

УДК 519.6:001.5

Ю. Е. МЕГЕЛЬ, В. П. ПУТЯТИН, Д. А. ЛЕВКИН, А. В. ЛЕВКИН

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА НА МНОГОСЛОЙНЫЕ БИОМАТЕРИАЛЫ

В статье приведена содержательная постановка основной оптимизационной задачи поиска рациональных значений основных параметров действия лазерного луча на многослойный биоматериал, с учетом ограничений на результирующее температурное поле биоматериала для осуществления его деления и обеспечения жизнеспособности. Осуществлена формализация и систематизация прикладных задач оптимизации, являющихся частными случаями основной оптимизационной задачи, рассмотрены соответствующие им математические модели. Это позволило обосновать выбор методов их численной реализации.

Ключевые слова: основная оптимизационная задача, деление, формализация, систематизация, прикладные задачи, математические модели.

В статті наведена змістовна постановка основної оптимізаційної задачі пошуку раціональних значень основних параметрів дії лазерного променя на багатослойний біоматеріал з урахуванням обмежень на результирує температурне поле біоматеріала задля здійснення його ділення. Здійснена формалізація і систематизація прикладних задач оптимізації, які є частковими випадками основної оптимізаційної задачі, розглянуті відповідні їм математичні моделі. Це дозволило обґрунтовано здійснити вибір методів їх чисельної реалізації.

Ключові слова: основна оптимізаційна задача, ділення, формалізація, систематизація, прикладні задачі, математичні моделі.

Optimization problem of laser beam effect on multilayered biomaterial with complex spatial for has been observed in this article in order to ensure its division according to limitations on the resulting thermal field and viability of the biomaterial. To do so the authors have formulated the main conceptual optimization problem statement for searching the reasonable values of basic laser parameters effected on the biomaterial. Formalization and systematization of the applied optimization problems have been performed, which are the particular cases of the main optimization problem. The article depicts four mathematical model samples of applied optimization.

It should be noted that the state of the object under research (multilayered biomaterial effected by a laser beam) is described via boundary-value problem in a general form. The boundary-value problem is stated for the system of non-stationary heterogeneous multidimensional differential equations of thermal conductivity in partial derivatives. To obtain the objective function (thermal field) included in the problem statement of applied mathematical optimization models, solution of a series of boundary-value problems is needed to be performed multiple times during the modeling process. This specificity significantly complicates the process of corresponding mathematical model formulation for laser beam parameters effected multilayered biomaterials as well as its application aiming at increasing the quality of biotechnological process of the biomaterial division.

The novelty of the aforementioned applied mathematical optimization models consists in the fact that thermal fields of the biological objects are represented in accordance with the characteristics of a discrete moving laser beam. With this, along with the standalone importance of the applied problems, they are also used for the solution of the main optimization problem. The analysis of the proposed mathematical models provides information needed for reasonable selection of methods for numerical model implementation.

The results obtained in this article enable modeling process automation to effect laser beam on multilayered biological material in order to increase quality of biotechnological process of the biomaterial division.

Keywords: main optimization problem, division, formalization, systematization, applied problems, mathematical models.

Введение. Основной трудностью при параметризации температурных полей многослойного биоматериала является получение аналитического (приближенно-аналитического) или алгоритмического (численного) представления решения краевой задачи в зависимости от изменяемых (в процессе синтеза системы) параметров, входящих в постановку исходных краевых задач.

В том случае, когда имеется аналитическое решение краевой задачи, куда органически входят искомые параметры, можно исключить затратный по времени процесс решения серии однотипных краевых задач. Такие аналитические решения, к сожалению, имеются только для классических областей (отрезок, окружность, круг, шар, сфера и др.).

Отметим, что рассмотрение всякой новой краевой задачи, описывающей температурное поле в рассматриваемой системе, требует преодоления сложностей, связанных с этапом параметризации поля. Существующие немногочисленные математические модели задач расчёта и оптимизации параметров действия лазерного излучения на многослойные биологические материалы рассматривались ранее по принципу: математическая модель под частную задачу. При этом математическим моделям оптимизации параметров действия лазерного излучения посвящено относительно мало работ и связано это, прежде всего,

с необходимостью решения специфических, многомерных, многоэкстремальных задач.

В связи с этим, актуальной научной задачей является усовершенствовать математическую модель основной оптимизационной задачи с учетом ограничений на результирующее температурное поле биоматериала для обеспечения жизнеспособности сегментируемых частей. С этой целью рассмотрена содержательная постановка основной оптимизационной задачи, осуществлена формализация и систематизация прикладных задач оптимизации, которые являются частными случаями основной оптимизационной задачи. Полученные в статье основные результаты являются дальнейшим развитием методов математического моделирования задач оптимизации параметров действия лазерного луча на многослойные биоматериалы, рассмотренных в работе [1].

