки.

Основною перевагою обробки УФВ молока крім його бактерицидного ефекту є можливість забезпечення при певних режимах мінімального впливу на білки [20-22]. Тому питання його застосування для знезараження молока, як і для води досить актуальне.

Мета дослідження – розробка інноваційної технології та обладнання для інактивації мікрофлори молока.

Матеріали та методи дослідження. Молоко є складною системою, основні компоненти якої - жир, білок, лактоза, вітаміни, мінеральні речовини тощо - можуть існувати у колоїдному або розчиненому у воді стані. Типове молоко корів європейських порід містить 87 % води, 3,8 % жиру, 3,4 % білків, 4,5 % цукру (лактози тощо) та 1,3 % твердих речовин. Всього у ньому містяться близько 80 мінеральних елементів, причому в ідеальній для засвоєння нашим організмом формі [1].

Зважаючи на обмежену прозорість молока для УФВ запропоновано пристрій – знезаражувач-молокоочисник, який забезпечує відділення мікрофлори від основної частини молока і поєднує технологію механічного очищення продукту в центрифугі із знезаражуванням бактерій в тонкому прошарку в секції ультрафіолетового двостороннього опромінення [23].

Завдяки високій швидкості обертання барабану 2 очисника закріпленого на вертикальному валу пристрою очищене від механічних та біологічних домішок молоко надходить до секції УФ опромінювання, утворену двома коаксіальними кварцовими трубками різного діаметру 5 та 6. Під дією відцентрових сил мікрофлора молока з більшою питомою вагою осідає в прошарку товщиною до 100 мкм на внутрішній стінці зовнішньої кварцової трубки 5 та обробляється УФВ з необхідною енергетичною дозою за допомогою світлодіодів 7, 8 (рис.1) [23].

Результати досліджень та їх обговорення. При розрахунку параметрів секції ультрафіолетового двостороннього опромінювання спочатку скористаємося рівнянням нерозривності потоку рідини для визначення руху молока в центрифугі [24]:

$$\rho_1 \cdot v_1 \cdot S_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot S_2 , \quad (1)$$

де v_1, v_2 - швидкості рідини в тонких перерізах 1 та 2, м/с; ρ_1, ρ_2 - рідини в 1 та 2 перерізах, кг/м³; S_1, S_2 - площа перерізів 1 та 2 рідини, м².

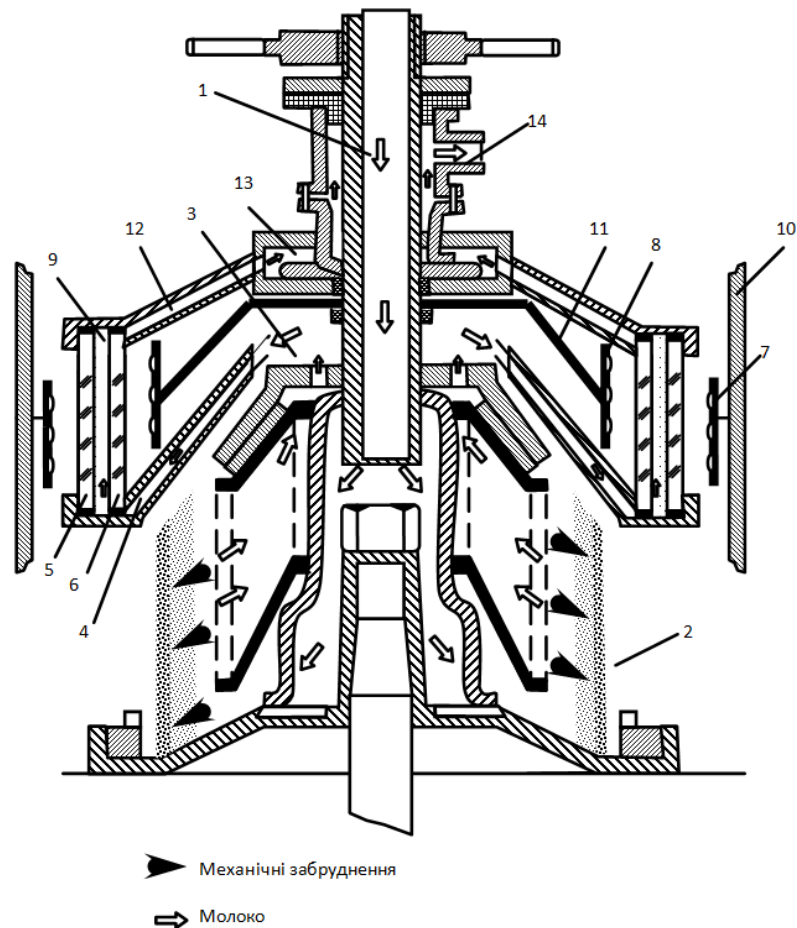


Рис. 1. Будова незаражувача-молокоочисника:

1- центральна молочна трубка; 2 – барабан очисника; 3 – приймальник очищеного молока; 4 – канал ротору; 5,6 – кварцові трубки секції УФ опромінювання; 7,8 – зовнішня та внутрішня світлодіодні матриці; 9 – канал для молока секції УФ опромінювання; 10 – мідний кожух установки; 12 – вивідний канал.

Для рідини, що не стискується ($\rho_1 = \rho_2 = \rho$) рівняння нерозривності потоку спрощується

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2, \text{ або } S_1 \cdot v_1 = \text{const} \quad (2)$$

Із рівняння 2 випливає, що чим більший переріз трубки течії, тим менша швидкість течії і навпаки.

