

Левкін Д.А.

Державний біотехнологічний університет

Жерновникова О.А.

Харківський національний педагогічний університет імені Г.С. Сковороди

Штонда О.Г.

Харківський національний педагогічний університет імені Г.С. Сковороди

УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ В БІОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

У статті досліджені деякі аспекти контролінгу параметрів біотехнологічних систем під дією джерел навантаження. З метою підвищення якості біотехнологічного процесу лазерного поділу ембріона потрібно здійснити попередній аналіз структури мікробіологічного об'єкта та технічних характеристик лазерних випромінювачів. Врахувавши особливості біотехнологічного процесу, здійснюється розрахунок траєкторій лазерного поділу ембріона, інтенсивності лазера, швидкості руху лазерного джерела поверхнею ембріона та інших характеристик модельованої системи. Корекція інтенсивності лазерної дії забезпечена за рахунок реалізації прикладної оптимізаційної математичної моделі мінімізації величини неузгодженості між припустимою температурою в зоні дії лазерного променя на ембріон та її розрахованими значеннями. В існуючих засобах моделювання відсутні операції визначення радіуса джерела лазерного променя, тобто n 'ятна, і розрахунку швидкості руху лазерного джерела поверхнею ембріона. Для отримання інформації про температурний режим лазерної дії застосований тепловізор, що відчутно зменшує точність корекції інтенсивності та інших технічних параметрів лазерних випромінювачів. Це призводить до зменшення точності розрахунку та оптимізації основних параметрів біотехнологічного процесу та, як результат цього, погіршується якість управління та обґрунтованого вибору технічних рішень в біотехнологічних процесах.

Авторами розроблена методика управління якістю технічних рішень для забезпечення функціонування технічних і біотехнологічних систем під дією рухомих джерел сканованого лазерного випромінювання. Визначено, що використання запропонованої методики для досягнення якісних показників біотехнологічного процесу лазерного поділу ембріона, підвищує точність контролінгу потужності та часу термічної дії на 20%.

Ключові слова: біотехнологічний процес, засоби моделювання, управління, технічні рішення, якісні показники.

Постановка проблеми. Для трансплантації ембріонів і збільшення племінних високоцінних корів потрібно використовувати високоякісний матеріал. Тому стає актуальною задача якісного визначення життєздатних ембріонів з метою подальшої трансплантації.

Під час оцінки якості ембріонів виконавцям доводиться працювати з мікроскопічними об'єктами, тобто, візуальний контроль виконується за безпосередньою участю тривалого аналізатора людини. Оператор розміщує об'єкт, що досліджується, під мікроскоп і за морфологічними критеріями визначає клас досліджуваного ембріона. Під час оцінки якості ембріонів виконавцям доводиться працювати з мікроскопічними об'єктами, тобто, візуальний контроль виконується

за безпосередньою участю тривалого аналізатора людини. Основні недоліки використання зорового аналізатора людини – низька надійність, висока трудомісткість, швидка стомлюваність, що є причиною розладу органів зору. Цими та іншими факторами обумовлена низька достовірність результатів оцінки ембріонів оператором – близько 50% досліджуваних ембріонів, здатних до розвитку, оцінюються як непридатні. Тому виникає необхідність створення автоматизованої системи аналізу матеріалу для штучного запліднення з метою підвищення якості оцінки та звільнення людини від одноманітної стомлювальної роботи, або принаймні заміні зорового аналізатора людини.

Побудова автоматизованої системи візуального контролю стала можливою завдяки розвитку сис-