Анализ литературных данных. Ряд аспектов отмеченной задачи исследовались в работах [2–10].

В монографиях [3, 4] проведён обширный анализ научных исследований, касающихся вопросов оптимизации теплофизических, механических, экологических, гидродинамических, электротехнических и других систем, содержащих подвижные локальные источники соответствующих физических полей. Однако, в работах [3, 4] вопросы оптимизации теплофизических процессов в многослойных микробиологиче-

ских системах, с учётом локального лазерного воздействия, не рассматривались.

В фундаментальной работе [6] дан обзор большого числа научных публикаций, касающихся решения задач расчёта и оптимизации многослойных механических конструкций (пластин и оболочек), подвергаемых импульсным, ударным и нестационарным температурным нагрузениям. Однако, специфика рассматриваемых в данной работе задач такова, что воспользоваться результатами работы [6] невозможно из-за особенностей параметров рассматриваемого источника воздействия (лазерного луча) на многослойную микробиологическую систему.

В работах [8, 9] авторами приведен обзор существующих методик технологии рассечения зоны пеллюцида эмбриона (хетчинг), применяемой для обеспечения процесса отделения зародышей. Однако, для уменьшения травмируемости зоны пеллюцида и зародышей, необходима постановка и решение задачи оптимизации действия лазерного луча на эмбрион.

Постановка основной оптимизационной задачи. Суть содержательной постановки основной оптимизационной задачи состоит в следующем.

Предложить принципы построения расчётных и оптимизационных математических моделей, а так же численных методов и специализированных вычислительных средств, позволяющих осуществить:

– оптимизацию параметров действия лазерного луча на многослойный микробиологический материал с учётом ограничений на результирующее температурное поле материала и обеспечением жизнеспособности сегментов микробиологического материала;

– автоматизацию процесса моделирования действия лазерного луча на многослойный микробиологический материал с целью повышения качества технологического процесса деления микробиоматериала.

В наиболее общем случае рассматриваемая нами система «микробиоматериал-лазер» представляет собой ограниченную многослойную область $\Omega \in R^3$, на которую действует лазерное излучение F с областью носителя L в виде пятна заданного радиуса.

Температурное поле в N -слойной области Ω , порождаемое источником излучения F и окружающей средой, в общем случае описывается краевой задачей:

$$AT = F \quad (1)$$

$$B_j T = b_j, \quad (2)$$

где A – заданный дифференциальный оператор в частных производных; $T = T(x, y, z, t)$ – температурное поле; (x, y, z) – пространственные переменные; t – время действия лазерного луча на многослойный (N -слойный) микробиологический материал; F – функция, характеризующая пространственно-временное распределение теплового воздействия и имеющая вид

$$F = \begin{cases} F(x, y, z, t, u, E, s(t), v(t), Q(x, y, z, t), S), & (x, y, z) \in L; \\ 0, & (x, y, z) \notin L, \end{cases} \quad (3)$$

где u – интенсивность источника лазерного луча, т.е. пятна; E – энергия теплового воздействия; $s(t)$ – траектория движения лазерного источника; $v(t)$ – скорость движения лазерного источника; $Q(x, y, z, t)$ – плотность теплового воздействия; S – диаметр лазерного источника, т.е. пятна; L – носитель теплового воздействия; B_j – заданные операторы, характеризующие граничные условия, начальные условия и условия сопряжения на границах области Ω , $j = 1, \dots, N$ – слоев; b_j – заданные функции.

В общем случае температурное поле $T(x, y, z, t)$ микробиоматериала Ω , при действии на него лазерного луча F , зависит от искомым параметров лазера и представляется в виде следующей зависимости:

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

Вектор параметров лазерного воздействия z^*

$$z^* = (x, y, z, t, u, E, s(t), v(t), Q(x, y, z, t), S). \quad (5)$$

Ограничения на характер распределения температурного поля в области Ω^* многослойного (N -слойного) микробиологического материала Ω , в общем случае будут иметь следующий вид:

$$G_i T(x, y, z, t, z^*) \Big|_{\Omega^*} \leq (\geq) T_i^*, \quad i = 1, \dots, N, \quad (6)$$

где G_i – некоторый заданный оператор; $T(x, y, z, t, z^*)$ – температурное поле; $(x, y, z) \in \Omega^*$ – область многослойного (N -слойного) микробиоматериала Ω ; t_0 – начальный момент времени t ; t^* – конечный момент времени t ; T_i^* – допустимые значение температурного поля.