У випадках, коли рідина рухається по руслу змінного перерізу і різної висоти, то для деякого її об'єму змінюється і кінетична і потенціальна енергія об'єму рідини. Тому можемо, після перетворень, записати:

$$\frac{\rho \cdot v_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_1 + P_1 = \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_2 + P_2, \quad (3)$$

або для довільного перерізу

$$\frac{\rho \cdot v^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h + P = \text{const} \quad (4)$$

де $\frac{\rho \cdot v^2}{2}$ - динамічний тиск, $\rho \cdot g \cdot h$ - гідростатичний тиск, P – статичний тиск.

Вздовж вертикалі на бактерію, що існує в молоці діє сила Архімеда та сила тяжіння. Результуючу силу, яка діє на бактерію вздовж осі ОУ, можемо визначити за виразом:

$$F_p = m \cdot g - F_A = \rho_B \cdot V \cdot g - \rho_m \cdot V \cdot g = (\rho_B - \rho_m) \cdot V \cdot g, \quad (5)$$

де ρ_B - густина бактерії, кг/м³; ρ_m - густина молока, кг/м³; m – маса бактерії, кг; F_A – сила Архімеда, Н; V – об'єм бактерії, м³.

Якщо в центрифугі, заповненій рідиною, бактерія об'ємом V_B рухається навколо вертикальної осі на відстані r від неї, то при початку руху центрифуги виникають сили інерції в горизонтальному напрямку по осі ОХ:

$$\vec{F}_{in} = -m_B \cdot \vec{a}, \quad (6)$$

де $\vec{a}$ - прискорення неінерціальної системи відліку відносно інерціальних, м/с²; m_B – маса бактерії, кг; F_{in} – сила інерції, Н.

Для обертальних систем це прискорення може бути доцентровим ($a = \omega^2 \cdot r$), а сили інерції, направлені від осі обертання, є відцентровими. У центрифугі, що рухається, відцентрові сили діють як на завислі тверді частинки, так і на частинки рідини, тим самим створюючи умови для сепарації (розділення) частинок за фракціями.

У центрифугі з рідиною, що рухається, відцентрові ефекти спричиняють виникнення в рідині за рівнянням (4) додатковий динамічний тиск:

$$P = \frac{\rho_m \cdot v_m^2}{2},$$

де P - динамічний тиск, Па; ρ_m - густина молока, кг/м³; v_m^2 - швидкість руху молока, м/с.

Оскільки $v = \omega_{PT} \cdot r$, то

$$P = \frac{\rho_m \cdot \omega_{PT}^2 \cdot r^2}{2}. \quad (7)$$

де ω_{PT}^2 - кутова швидкість ротора, рад/с; r – відстань (радіус) від осі обертання до бактерії в центрифугі, м.

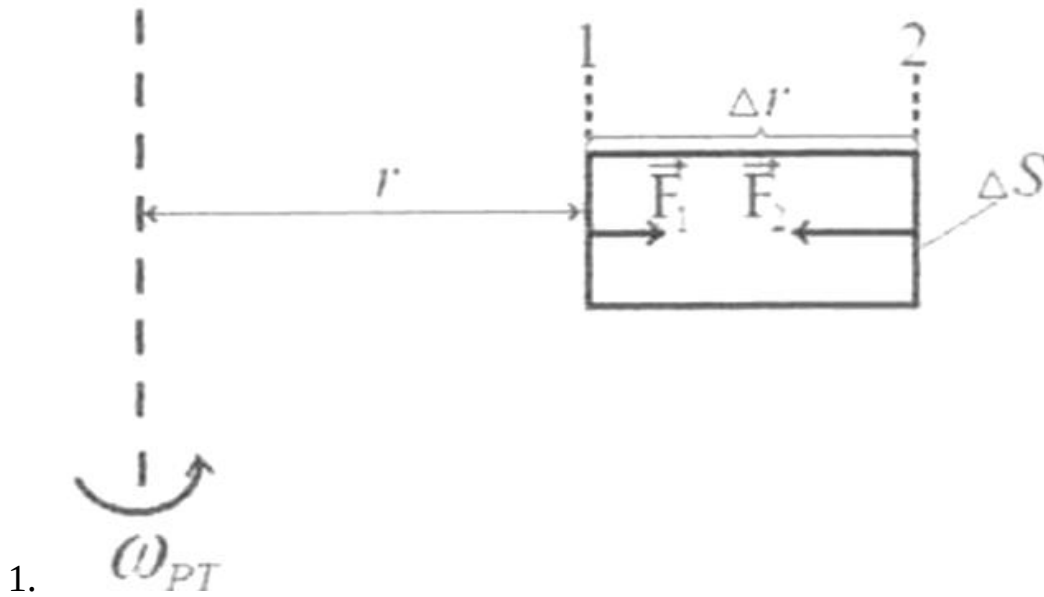


Рис. 2. Обертання бактерії в центрифугі

Розглянемо завислу в рідині бактерії з мікророзмірами. Для спрощення будемо вважати її циліндричної форми з поперечним перерізом ΔS (рис. 2). На грані 1 і 2 бактерії будуть діяти сили, викликані динамічним тиском. Їх рівнодійна буде направлена віссю ОХ та визначатися виразом:

$$F_{PD} = F_2 - F_1 = \left(\frac{\rho_m \cdot \omega_{PT}^2 \cdot (r + \Delta r)^2}{2} - \frac{\rho_m \cdot \omega_{PT}^2 r^2}{2} \right) \cdot \Delta S = \frac{\rho_m \cdot \omega_{PT}^2 \cdot \Delta S}{2} (r^2 + 2 \cdot r \cdot \Delta r + \Delta r^2 - r^2). \quad (8)$$

Якщо $\Delta r \ll r$, то можна знехтувати доданком Δr^2 та отримати:

$$F_{pд1} = \rho_m \cdot \omega_{PT}^2 \cdot r \cdot \Delta r \cdot \Delta S = \rho_m \cdot V \cdot \omega_{PT}^2 \cdot r, \quad (9)$$

тому, що $\Delta r \cdot \Delta S = V$ – об'єм бактерії, м³.

