



УДК 637.133.3

DOI: 10.31388/2220-8674-2019-1-52

УМОВИ ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ОПТИЧНОГО ДІАПАЗОНУ ДЛЯ ОБРОБКИ КАЛАМУТНИХ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ РІДИН

Жила В. І., к. т. н.

<https://orcid.org/0000-0002-5636-794X>*Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка*

Тел.: 099 284 79 11

Анотація – молоко відноситься до рідин з малою оптичною проникністю (до 2 мм), а тому для підвищення ефективності обробки застосовують премішування та примусову турбулізацію. При створенні апаратів заданої продуктивності для обробки каламутних багатокомпонентних рідин енергією електромагнітного випромінювання важливо забезпечити одночасне та рівномірне його проникнення в середовище на контрольовану глибину.

У статті висвітлені умови підвищення ефективності використання енергії електромагнітного випромінювання в технологічних процесах обробки рідин з тонким оптично прозорим шаром за допомогою турбулізації руху. Товщина ламінарного прошарку біля розділюючої стінки з кварцового скла вже при турбулентності $Re=10000$ в.о. не перевищує $3 \cdot 10^{-3}$ мм, що практично не впливає на проникність та зменшення інтенсивності випромінювання з довжиною хвилі більшою 400 нм. Зважаючи на квантову природу поглинання електромагнітної енергії клітинами встановлено, що час перебування елементарного об'єму рідини в області ефективного опромінення складає $\approx 60\%$ від загального терміну опромінювання. Зі збільшенням швидкості потоку, збільшується його турбулентність та ефективність оптичної обробки молока.

Залежно від ефективної довжини хвилі випромінювача, дози та площі опромінення визначається інтенсивність випромінювання і встановлена електрична потужність пристрою. Крім того, проведені теоретичні дослідження дають змогу визначити продуктивність і розміри оптичного модуля, гідравлічні втрати потоку рідини та вибрати молочний насос для даної технології.

Ключові слова: турбулентний режим руху, гідравлічний радіус, ламінарний прошарок, турбулентне ядро, «динамічна швидкість», елементарний об'єм потоку, кільцевий канал.

Постановка проблеми. Конкурентоздатність харчових, у тому числі молочних, продуктів поряд зі смаковими якостями та товарним виглядом залежить від тривалості терміну зберігання. Для виробництва молочних продуктів тривалого зберігання необхідна перш за все високоякісна сировина. Проблема «сирого» молока чи зібраного від сільського населення, як відомо, в першу чергу вирішується зменшенням його мікробіологічної забрудненості

завдяки подальшій технологічній обробці: очищенню від механічних домішок, знищення мікрофлори. На практиці зниження забруднення мікрофлорою досягається декількома способами: фільтрацією чи центрофугуванням, обробкою теплом або холодом, ультрафіолетовим випромінюванням тощо [1].

Як показує аналіз літературних джерел, застосування існуючих технологій знезаражування впливає на погіршення смакових якостей молока, несе значні енерговитрати або вимагає складного дороговартісного обладнання [2-4].

Аналіз останніх досліджень. Традиційні технології передбачають нагрівання продукту до певних температур, витримку для інактивації мікроорганізмів та подальше охолодження при зберіганні. Основні способи традиційної обробки представлені на рис. 1.