тем технічного зору, що забезпечують сприйняття відеоінформації про навколишнє середовище через автоматичну обробку та аналіз зображень. Одна з основних переваг, яка притаманна системам технічного зору, полягає в реалізації практично 100% контролю. Системи знайшли широке застосування в галузі автоматизованого контролю та управління технологічними процесами, при виготовленні виробів у машинобудуванні, електронній техніці, дефектоскопічному аналізі, для зчитування та обробки символічної інформації, зорового контролю довільних маніпуляторів, що становлять основу робототехнічних комплексів нового покоління, при розв'язанні задач ідентифікації об'єктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В публікаціях [1, 2] розроблений та реалізований алгоритм керування складними системами в якості веб-програми. Врахувавши зони заборони, обмеження на припустимі відстані між об'єктами, авторами публікацій [3–5] розв'язана задача оптимального компонування еліптичних об'єктів в обмеженій області. Побудована та реалізована математична модель задачі компонування об'єктів в контейнері [4, 5]. Наведений математичний опис структури та встановлені особливості формування виробів зі сталі для підвищення якості виготовленої продукції в публікації [6]. В статті [7] здійснене математичне моделювання біотехнологічного процесу електропорації мембрани клітини. Для побудови адекватної математичної моделі електропорації мембрани застосований ймовірносний підхід до утворення електропор. Авторами публікацій [8, 9] отримані умови адекватності математичних моделей для трибосистем та розроблена методика діагностування трибосистем під час їх експлуатації. Автоматизація технологічного процесу в сільському господарстві вимагає запровадження нових пристроїв, що в сучасних умовах функціонування біотехнологічних підприємств є можливим лише за рахунок інвестування коштів з внутрішніх та зовнішніх джерел. Загальну характеристику процесу інвестування в АПК та в суміжні підприємства розглянуто в роботах [10–12].

Постановка завдання. Розробити методику до дотримання якісних показників прийняття технічних рішень при забезпеченні біотехнологічних процесів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Автори розв'язують основну оптимізаційну задачу, яка полягає в пошуку оптимальних параметрів лазерних випромінювачів при дії лазерного променя на ембріон з врахуванням обмежень на результуюче температурне поле, для підвищення якості лазерного поділу мікробіологічного

об'єкта. Це значить, що потрібно відшукати такі параметри вектора z^* лазерної дії, які б забезпечували виконанню екстремуму температурного поля в заданій області матеріала:

$$\underset{\substack{(x,y,z) \in \Omega^* \\ t \in [t_0; t^*] \\ z^* \in Z}}{\text{extr}} T(x, y, z, t, z^*), \quad (1)$$

де $T(x, y, z, t, z^*)$ – температурне поле;
 $(x, y, z) \in \Omega^*$ – область ембріона Ω ;
 t_0 – початковий момент часу t ;
 t^* – кінцевий момент часу t ;
 T_i^* – припустиме значення температурного поля.

Це значить, що потрібно відшукати такі параметри вектора z^* лазерної дії, які б забезпечували виконання екстремуму температурного поля в заданій області матеріала:

$$z_0^* = \arg \underset{\substack{(x,y,z) \in \Omega^* \\ t \in [t_0; t^*] \\ z^* \in Z}}{\text{extr}} T(x, y, z, t, z^*), \quad (2)$$

де z_0^* – вектор параметрів лазера.
 Обмеження на функцію мети (температурне поле):

$$G_i T(x, y, z, t, z^*) \Big|_{\Omega} \leq (\geq) T_i^*, \quad (3)$$

де G_i – довільний оператор.
 Вектор параметрів лазерної дії z^* :

$$z^* = (x, y, z, t, u, E, s(t), v(t), Q(x, y, z, t), S), \quad (4)$$

де u – інтенсивність лазерного джерела;
 E – енергія термічного навантаження;
 $s(t)$ – траєкторія руху лазерного джерела;
 $v(t)$ – швидкість руху лазерного джерела;
 $Q(x, y, z, t)$ – густина термічного навантаження;
 S – розміри лазерного джерела.

Виходячи з технічних характеристик випромінювачів і особливостей ембріона, задані параметри вектора z^* .

Для розрахунку температури лазерної дії потрібно розв'язати крайову задачу системи нелінійних, багатовимірних рівнянь теплопровідності в багаточаровому середовищі:

$$\begin{cases} 5.46 \frac{\partial T_1}{\partial t} = 0.71 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{2}{r_1} \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + 55.02; \\ 5.44 \frac{\partial T_2}{\partial t} = 0.96 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{2}{r_2} \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + 94.1; \\ 5.3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = 0.94 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{2}{r_3} \frac{\partial T_3}{\partial r} \right) + 390.25; \\ 5.1 \frac{\partial T_4}{\partial t} = 0.91 \left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial r^2} + \frac{2}{r_4} \frac{\partial T_4}{\partial r} \right) + 452.4. \end{cases} \quad (5)$$

Врахувавши температуру лазерної дії на зовнішню оболонку ембріона (зону пелюцида) та клітини зародків, запишемо граничні умови:

$$\begin{cases} T(0; 0) = 100 \text{ } ^\circ\text{C}; \\ T(53; 2550) = 37 \text{ } ^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (6)$$