За (6) відцентрова сила інерції, що діє на бактерію дорівнює:

$$F_{in} = \rho_B \cdot V \cdot \omega_{PT}^2 \cdot r. \quad (10)$$

Отже, в рухомій центрифугі рівнодійна сил, що діють на бактерію в горизонтальному напрямку, визначається виразами (9) та (10):

$$F_{p1} = F_{in} - F_{pд1} = (\rho_B - \rho_m) \cdot V \cdot \omega_{PT}^2 \cdot r. \quad (11)$$

Якщо $\rho_B > \rho_m$, то бактерія буде рухатись в молоці від осі обертання, але якщо $\rho_B < \rho_m$, то до осі.

У дійсності, оскільки на бактерію діють дві результуючі сили – одна вздовж осі ОХ – F_{p1} , яку ми розглядали, а інша вздовж осі ОУ – F_p , то бактерія рухатиметься за певною гвинтовою траєкторією, що сходиться або розходиться від осі залежно від співвідношення величин ρ_B і ρ_m .

Однією з основних ознак за якою оцінюють ефективність роботи очищувальної центрифуги є *фактор поділу*. Він показує, в скільки разів значення відцентрового прискорення, що досягається в центрифугі, більше за прискорення вільного падіння, тобто:

$$\Phi_{II} = \frac{F_{p1}}{F_p} \quad (12)$$

де Φ_{II} – фактор поділу, в.о.; F_{p1} – сила, що діє на бактерію в горизонтальному напрямку, Н; F_p – сила, що діє на бактерію вздовж осі ОУ, м.

Із рівнянь (5) та (11) отримаємо:

$$\Phi_{II} = \frac{(\rho_B - \rho_m) \cdot V \cdot \omega_{PT}^2 \cdot r}{(\rho_B - \rho_m) \cdot V \cdot g} = \frac{\omega_{PT}^2 \cdot r}{g}. \quad (13)$$

Для технічних розрахунків замість кутової швидкості ω застосовують частоту обертання ротора n , об/хв. Враховуючи, що $\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot n}{30}$, та зважаючи на те, що $\pi^2 \approx g$ (за числовим значенням), одержуємо досить просту розрахункову залежність для визначення фактора поділу центрифуги, яка має ротор радіусом r :

$$\Phi_{\Pi} = \frac{n^2 \cdot r}{900}. \quad (14)$$

Наприклад, для центрифуги з ротором діаметром 0,1 м та частотою обертання 10000 об/хв, фактор поділу $\Phi_{\Pi} = (10^4)^2 \cdot 0,1/900 = 111111$. Таким чином, дія відцентрових сил більш ніж на чотири порядки є вагомішою, ніж дія сил тяжіння. Це означає, що $v_B \gg v_m$, тобто бактерії практично миттєво досягають прошарку, де ефективно діють УФ промені, а тому розміщення джерела УФВ треба починати одразу з нижнього краю секції опромінення.

Ефективність знезараження бактерій визначається дозою УФВ. Найчутливіша до дії ультрафіолетових променів функція клітини – поділ. Опромінення в дозі 10 Дж/м² викликає зупинку поділу близько 90 % бактеріальних клітин, а щоб викликати загибель 90 % клітин, пригнічення синтезу нуклеїнових кислот і білків, утворення мутацій, необхідно довести дозу опромінення до ≈ 20 Дж/м² або ≈ 20 Вт/с·м². Більш чутливі до впливу ультрафіолетового випромінювання – віруси і бактерії (палички, коки) у вегетативній формі. Менш чутливі – гриби та найпростіші мікроорганізми. Найбільшою стійкістю володіють спори бактерій [24].

Незважаючи на мікророзміри ефективної товщини прошарку (до 100 мкм) для дії УФ променів, що утворюється в результаті відцентрових сил, існує імовірність затінення бактеріями одна одну, чим зменшується летальна дія УФВ. Для компенсації цього фактору, особливо в імпульсному режимі опромінення, необхідно збільшити час дії випромінювання.

Користуючись методикою [9] спочатку визначаємо бактерицидну ефективність УФ-опромінювання мікроорганізмів, що описується експоненціальним рівнянням:

$$J_{\text{БК}} = \left(\frac{N_B}{N_0} \right) \cdot 100 = (1 - \exp(-\sigma_s D_s)) \cdot 100\%, \quad (7)$$

де $J_{\text{БК}}$ - бактерицидна ефективність УФ-опромінювання бактерій, в.о.; N_B – кількість бактерій, що вижила, шт.; N_0 – початкова кількість бактерій, шт.; σ_s - фоточутливість бактерії, м²·с/Вт; D_s – летальна доза для бактерії при УФ-опроміненні, Вт/с·м².