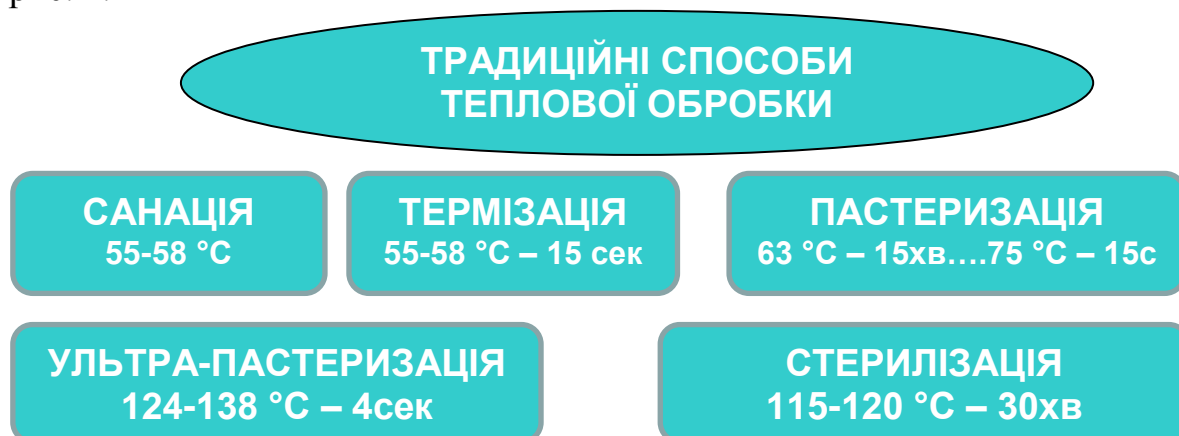


Рис. 1. Традиційні способи знешкодження патогенної мікрофлори та подовження термінів зберігання молока

Загальним недоліком традиційних способів є:

- погіршення смаку та розчеплення цінних речовин при обробці;
- низька енергетична ефективність при інактивації, тобто для знищення відносно малої маси мікроорганізмів доводиться нагрівати до високих температур увесь об'єм продукту впродовж певного часу;
- необхідність стерилізації тари та створення асептичних умов при розливанні і фасуванні;
- охолодження молока для його подальшого транспортування і зберігання;
- втрати продукту при виході на режим та завершенні процесу знезаражування.

Застосування альтернативних способів обробки молока підвищує енергоефективність процесу, зменшує негативний вплив на біологічну цінність продукту, але, переважно, вимагає складного

дороговартісного обладнання чи має обмеження по продуктивності. Основні способи альтернативної обробки представлені на рис. 2 [5].



Рис. 2. Альтернативні способи знешкодження патогенної мікрофлори та подовження термінів зберігання молока

Для підвищення енергоефективності при знезаражуванні молока застосовуються проточні установки, які забезпечують утилізацію тепла, герметизацію потоку від впливу оточуючого середовища та високу динаміку змін температур. При цьому необхідно врахувати особливості руху потоку та обґрунтувати його гідравлічні параметри. Необхідність такого дослідження виникає і при вирішенні задач ефективного опромінення біологічних рідин з малою оптичною проникністю.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Теоретичне обґрунтування параметрів руху молока для забезпечення ефективного використання енергії електромагнітного випромінювання при його обробці.

Основна частина. Відомо, що здатність проникання ультрафіолетових променів з довжиною хвилі 254 нм через шар молока не перевищує 40 мкм, а в діапазоні 165 – 185 нм від 80 до 120 мкм [6]. Тому, для підвищення ефективності обробки застосовують премішування та примусову турбулізацію.

Відомо, що сили в'язкості суттєво впливають на величину і розподіл швидкостей рідини, тобто на самі умови руху. Режим руху при якому рідина рухається шарами з однією швидкістю, тобто не змішується, є ламінарним і навпаки, хаотичний рух, при якому відбувається змішування струменів рідини – турбулентним [7].

Режим руху визначається числом Рейнольдса Re :



$$\text{Re}_d = \frac{V \cdot d}{\nu} , \quad (1)$$

або

$$\text{Re}_R = \frac{V \cdot R}{\nu} ,$$

де Re_d - число Рейнольдса, віднесене до гідравлічного діаметра, в.о.;
 Re_R - число Рейнольдса, віднесене до гідравлічного радіусу, в.о.;
 d – гідравлічний діаметр, в.о.;
 R – гідравлічний радіус, в.о.;
 V - середня швидкість, м/с;
 ν - кінематична в'язкість рідини, м²/с.

Гідравлічний радіус R є відношенням площі живого перерізу потоку до довжини змоченого периметру

$$R = \frac{\omega}{\chi} \quad (2)$$

де ω - площа живого перерізу потоку рідини, м²;
 χ - змочений периметр, або периметр живого перерізу, де рідина дотикається до стінок русла, м.

Існує критичне число Рейнольдса, при якому ламінарний рух рідини переходить до турбулентного з різною ступінню турбулізації, зокрема

$$\text{Re}_{\text{дкк.}} = 2000 \div 2320, \quad \text{чи} \quad \text{Re}_{\text{Ркк.}} = 500 \div 580,$$

тобто, при збільшенні числа Рейнольдса турбулентність збільшується, а при зменшенні потік переходить до ламінарного режиму руху [7]. З наведених залежностей маємо

$$\text{Re}_{\text{дкк.}} / \text{Re}_{\text{Ркк.}} = 4 \quad (3)$$

Зважаючи на обмежену глибину проникнення випромінювання в молоко, для забезпечення рівномірної дози опромінення елементарного об'єму потоку, необхідно розрахувати відповідний режим руху рідини в каналі. При турбулентному режимі руху відбувається активне змішування, що забезпечує попадання всіх складових потоку рідини в область активної дії променів.