Граничні умови теплового потоку на межі розділу зони пелюцида та живильного середовища, в якому знаходиться ембріон:

$$-0,67 \frac{\partial T_1}{\partial r}(0, t) = 4, 4 . \quad (7)$$

Рівності розділу середовищ:

$$\begin{cases} T_1(20; 400) = T_2(30; 403), -0,71 \frac{\partial T_1}{\partial r} = -0,96 \frac{\partial T_2}{\partial r}, r \in [20; 30]; \\ T_2(30; 403) = T_3(40; 1500), -0,96 \frac{\partial T_2}{\partial r} = -0,94 \frac{\partial T_3}{\partial r}, r \in [30; 40]; \\ T_3(40; 1500) = T_4(50; 2250), -0,94 \frac{\partial T_3}{\partial r} = -0,91 \frac{\partial T_4}{\partial r}, r \in [40; 50]; \\ T_4(50; 2250) = T_5(60; 2500), -0,91 \frac{\partial T_4}{\partial r} = -0,9 \frac{\partial T_5}{\partial r}, r \in [50; 60]. \end{cases} \quad (8)$$

Рівності неперервності температурних полів в ембріоні:

$$\begin{cases} T(20; 400 - 0) = T(20; 400 + 0); \\ T(30; 403 - 0) = T(30; 403 + 0); \\ T(40; 1500 - 0) = T(40; 1500 + 0); \\ T(50; 2250 - 0) = T(50; 2250 + 0); \\ T(60; 2550 - 0) = T(60; 2550 + 0). \end{cases} \quad (9)$$

Обґрунтуємо коректність однорідної крайової задачі:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \left(\frac{\lambda_1}{\rho_1 c_1} \right) \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} \quad \text{при } r \in [0; r_1], t \in [0; t_1]; \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = \left(\frac{\lambda_2}{\rho_2 c_2} \right) \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} \quad \text{при } r \in [r_1; r_2], t \in [t_1; t_2]; \\ \frac{\partial T_3}{\partial t} = \left(\frac{\lambda_3}{\rho_3 c_3} \right) \frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} \quad \text{при } r \in [r_2; r_3], t \in [t_2; t_3]; \\ \frac{\partial T_4}{\partial t} = \left(\frac{\lambda_4}{\rho_4 c_4} \right) \frac{\partial^2 T_4}{\partial r^2} \quad \text{при } r \in [r_3; r_4], t \in [t_3; t_4]. \end{cases} \quad (10)$$

В загальному виді крайові умови (6), (7):

$$B_0 \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) T(r, 0) + B_1 \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) T(r, t_1) + B_2 \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) T(r, t_2) + B_3 \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) T(r, t_3) + B_4 \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) T(r, t_4) = \varphi(r). \quad (11)$$

Для крайової задачі (10), (11) виконані умови параболічності, отже, розрахункова математична модель процесу лазерної дії на ембріон буде коректною в просторі узагальнених функцій степеневого зростання [13–15]. В залежності від специфічних особливостей модельованих систем обрані методи доцільно застосувати для управління якістю техніко-технологічних рішень [16].

На рисунку запропоновано алгоритм для управління якістю техніко-технологічних рішень в умовах невизначеності.

Підготовка пристрою (рис. 1) до роботи розпочинається з введення вихідної інформації. З блоку 9 на вхід блоку 3 надходить припустиме значення контрольованого фізичного параметра, наприклад, припустиме значення температурного поля в найближчих точках лазерного джерела дії. У блок 7 завдання параметрів сіткової моделі надходять вихідні значення відповідних параметрів для встановлення на сітковій моделі 6. З блоку 9 на вхід блоку 4 розрахунку параметрів лазера надходить інформація про вихідні значення параметрів дії лазера на ембріон, а саме: інтенсивність джерела лазерного променя, енергію та час термічної дії, траєкторію та швидкість руху лазерного джерела, густину термічної дії, геометричні розміри лазерного джерела. На цьому підготовку пристрою до роботи закінчено.