Взявши довідкові значення фото чутливості, визначаємо дозу опромінювання з потрібною бактерицидною ефективністю 99 % чи 99,9 %

$$D_s = -\ln(1 - J_{\text{бк}} \cdot 10^{-2}) / \sigma_s, \text{Вт} / \text{с} \cdot \text{м}^2. \quad (8)$$

До розмірності величини дози опромінювання ($\text{Вт}/\text{с} \cdot \text{м}^2$) входить потужність, площа та тривалість випромінювання. Це означає, що знаючи продуктивність установки, геометричні розміри секції опромінювання і летальну дозу для інактивації бактерій, можна визначити встановлену потужність джерела УФ випромінювання у визначеному діапазоні довжини хвиль (рис. 3).

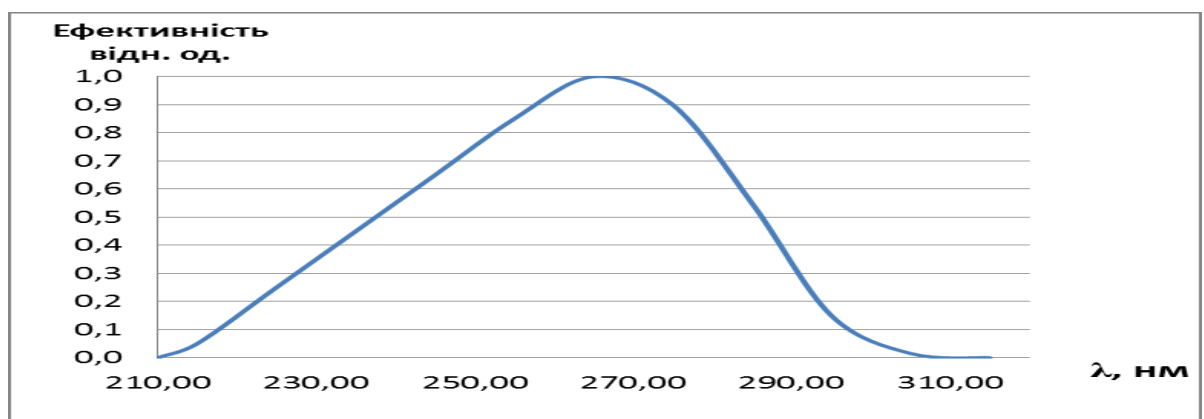


Рис. 3. Крива ефективності бактерицидної дії УФ-опромінювання [9]

Для практичного використання знезаражувача-молокоочисника важливе застосування енергоефективного, екологічно-чистого джерела УФВ. Донедавна це було практично неможливо, але останні досягнення вчених та інженерів японської дослідницької лабораторії Nippon Telegraph and Telephone Corporation під керівництвом доктора Йошитака Таньясу створено діоди на основі нітриду алюмінію, які можуть випромінювати УФ-промені з довжиною хвилі 210 нм [25]. Продукція компанії Prolight Opto Technology Corp. також забезпечує світлодіодне випромінювання в ультрафіолетовому С діапазоні 265-280 нм для знезараження бактерій [26]. Виробники пропонують одиничні світлодіоди з потужністю випромінювання до 20 мВт, світлодіодні збірки до 100 мВт та світлодіодні матриці близько 1 Вт.

Зважаючи на особливості будови секції УФ-опромінювання та відсутності широкої номенклатури промислових світлодіодних матриць, застосовуємо світлодіодні збірки PB2D–4KLA-KC з номінальним струмом живлення 500 мА та потужністю випромінювання 90 мВт [26]. Встановлюємо їх рядковим способом (послідовно один за одним) на нерухомому мідному кожусі установки 10 в якості зовнішньої матриці випромінювання та на мідній циліндричній поверхні 8 як внутрішньої матриці. Вибрана одинична потужність світлодіодної збірки здатна забезпечити щільність випромінювання понад 180 мВт/см^2 , а кількість встановлених збірок залежить від загальної потужності УФВ, що визначається дозою опромінення бактерій та продуктивністю установки.

У схемах підключення світлодіодних матриць визначальними факторами їх надійності виступають два основні фактори – достатня площа радіатора для відводу тепла і стабілізація струмів живлення. Це безпосередньо пов'язано з посиленою деградацією напівпровідникових кристалів при перевищенні їх температур вище максимально допустимої. Необхідна площа радіатора забезпечується мідним кожухом 10 установки та внутрішньою мідною циліндричною трубкою 7, а струм живлення – двома драйверами ДР1, ДР2.

До підвищення температури кристала призводить як недостатня площа радіатора охолодження, так і занадто високий струм, що проходить по них. Робочі величини постійного струму вказуються в параметрах світлодіодів, а для орієнтовного вибору площі радіатора в практиці використовують значення 20-25 см^2 на 1 Вт потужності. При цьому слід враховувати, що така площа необхідна при температурах навколишнього повітря до 35 °С. При більш високих температурах робочу площу радіатора слід збільшити або доповнити активним охолодженням. У нашому варіанті радіатором слугує нерухома мідна кришка камери опромінювання пристрою.

Для уникнення проблеми, коли в разі виходу з ладу одного діода в послідовному ланцюзі перестає випромінювати світло весь ланцюжок, з'єднуємо всі світлодіодні збірки всередині матриці одночасно послідовно і паралельно (рис. 4).

Така особливість значно зменшує можливість виходу з ладу LED-матриці внаслідок перегорання одного елементу.