Відомо, що в турбулентному потоці утворюються дві відмінні за структурою області. Безпосередньо біля стінки каналу виникає ламінарний прошарок або область в'язкого руху. Інша частина потоку являє собою турбулентне ядро.



Товщина ламінарного прошарку визначається за формулою [7]:

$$\delta_{\text{л.ш.}} = \frac{N \cdot \nu}{u_*}, \quad (4)$$

де N - безрозмірне число, яке за даними Нікурадзе та інших авторів складає $10 \div 11,1$;

ν - кінематична в'язкість рідини, $\text{м}^2/\text{с}$;

u_* - динамічна швидкість або швидкість тертя, $\text{м}/\text{с}$.

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}, \quad (5)$$

де τ_0 - дотичні напруження на стінках русла в межах ламінарного прошарку, $\text{Н}/\text{м}^2$;

ρ - густина рідини, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Дотичні напруження на стінках «правильного русла», тобто такого, що може мати круглий, квадратний, прямокутний, трапецеподібний, параболічний та інші перерізи за умови, що змочена поверхня русла має однакову шорсткість [8], визначається емпіричною залежністю

$$\tau_0 = \frac{\rho \cdot \lambda \cdot V^2}{8}, \quad (6)$$

де λ – гідравлічний коефіцієнт тертя, в.о.

З урахуванням формул (5), (6) та при середньому значенні $N=10,6$ товщина ламінарного прошарку дорівнює

$$\delta_{\text{л.ш.}} = \frac{30d}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} = \frac{120R}{\text{Re} \sqrt{\lambda}}. \quad (7)$$

Для визначення гідравлічного коефіцієнту тертя λ найбільше розповсюдження отримала формула Блаузіса для гідравлічно гладеньких русел (пластикових труб) [8]:

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{\frac{1}{4}}}, \quad (8)$$

де Re – число Рейнольдса, в.о.

Число Рейнольдса для каналу довільного перерізу визначається із співвідношення:

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot V \cdot R}{\nu}. \quad (9)$$

В свою чергу гідравлічний радіус R дорівнює:

- для круглої труби $R = \frac{1}{2} r_T,$ (10)

де r_T – радіус труби, м;



- для кільцевого каналу
$$R = \frac{(r_{\text{вТз}} - r_{\text{зТв}})}{2},$$

де $r_{\text{вТз}}$ - внутрішній радіус зовнішньої труби, м;

$r_{\text{зТв}}$ - зовнішній радіус внутрішньої труби, м.

Від швидкості руху при постійному перерізі потоку залежить його турбулентність, тобто

$$V = \frac{v \cdot \text{Re}}{4R}. \quad (11)$$

Зважаючи на те, що динаміка зменшення товщини ламінарного прошарку уповільнюється при збільшенні турбулентності понад $\text{Re} = 20000$, обчислимо швидкість руху потоку молока при $\text{Re} = 10000, 15000, 20000$. Відповідно

$$v = \frac{\mu}{\rho}, \quad (12)$$

де μ - динамічний коефіцієнт в'язкості, (для молока $\mu_{20^\circ\text{C}} = 1,1 \cdot 10^{-3}$, Н·с/м²);

ρ - густина молока, 1028 кг/м³.

Продуктивність каналу Q залежить від площі живого перерізу потоку та швидкості руху V

$$Q = \omega \cdot V, \quad (13)$$

де Q – продуктивність каналу, м³/с;

ω – площа «живого перерізу», потоку, м².

Підставивши (11) в (13), отримаємо:

$$Q = \frac{\omega \cdot v \cdot \text{Re}}{4R}. \quad (14)$$

Для визначення швидкості поперечного переміщення елементарного об'єму потоку рідини, при його змішуванні в турбулентному ядрі скористаємося залежністю «динамічної швидкості» u_* , [9]

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}, \quad (15)$$

де u_* - «динамічна швидкість», м/с;

τ_0 - динамічні напруження на стінках каналу, Н/м²;

ρ - густина молока, кг/м³.