Вихідні параметри лазера з блоку 4 надходять на вхід блоку 5, що дає можливість забезпечити моделювання в блоці 6 процесу дії лазера на ембріон. Значення температурного поля з контрольованих точок сіткової моделі блоку 6 надходять на вхід блоку виділення максимуму 1 температурного поля, а потім на вхід блоку порівняння 2. У цьому блоці здійснюється порівняння максимального значення температурного поля з заданим припустимим значенням. Якщо температурне поле сіткової

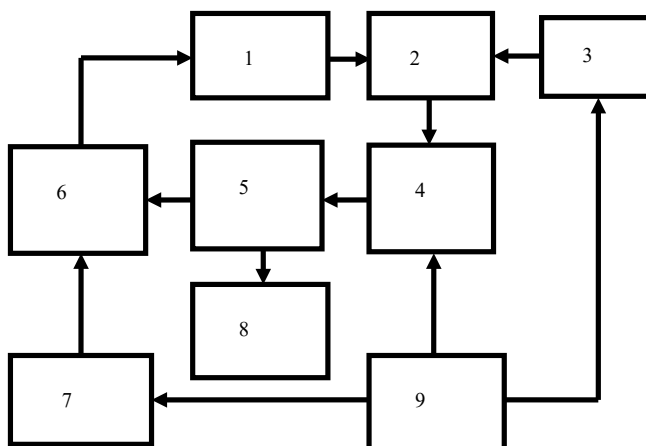


Рис. 1. Алгоритм для управління якістю техніко-технологічних рішень в умовах невизначеності:

- 1 – блок виділення максимуму;
- 2 – блок порівняння;
- 3 – блок припустимого значення;
- 4 – блок розрахунку параметрів лазера;
- 5 – блок виконавчих механізмів;
- 6 – блок сіткової моделі;
- 7 – блок завдання параметрів;
- 8 – блок ресстрації;
- 9 – блок вводу вихідної інформації

моделі вище наперед заданого, то з блоку 2 в блок розрахунку параметрів лазера 4 надходить сигнал, за яким здійснюється корекція параметрів лазера, а саме: інтенсивності джерела лазерного променя, енергії та тривалості термічної дії, траєкторії та швидкості руху лазерного джерела, густини термічної дії, геометричних розмірів лазерного джерела. Блок реєстрації 8 фіксує відповідні параметри лазера. Таким чином, за кілька ітерацій визначають оптимальні параметри лазерного променя.

Висновки. У статті закладено основи для розробки моделюючих пристроїв з метою дотримання якісних показників прийняття технічних рішень при математичному моделюванні стану біотехнологічної системи, яка містить зосереджені, дискретні джерела термічного навантаження. Авто-

рами розроблена методика для підвищення якості біотехнологічного процесу лазерного поділу ембріона, яку можна застосовувати для дотримання якісних показників довільних технологічних і біотехнологічних систем під дією зосереджених, дискретних джерел навантаження. Це означає, що змінюючи методи реалізації крайових задач і методи здійснення оптимізації управляючих параметрів систем, цей підхід можна застосовувати для підвищення якості довільних технологічних і біотехнологічних процесів. Як показано в цій статті, застосування результатів наведених авторами досліджень, дало змогу підвищити точність контролінгу потужності та часу термічної дії при забезпеченні біотехнологічного процесу лазерного поділу ембріона на 20%.

Список літератури:

1. Sklyar G., Barkhayev P., Ignatovich S., Rusakov V. Implementation of the algorithm for constructing homogeneous approximations of nonlinear control systems. *Mathematics of Control, Signals, and Systems*. 2022. Pp. 1–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00498-022-00330-5>
2. Макаров А.А., Николенко И.Г. Частичная параболичность краевой задачи для псевдодифференциальных уравнений в слое. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія: «Математика, прикладна математика і механіка»*. Харків, 2019. Т. 89. С. 21–32. DOI: 10.26565/2221-5646-2019-89-03
3. Стоян Ю.Г., Гиль Н.И. Методы и алгоритмы размещения плоских геометрических объектов. К.: Наук. думка, 1976. С. 32–62.
4. Stoyan Y.G., Romanova T.E., Pankratov O.V., Stetsyuk P.I., Maximov S.V. Sparse Balanced Layout of Ellipsoids. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2021. Vol. 57. Issue. 6. Pp. 864–873. <https://doi.org/10.1007/s10559-021-00412-3>
5. Grebennik I.V., Kovalenko A.A., Romanova T.E., Urniaieva I.A., Shekhovtsov S.B. Combinatorial Configurations in Balance Layout Optimization Problems. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2018. Vol. 54. Issue. 2. Pp. 221–231. <https://doi.org/10.1007/s10559-018-0023-2>
6. Скобло Т.С., Белкин Е.Л., Романюк С.П. Методика математической оценки фазового состава стали. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2014. Вип. 146. С. 8–24.
7. Shigimaga V.A., Kosulina N.G., Chorna M.A., Kosulin S.V. Cell Conductivity in Pulsed Electric Field as a Probabilistic Process of Membrane Electroporation. *New Frontiers in Physical Science Research*. Vol. 1. Pp. 72–91. DOI: 10.9734/bpri/nfpr/v1/3616A
8. Войтов В.А., Фененко К.А., Кравцов А.Г. Експериментальні дослідження інформативних амплітуд акустичної емісії трибосистем при зміні конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів. *Проблеми тертя та зношування*. 2021. № 4(93). С. 4–15. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(93\).16248](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(93).16248)
9. Войтов В.А., Войтов А.В. Методичний підхід до визначення реологічних властивостей структури сполучених матеріалів у трибосистемі. *Проблеми тертя та зношування*. 2020. № 2 (87). С. 4–10. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.24\(87\).14719](https://doi.org/10.18372/0370-2197.24(87).14719)
10. Yarmoliuk A.V., Reznik N.P. Use of investment strategies of risk management of agricultural products on the stock exchange market. *International Journal of Innovative Technologies in Economy*. 2021. No. 1(33). Pp. 1–4. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ijite/30032021/7392
11. Негода Ю.В. Оцінка та підвищення інвестиційної привабливості аграрного сектору економіки країни. *Агросвіт*. 2019. № 15. 2019. С. 14–19. DOI: 10.32702/2306-6792.2019.15.14
12. Levkin A., Levkina R., Petrenko A., Kolomiets N. Biotechnological Processes Digitalization in Animal Husbandry. *International scientific and practical conference «Digitalization of Agrarian management» ISPCDAM-2019*. Kiev: NULES of Ukraine, 2019. Pp. 52–54.
13. Левкін Д.А. Методологія дослідження технологічних процесів. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського. Серія: «Технічні науки»*. Київ, 2020. Т. 31(70), № 4. С. 93–97. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/13>

14. Левкин Д.А. Адекватность расчетной математической модели процесса лазерного воздействия на эмбрион. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського. Серія: «Технічні науки»*. Київ, 2018. Т. 29 (68), № 3, Ч. 1. С. 166–169.

15. Левкін Д.А., Жерновникова О.А. Розробка математичних моделей прикладних задач геометричного проектування технічних систем. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: «Технічні науки»*. Хмельницький, 2022. № 4 (311). С. 133–136.

16. Kravtsov A., Suska A., Biekurov A., Levkin D. Development of a rheological model of stress relaxation in the structure of an oil film on the friction surface with fullerene additives. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3. No. 7 (111): Applied mechanics. Pp. 93–99. DOI: 10.31891/2307-5732-2022-311-4-133-136

Levkin D.A., Zhernovnykova O.A., Shtonda O.H. QUALITY MANAGEMENT OF TECHNICAL SOLUTIONS IN BIOTECHNOLOGICAL PROCESSES

This article investigates some aspects of the biotechnological system parameters control under the influence of load sources. To improve the quality of the biotechnological process of laser embryo separation, a preliminary analysis of the structure of the microbiological object and the technical characteristics of laser emitters should be carried out. Considering the biotechnological process peculiarities, the trajectories of the laser division of the embryo, the laser intensity, the speed of movement of the laser source over the surface of the embryo, and other characteristics of the modeled system were calculated. The correction of the intensity of the laser action is ensured by the implementation of an applied optimization mathematical model to minimize the amount of inconsistency between the permissible temperature in the zone of action of the laser beam on the embryo and its calculated values. The existing modeling tools exclude operations for determining the radius of the laser beam source, i.e., the spot, and calculating the speed of movement of the laser source across the surface of the embryo. To obtain information about the temperature regime of the laser action, a thermal imager is used, which significantly reduces the accuracy of intensity correction and other technical parameters of laser emitters. This decreases the accuracy of the calculation and optimization of the main parameters of the biotechnological process and, decreases the quality of management and the justified choice of technical solutions in biotechnological processes.

The authors have developed a technique for managing the quality of technical solutions to ensure the functioning of technical and biotechnological systems under the influence of moving sources of scanned laser radiation. It was determined that the use of the proposed technique to achieve quality indicators of the biotechnological process of laser embryo separation increases the accuracy of controlling the power and time of thermal action by 20%.

Key words: *biotechnological process, modeling tools, management, technical solutions, quality indicators.*