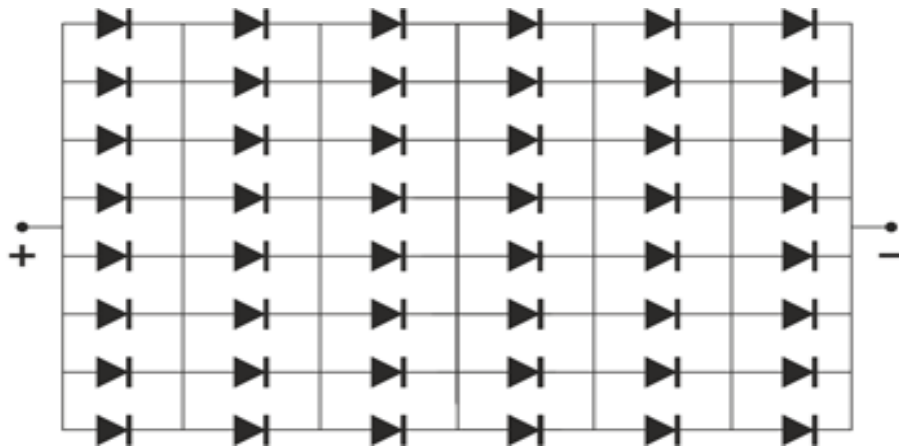


Рис. 4. Схема послідовно-паралельного з'єднання світлодіодних збірок

Для вирішення питань електроживлення та управління обладнанням пропонується використання схеми, що складається з ланки керування електроприводом та ланки керування випромінюванням.

Перша призначена для пуску, повільного розгону барабана разом з камерою опромінювання до максимальних робочих обертів та для зупинки пристрою. До її складу входить: електродвигун *MI*, два вимикачі *SA1 ... SA2* та шнур живлення *XP1*.

Електродвигун дає можливість, після включення пристрою в електричну мережу повільно набирати робочі оберти. Барабан із секцією опромінювання обертається за годинниковою стрілкою, якщо дивитися на них зверху.

Вимикачі клавішного типу мають два робочі положення:

- а) «Увімкнуто» - на клавіші нанесений символ I ;
- б) «Вимкнуто» - на клавіші нанесений символ 0.

Друга ланка призначена для керування УФ-світлодіодними матрицями із зовнішньої та внутрішньої сторони секції УФ-опромінювання для знезаражування бактерій у молоці (рис. 5). До складу ланки входять: секція УФ-опромінювання з матрицями діодів, драйвери для живлення матриць, вимикач.

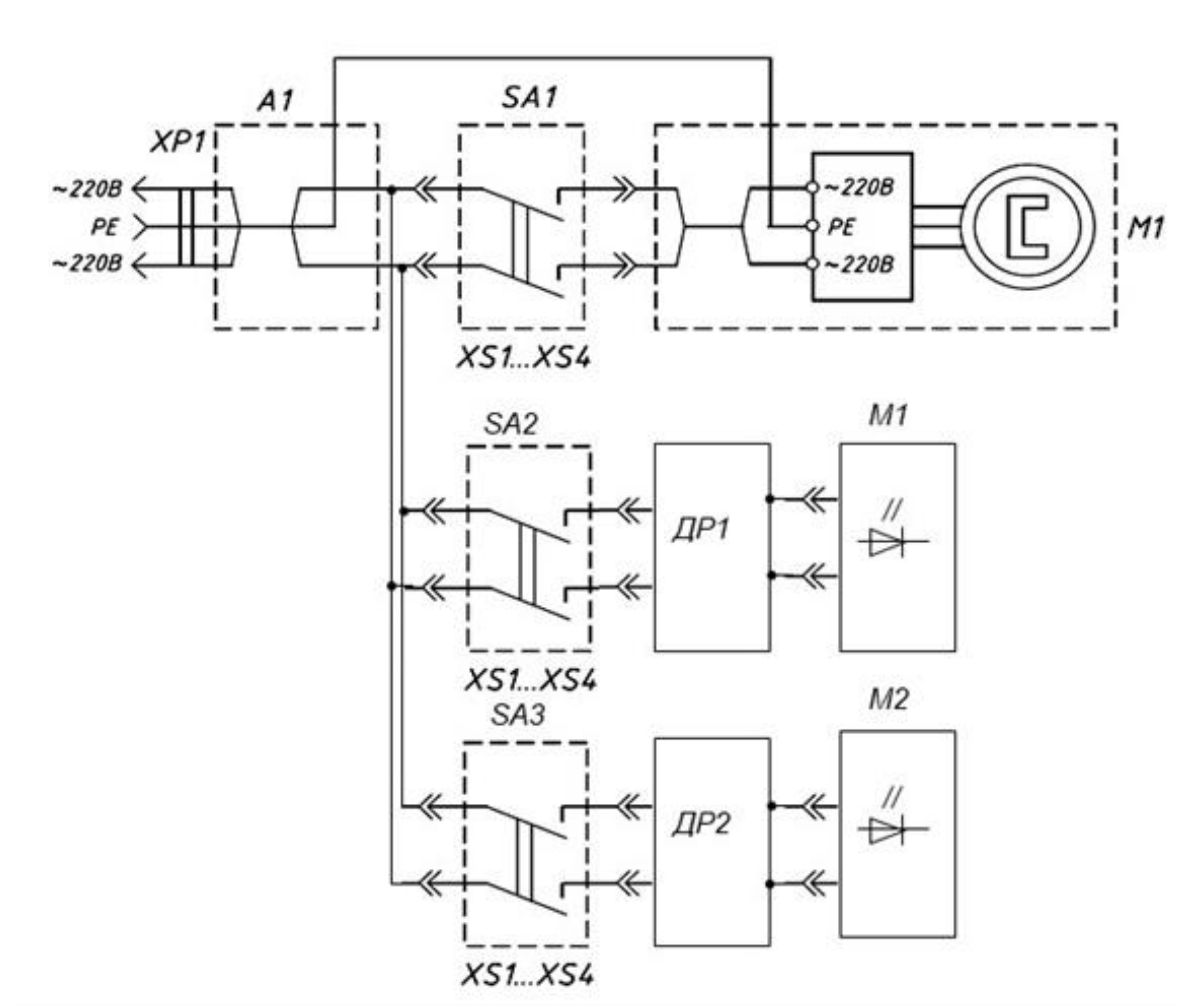


Рис. 5. Електрична схема керування знезаражувачем-молокоочисником:

A1 – шнур живлення; M1 – двигун; ДР1, ДР2 – драйвери; SA1, SA2, SA3 –
вимикачі; XP1 – мережна вилка; XS1 – гніздо на виводі двигуна; XS2, XS3 – гнізда
на виводі драйверів; PE – заземлення

Установка працює так: свіжовидоєне молоко із ємності через центральну молочну трубку 1 дезаражувача-молокоочисника надходить до барабану очисника 2. Після очищення від механічних домішок та слизу через приймальник очищеного молока 3 та канал 4 ротору воно потрапляє до секції двостороннього УФ-опромінення молока з двома коаксіальними кварцовими трубками різного діаметру 5 та 6 де опромінюється УФ світлом зовнішніх 7 та внутрішніх 8 матриць світлодіодів в діапазоні 215-290 нм в тонкому прошарку ($\leq 0,1$ мм), що утворюється в каналі 9 між оптично прозорими трубками під дією відцентрової сили. УФ матриці світлодіодів: зовнішні встановлені по периферії ротора на кожусі 10, а внутрішні –

на мідній трубці 11 концентрично прикріпленій на нерухомій центральній металевій молочній трубці 1. Бактерії, що знаходяться в дисперсному середовищі та мають щільність більшу за щільність продукту, при обертанні ротора під дією відцентрових сил зміщуються від центру до периферії та утворюють тонкий прошарок на внутрішній поверхні зовнішньої кварцової трубки 5. Дрібніші та легші бактерії розміщуються біля зовнішньої поверхні внутрішньої кварцової трубки 6. Ці шари опромінюються УФ світлодіодами з обох сторін. Молоко, примусово рухаючись по зазору між кварцовими трубками, продовжує оброблятися до необхідної дози опромінювання, після чого поступає через вивідний канал 12 до вивідного приймача 13, а далі – до приймально-вивідного пристрою 14 і на охолодження чи подальшу технологічну переробку. Для забезпечення імпульсного режиму опромінювання електрична схема установки комплектується генератором імпульсів. Після обробки молока обладнання промивають та дезінфікують, а потім збирають згідно інструкції.

Висновки і перспективи. Таким чином, розроблена установка виконує дві функції первинної обробки молока – механічне очищення та інактивацію ультрафіолетовим опромінюванням мікрофлори в тонкому прошарку, що покращує показники якості продукту. Крім того, така конструкція забезпечує зменшення коштів на придбання двох технологічних пристроїв – сепаратора для очищення молока та пастеризатора. Крім того, завдяки використанню одного двигуна на всю установку та високоефективного екологічно-чистого світлодіодного УФВ значно зменшуються енерговитрати.

Список використаних джерел

1. Посудін Ю. І. Методи неруйнівної оцінки якості та безпеки сільськогосподарських і харчових продуктів. Київ: Арістей, 2005. 408 с.
2. Лисиченко М. Л., Жила В. І., Пісун В. І. Установки для пастеризації молока. Вісник ХНТУСГ. Технічні науки. Випуск 195 «Проблеми енергозабезпечення на енергозбереження в АПК України». Харків: ХНТУСГ, 2018. С. 97-101.
3. Зозуляк О. В., Зозуляк А. І. Впровадження системи НАССР на підприємствах молочної галузі. Праці ТДАТУ. Мелітополь: ТДАТУ, 2019. № 19. Т. 1. С. 139-147.