Підставивши в (15) вираз (6), отримаємо

$$u_* = \sqrt{\frac{\rho \cdot \lambda \cdot V^2}{8\rho}} = \frac{1}{2}V \sqrt{\frac{\lambda}{2}}. \quad (16)$$

З конструктивних міркувань приймаємо відповідні розміри трубок 1, 9 (Рис. 3) та проводимо розрахунок, результати заносимо до табл. 1.

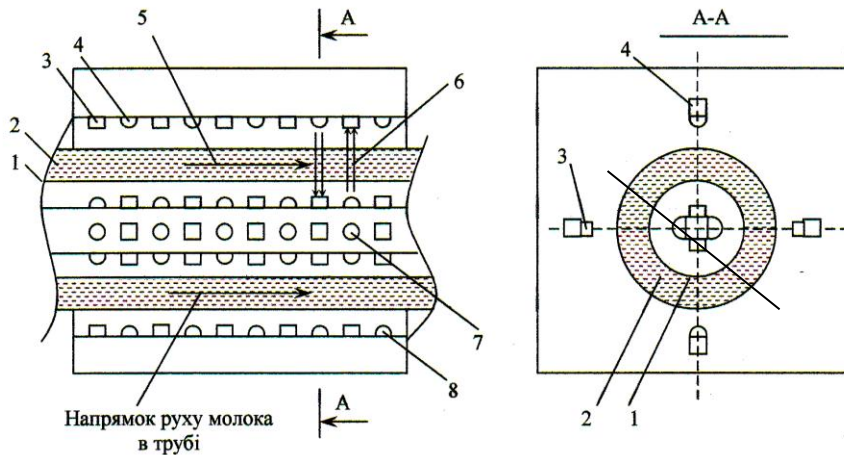


Рис. 3. Пристрій для знезаражування молока: 1 – внутрішня кварцова трубка, 2 – молоко, 3 – фотодатчик, 4, 7, 8 – лазери, 5 – потік молока, 6 – лазерні промені, 9 – зовнішня трубка

Аналізуючи результати розрахунків, наведених у табл. 1, приймаючи глибину ефективного опромінення, наприклад, 1,5 мм та змінюючи швидкість руху потоку молока, маємо:

- зростає турбулентність (змішуваність) рідини від стінок до ядра (від $Re = 10000$ до 20000 в.о.);
- збільшується продуктивність каналу (від $1,68 \text{ м}^3/\text{год}$ до $3,37 \text{ м}^3/\text{год}$);
- зменшується товщина ламінарного пристінного прошарку (від $0,003$ до $0,00126$ мм);
- збільшується «динамічна швидкість» потоку (від $0,075$ до $0,138$ м/с).

Крім того, при середній швидкості руху молока в кільцевому каналі V , та двосторонньому опроміненні, елементарний об'єм потоку мінімум $2 \frac{u_*}{h} = n$ разів проходить через область ефективного опромінення (де h – ширина каналу), тобто :

- при турбулентності $Re = 10000$ - $2 \cdot (0,075/0,005) = 30$ разів;
- при турбулентності $Re = 15000$ - $2 \cdot (0,108/0,005) = 43$ рази;
- при турбулентності $Re = 20000$ - $2 \cdot (0,138/0,005) = 55$ разів.



Таблиця 1

**Параметри руху потоку молока в кільцевому каналі
проточного модуля для опромінювання**

1.	Внутрішня скляна трубка, $\frac{d_z}{d_{вн}}$, мм	20/15			25/20			30/24		
2.	Зовнішня скляна трубка, $\frac{d_z}{d_{вн}}$, мм	35/30			40/35			46/40		
3.	Товщина стінки, мм	2,5			2,5			3,0		
4.	Площа живого перерізу ω , м ²	3,9·10 ⁻⁴			4,71·10 ⁻⁴			5,5·10 ⁻⁴		
5.	Число Рейнольдса Re, в.о.	10 ⁴	1,5·10 ⁴	2,0·10 ⁴	10 ⁴	1,5·10 ⁴	2,0·10 ⁴	10 ⁴	1,5·10 ⁴	2,0·10 ⁴
6.	Швидкість, (11), м/с	1,2	1,8	2,4	1,2	1,8	2,4	1,2	1,8	2,4
7.	Продуктивність(13), л/с	0,468	0,702	0,936	0,565	0,848	1,13	0,66	0,99	1,32
8.	Товщина ламінарного прошарку, $\times 10^{-3}$, мм	3	1,8	1,26	3	1,45	1,26	3	1,8	1,26
9.	Гідравлічний коефіцієнт тертя, λ , в.о.	0,0316	0,0286	0,0266	0,0316	0,0286	0,0266	0,0316	0,0286	0,0266
10.	Динамічна швидкість (15), м/с	0,075	0,108	0,138	0,075	0,108	0,138	0,075	0,108	0,138

Максимальний час одноразового перебування елементарного об'єму потоку в області ефективного опромінення складає:

$$\text{при турбулентності } Re = 10000 - t = \frac{L_{ef.}}{u_*} = 1,5 \cdot 10^{-3} : 0,075 = 0,02 \text{ с,}$$

$$\text{при турбулентності } Re = 15000 - t = \frac{L_{ef.}}{u_*} = 1,5 \cdot 10^{-3} : 0,108 = 0,0139 \text{ с,}$$

$$\text{при турбулентності } Re = 20000 - t = \frac{L_{ef.}}{u_*} = 1,5 \cdot 10^{-3} : 0,138 = 0,011 \text{ с,}$$

де t - час одноразового перебування елементарного об'єму потоку рідини в області ефективного опромінення, с;

$L_{ef.}$ - товщина області ефективного опромінення, м; u_* - «динамічна швидкість» потоку.



За 1 с руху потоку елементарний об'єм перебуватиме в області ефективного опромінення $\approx 0,6$ с при турбулентності $Re = 10000, 15000$ чи 20000 .

Враховуючи, що час поглинання клітиною фотону складає $\approx 10^{-14}$ с, тривалість перебування елементарного об'єму потоку рідини в області ефективного опромінення достатня для забезпечення процесу передачі електромагнітної енергії мікроорганізму.

Знаючи дозу опромінення для активізації чи пригнічення мікрофлори, глибину проникання променів у рідину, неважко визначити розміри каналу, параметри руху потоку, а також загальні дані випромінювальної установки, зокрема: продуктивність, інтенсивність випромінювання, встановлену електричну потужність та габарити. При застосуванні імпульсного лазера необхідно додатково врахувати частоту імпульсів випромінювання.

Для визначення втрат напору h_{ω} молока в трубопроводі при відомих: швидкості руху V , гідравлічному радіусі R , довжині L , гідравлічному коефіцієнті тертя λ , скористаємося першою водопровідною формулою [9]:

$$h_{\omega} = \lambda \frac{LV^2}{d^2 g}, \quad (17)$$

де $d = 4R$ – діаметр молокопроводу, м;
 R – гідравлічний радіус, м;
 g – прискорення земного тяжіння, m^2/s .

Висновки. Проведені теоретичні дослідження визначають параметри руху потоку рідини, геометрію та розміри каналу енергообміну, тривалість перебування елементарного об'єму в області ефективного опромінення, а також загальні характеристики опромінювальної установки, зокрема: інтенсивність випромінювання, встановлену електричну потужність та габарити відповідно дозі опромінення, глибині проникання променів до продукту, що дозволяє забезпечити ефективне використання енергії електромагнітного випромінювання оптичного діапазону при обробці рідин з малою оптичною проникністю.

Список використаних джерел

1. Жила В. І., Лисиченко М. Л. Лазерна установка для подовження терміну зберігання молока. *Актуальні проблеми автоматики та приладобудування*: матеріали II Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Харків, 06-07 грудня 2018 р.). Харків, 2018. С. 70-71.

2. Ковалев Ю. Н. Установки для пастеризации молока. Москва: Россельхозиздат, 1981. 80 с.



3. Крусь Н. А. Технология производства молока и молочных продуктов. Москва: Колос, 2004. 386 с.

4. Бредихин С. А., Космодемьянский Ю. В., Юрин В. Н. Технология и техника переработки молока. Москва: Колос, 2003. 400 с.

5. Лисиченко М. Л., Жила В. І., Піскун В. І. Установки для пастеризації молока. Вісник ХНТУСГ. Сер. Технічні науки. Харків, 2018. Вип. 195: Проблеми енергозабезпечення на енергозбереження в АПК України. С. 97-101.