4. Гунько І. В., Майборода Ю. В., Зозуляк І. А. Універсальне енергозберігаюче пастеризаційне обладнання для виробництва жирових продуктів. Техніка, енергетика та транспорт АПК. 2018. №3(102). С. 26-33.
5. Перцевий Ф. В., Терешкін О. Г., Гурський П. В. та ін. Промислові технології переробки м'яса, молока та риби. Київ: Інкос, 2014. 340 с.
6. Кочубей-Литвиненко О. В., Ющенко Н. М. Технологія отримання та первинного оброблення молока. Київ : НУХТ, 2013. 211 с.
7. Akshay Kumar Anugu Microbial inactivation and allergen mitigation of food matrix by pulsed ultraviolet light [електронний ресурс]. 2013. Режим доступу: <http://ufdc.ufl.edu/UFE0045406/00001>.
8. Noura Elmnasser [et al.]. Effect of pulsed-light treatment on milk proteins and lipids. J. Agric Food Chem. 2008. Vol. 56 (6). P. 1984–1991.
9. Семенов А. О., Попов С. В., Сахно Т. В., Тарасенко Д. С. Ультрафіолет: сфери використання та джерела випромінювання: монографія. Полтава: ПП «Астрая», 2023. 190 с.
10. Ngadi M., Smith J. P., Cayouette B. Kinetics of ultraviolet light inactivation of Escherichia coli O157:H7 in liquid foods. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2003. Vol. 83(15). P. 1551-1555.
11. Proctor B. E., Goldbith S. A. Electromagnetic radiation fundamentals and their applications in food technology. Adv in Food Research. 1951. Vol. 3. P. 120-196.
12. Wishner L.A. Light-induced oxidations in milk. Journal of Dairy Science. 1964. Vol. 47. P. 216-21.
13. Yousef A. E., Marth E. H. Use of ultraviolet energy to degrade aflatoxin M1 in raw or heated milk with and without added peroxide. Journal of Dairy Science. 1986. Vol. 69. P. 2243–2247.
14. Altic L.C., Rowe M. T., Grant I. R. UV light inactivation of Mycobacterium avium subsp. paratuberculosis in milk as assessed by FASTPlaqueTB phage assay and culture. Applied and Environmental Microbiology. 2007. Vol. 73(11). P. 3728–3733.
15. Krishnamurthy K., Demirci A., Irudayray J. M. Inactivation of Staphylococcus aureus in milk using flow-through pulsed UV-light treatment system. Journal of Food Science. 2007. Vol. 72(7). P. M233–M239.
16. Collins F.M. Relative susceptibility of acid-fast and non-acid-fast bacteria to ultraviolet light. Appl. Microbiol. 1971. Vol. 21. P. 411–413.
17. Guerrero-Beltrán J.A., Barbosa-Cánovas G.V. Review: advantages and limitations on processing foods by UV light Food Sci. Technol. Int. 2004. Vol. 10. P. 137–147.
18. Peccia J., Hernandez M., Occup J. UV-induced inactivation rates for airborne Mycobacterium bovis BCG. Environ. Hyg. 2004. Vol. 1. P. 430–435.
19. Reinemann D. J. [et al.] New methods for UV treatment of milk for improved food safety and product quality. ASABE paper no. 066088. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), St. Joseph, MI. 2006.
20. Kehoe J. J. Tryptophan-mediated denaturation of beta-lactoglobulin A by UV irradiation. J. Agric. Food Chem. 2008. Vol. 56. № 12.

21. Krishnamurthy, K. Decontamination of milk and water by pulsed UV-light and infrared heating [електронний ресурс]. The Pennsylvania State University. 2006. Режим доступу: <https://etda.libraries.psu.edu/paper/7212/2481>.
22. Filipov Zh. Changes in the total protein and protein fractions in cow's milk irradiated with ultraviolet rays. Vet. Med. Nauki. 1976. Vol. 13. № 4.
23. Патент України №145547 МПК А 23С 3/07, А23С 7/04. Знезаражувач-молокоочисник/ заявники та патентотримачі Жила В. І., Лисиченко М. Л., Холін В. В., Шаленко Я. А. № u2020 02644; заявл. 30.04.2020; опубл. 28.12.2020 Бюл. №24.
24. Бойко В. С., Самойчук К. О., Тарасенко В. Г., Загорко Н. Г., Циб В. Г. Процеси і апарати. Гідромеханічні процеси. Мелітополь, 2019. 212 с.
25. Говоров П. П., Король О. В., Романова Т. І. Підвищення енергоефективності знезараження води в системах водопостачання. Вісник НТУ «ХПІ», 2015. 12 (1121). С. 369-373.
26. Сайт компанії Prolight Opto Technology Corp. Режим доступу: <https://svl.ua/ru/content/4-about-us>.

References

1. Posudin, Yu. I. (2005). Metody neruinivnoi otsinky yakosti ta bezpeky silskohospodarskykh i kharchovykh produktiv [Methods of non-destructive assessment of the quality and safety of agricultural and food products]. Kyiv: Aristei, 2005.
2. Lysychenko M. L., Zhyla, V. I., Piskun, V. I. (2018). Ustanovky dlia pasteryzatsii moloka [Installations for pasteurization of milk]. Visnyk KhNTUSH. Tekhnichni nauky. Vypusk 195 «Problemy enerhozabezpechennia na enerhozberezhennia v APK Ukrainy». Kharkiv: KhNTUSH, 97-101.
3. Zozuliak, O. V., Zozuliak, A. I. (2019). Vprovadzhennia systemy NASSR na pidpriemstvakh molochnoi haluzi [Implementation of the HACCP system at dairy enterprises]. Pratsi TDATU. Melitopol: TDATU, 19 (1), 139-147.
4. Hunko, I. V., Maiboroda, Yu. V., Zozuliak, I. A. (2018). Universalne enerhozberihaiuche pasteryzatsiine obladnannia dlia vyrobnytstva zhyrovykh produktiv [Universal energy-saving pasteurization equipment for the production of fat products]. Tekhnika, enerhetyka ta transport APK, №3(102), 26-33.
5. Pertsevyi, F. V., Tereshkin, O. H., Hurskyi, P. V. et al. Promyslovi tekhnolohii pererobky m'iasa, moloka ta ryby [Industrial technologies of meat, milk and fish processing]. Kyiv: Inkos, 340.
6. Kochubei-Lytvynenko, O. V., Yushchenko, N. M. Tekhnolohiia otrymannia ta pervynnoho obrobлення moloka [Technology of obtaining and primary processing of milk]. Kyiv : NUKhT, 211.
7. Akshay Kumar Anugu (2013). Microbial inactivation and allergen mitigation of food matrix by pulsed ultraviolet light. Available at: <http://ufdc.ufl.edu/UFE0045406/00001>.
8. Noura Elmnasser [et al.] (2008). Effect of pulsed-light treatment on milk proteins and lipids. J. Agric Food Chem., 56 (6), 1984–1991.

9. Semenov, A. O., Popov, S. V., Sakhno, T. V., Tarasenko, D. S. (2023). Ultrafiolet: sfery vykorystannia ta dzherela vyprominiuvannia: monohrafiia [Ultraviolet: areas of use and sources of radiation]. Poltava: PP «Astraia», 190.
10. Ngadi, M., Smith, J. P., Cayouette, B. (2003). Kinetics of ultraviolet light inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 in liquid foods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83(15), 1551-1555.
11. Proctor, B. E., Goldbith, S. A. (1951). Electromagnetic radiation fundamentals and their applications in food technology. *Adv in Food Research*, 3, 120-196.
12. Wishner, L. A. (1964). Light-induced oxidations in milk. *Journal of Dairy Science*, 47, 216-21.
13. Yousef, A. E., Marth, E. H. (1986). Use of ultraviolet energy to degrade aflatoxin M1 in raw or heated milk with and without added peroxide. *Journal of Dairy Science*, 69, 2243–2247.
14. Altic, L. C., Rowe, M. T., Grant, I. R. (2007). UV light inactivation of *Mycobacterium avium* subsp. *paratuberculosis* in milk as assessed by FASTPlaqueTB phage assay and culture. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(11), 3728–3733.
15. Krishnamurthy, K., Demirci, A., Irudayray, J. M. (2007). Inactivation of *Staphylococcus aureus* in milk using flow-through pulsed UV-light treatment system. *Journal of Food Science*, 72(7), M233–M239.
16. Collins, F.M. (1971). Relative susceptibility of acid-fast and non-acid-fast bacteria to ultraviolet light. *Appl. Microbiol*, 21, 411–413.
17. Guerrero-Beltrán, J. A., Barbosa-Cánovas, G. V. (2004). Review: advantages and limitations on processing foods by UV light *Food Sci. Technol. Int.*, 10, 137–147.
18. Peccia, J., Hernandez, M., Occup, J. (2004). UV-induced inactivation rates for airborne *Mycobacterium bovis* BCG. *Environ. Hyg.*, 1, 430–435.
19. Reinemann D. J. [et al.] (2006). New methods for UV treatment of milk for improved food safety and product quality. ASABE paper no. 066088. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), St. Joseph, MI.
20. Kehoe, J. J. (2008). Tryptophan-mediated denaturation of beta-lactoglobulin A by UV irradiation. *J. Agric. Food Chem.*, 56, 12.
21. Krishnamurthy, K. (2006). Decontamination of milk and water by pulsed UV-light and infrared heating. The Pennsylvania State University. Available at: <https://etda.libraries.psu.edu/paper/7212/2481>.
22. Filipov, Zh. (1976). Changes in the total protein and protein fractions in cow's milk irradiated with ultraviolet rays. *Vet. Med. Nauki*, 13, 4.
23. Patent Ukrainy №145547 MPK A 23S 3/07, A23S 7/04. Znezarazhuvach-molokoochysnyk [Disinfectant-milk purifier] / applicants and patent holders Zhyla V. I., Lysychenko M. L., Kholin V. V., Shalenko Ya. A. № u2020 02644; zaiavl. 30.04.2020; opubl. 28.12.2020, Biul. №24.
24. Boiko, V. S., Samoichuk, K. O., Tarasenko, V. H., Zahorko, N. H., Tsyb, V. H. (2019). Protsesy i aparaty. Hidromekhanichni protsesy [Processes and devices. Hydromechanical processes]. Melitopol, 212.
25. Hovorov, P. P., Korol, O. V., Romanova, T. I. (2015). Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti znezarazhennia vody v systemakh vodopostachannia [Increasing the

energy efficiency of water disinfection in water supply systems]. Visnyk NTU «KhPI», 12 (1121), 369-373.

26. UProlight Opto Technology Corp. website. Available at: <https://svl.ua/ru/content/4-about-us>.

Development of innovative equipment for milk microflora inactivation

V. Zadorozna, V. Zhyla, M. Lysychenko, N. Kosulina, E. Yakushenko

Abstract. *The article is dedicated to the development of innovative equipment for the inactivation of milk microflora. It provides an analysis of existing methods to suppress the growth and destruction of microorganisms in milk, aiming to enhance product quality indicators. The advantages and disadvantages of current pasteurization equipment are highlighted. An overview of alternative methods for milk inactivation is presented, focusing on the impact of ultraviolet radiation on bacteria and lower organisms. It is concluded that a major advantage of ultraviolet (UV) milk treatment, in addition to its bactericidal effect, is its minimal impact on proteins under efficient operating conditions.*

Considering the limited penetration of UV rays into milk, a device is proposed—a milk disinfection separator that separates microorganisms from the main product by placing them in the form of a thin laminar film accessible for effective irradiation. Special attention is given to justifying the parameters of the UV irradiation section. The methodology for hydraulic calculation of device movement is presented, along with a method for determining the bactericidal effectiveness of UV irradiation on microorganisms and the necessary lethal dose for this purpose.

By specifying the system's productivity, knowing the bactericidal dose required to deactivate bacteria, and considering the irradiation intensity of the UV source, the dimensions of the irradiation section and the required electrical power of the equipment are determined.

The article proposes modern LED arrays with the necessary UV wavelength range, along with diagrams for their connection and equipment control.

Key words: *UV irradiation section, milk inactivation, milk disinfection separator, lethal radiation dose, LEDs*