6. Способ обработки молока ультрафиолетовым излучением: пат. 2263450 Рос. Федерация: МКИ А23С 3/07, А23L 3/18. Заявл. 25.02.2004; Оpubл. 10.11.2005, Бюл. № 31.

7. Справочник по гидравлике / под ред. В. А. Большакова. Киев: Высшая школа, 1984. 343 с.

8. Турбулентность, принципы и применение: пер. с англ./ под ред. У. Фроста, Т. Моулдена. Москва: Мир, 1980. 536 с.

9. Угинчус А. А. Гидравлика и гидравлические машины. Харьков, 1970. 296 с.

УСЛОВИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ ОБРАБОТКИ МУТНЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Жила В. И.

Аннотация - молоко относится к жидкостям с незначительной оптической проницаемостью (до 2 мм), поэтому для повышения эффективности обработки применяют перемешивание и принудительную турбулизацию. При создании аппаратов заданной продуктивности для обработки мутных многокомпонентных жидкостей энергией электромагнитного излучения важно обеспечить одновременное и равномерное его проникновение в среду на контролируемую глубину.

В статье освещены условия повышения эффективности использования энергии электромагнитного излучения в технологических процессах обработки жидкостей с тонким оптически прозрачным слоем с помощью турбулизации движения. Толщина ламинарной прослойки возле разделяющей стенки из кварцевого стекла уже при турбулентности $Re=10000$ о.е. не превышает $3 \cdot 10^{-3}$ мм, что практически не влияет на проницаемость и уменьшение интенсивности излучения с длиной волны более 400 нм. Учитывая квантовую природу поглощения электромагнитной энергии клетками установлено, что время пребывания элементарного объема жидкости в области эффективного облучения составляет $\approx 60\%$ от продолжительности общего облучения. С возрастанием скорости потока, увеличивается его турбулентность и эффективность оптической обработки молока.

В зависимости от эффективной длины волны излучателя, дозы и площади облучения определяется интенсивность излучения и установленная электрическая мощность устройства. Кроме того, проведенные теоретические исследования



дают возможность определить продуктивность и размеры оптического модуля, гидравлические потери потока жидкости и выбрать молочный насос для данной технологии.

Ключевые слова: турбулентный режим движения, гидравлический радиус, ламинарный подслой, турбулентное ядро, динамическая скорость, элементарный объем потока, кольцевой канал.

THE CONDITIONS OF EFFICIENT USE OF ELECTROMAGNETIC RADIATION OF OPTICAL RANGE OF ENERGY FOR THE PROCESSING OF KALAMUTE MULTIPLE COMPONENT LIQUIDS

V. Zhyla

Summary

Milk refers to liquids with low optical permeability (up to 2 mm), and therefore, stirring and forced turbulence are used to improve processing efficiency. When creating the devices of the given productivity for processing muddy multicomponent liquids with the energy of electromagnetic radiation it is important to ensure simultaneous and uniform penetration of the medium into controlled depths.

The article outlines the conditions for increasing the efficiency of the use of electromagnetic radiation energy in the technological processes of processing liquids with a thin, optically transparent layer by means of turbulent motion. Considering the velocity of the liquid flow as a factor of turbulence change (mixing), the necessary parameters were determined to ensure uniform optical processing of milk in the annular channel with bilateral irradiation. In particular, the thickness of the laminar layer near the separating wall of quartz glass is already at turbulence $Re = 10000$ cu does not exceed $3 \cdot 10^{-3}$ mm, which practically does not affect the permeability and decrease the intensity of radiation with a wavelength greater than 400 nm. Given the quantum nature of the absorption of electromagnetic energy by cells, it has been established that the residence time of the elemental volume of liquid in the region of effective irradiation is $\approx 60\%$ of the total radiation time. With increasing flow velocity, it increases its turbulence and efficiency of optical milk processing.

Depending on the effective wavelength of the emitter, the dose and irradiation area determine the intensity of the radiation and establish the electrical power of the device. In addition, the theoretical studies have made it possible to determine the performance and size of the optical module, the hydraulic fluid flow losses, and select a milk pump for this technology.

Key words: turbulent motion, hydraulic radius, laminar layer, turbulent core, "dynamic velocity", elemental flow volume, ring channel.