В свою очередь, на пределы изменения параметров теплового воздействия на многослойный микробиологический материал накладываются следующие ограничения.

Ограничение на размер области многослойного микробиологического материала Ω :

$$\begin{cases} x_{\min} \leq x \leq x_{\max}; \\ y_{\min} \leq y \leq y_{\max}; \\ z_{\min} \leq z \leq z_{\max}. \end{cases} \quad (7)$$

Ограничение на длительность действия лазерного луча t :

$$t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (8)$$

где t_{\min} – минимальная длительность действия лазерного луча на многослойный (N -слойный) микробиологический материал; t_{\max} – максимальная

длительность действия лазерного луча на многослойный (N -слойный) микробиологический материал.

Ограничение на интенсивность источника $t \in [1; 3]$:

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max}, \quad (9)$$

где u_{\min} – минимальное значение интенсивности; u_{\max} – максимальное значение интенсивности.

Ограничение на энергию E теплового воздействия:

$$E_{\min} \leq E \leq E_{\max}, \quad (10)$$

где E_{\min} – минимальное значение энергии теплового воздействия; E_{\max} – максимальное значение энергии теплового воздействия.

При этом, для расчета энергии действия лазерного луча на многослойный (N -слойный) микробиологический материал воспользуемся следующей формулой:

$$E = Wt. \quad (11)$$

В формуле (11) W – это мощность действия лазерного луча на многослойный (N -слойный) микробиологический материал, а t – длительность действия лазерного луча.

Ограничение на траекторию $s(t)$:

$$s(t) \in M^*, \quad (12)$$

где M^* – множество всех возможных траекторий движения лазерного источника, т. е. пятна по поверхности многослойного (N -слойного) микробиологического материала.

Ограничение на скорость $v(t)$ движения источника:

$$v_{\min} \leq |\dot{s}(t)| \leq v_{\max}, \quad (13)$$

где v_{\min} – минимальное значение скорости движения источника лазерного луча, т. е. пятна, по поверхности многослойного (N -слойного) микробиологического материала; v_{\max} – максимальное значение скорости движения пятна.

Частным случаем ограничения на скорость является ограничение:

$$v_{\min} \leq v \leq v_{\max}. \quad (14)$$

Для источников с произвольной формой накладываем ограничение на плотность теплового воздействия:

$$Q_{\min} \leq Q(x, y, z, t) \leq Q_{\max}, \quad (15)$$

где Q_{\min} – минимальная плотность теплового воздействия; Q_{\max} – максимальная плотность.

Ограничение на диаметр лазерного источника в виде пятна S :

$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max}, \quad (16)$$

где S_{\min} – минимальный диаметр лазерного источника, т. е. пятна; S_{\max} – максимальный диаметр лазерного источника.

Ограничение на результирующее температурное поле:

$$T(x, y, z, t, z^*) \leq T^*, \quad (17)$$

где T^* – допустимые значения температурного поля.

Рассмотрим постановку прикладных оптимизационных задач и формализацию их математических моделей при контроле температурного поля многослойного микробиологического материала.

Математические модели прикладных задач оптимизации.

Математическая модель 1.

Необходимо минимизировать разность между значениями температурного поля T_i в заданных точках

$$(x_i, y_i, z_i) \in \Omega_i \in \Omega^*, i = 1, \dots, N$$

многослойного микробиологического материала Ω и наперед заданными допустимыми значениями температурного поля T^* , т. е. найти

$$\min_{z^* \in Z} \max_{\substack{(x_i, y_i, z_i) \in \Omega_i \\ i=1, N \\ t \in [t_0; t^*]}} |T_i(x_i, y_i, z_i, t, z^*) - T^*|, \quad (18)$$

где $T_i(x_i, y_i, z_i, t, z^*)$ – температурное поле;

$(x_i, y_i, z_i) \in \Omega_i \in \Omega^*, i = 1, \dots, N$ – область многослойного (N -слойного) микробиоматериала Ω .

Математическая модель 2.

Необходимо минимизировать максимальное значение, среди точек контроля, температурного поля, т. е. найти

$$\min_{z^* \in Z} \max_{\substack{(x_i, y_i, z_i) \in \Omega_i \\ i=1, N \\ t \in [t_0; t^*]}} T_i(x_i, y_i, z_i, t, z^*). \quad (19)$$

Обозначения как математической модели 1.

Математическая модель 3

Необходимо минимизировать, по параметрам теплового воздействия, максимальное значение модуля градиента температурного поля в области точек Ω^* многослойного микробиологического материала Ω , т. е. найти

$$\min_{z^* \in Z} \left[\max_{\substack{(x,y,z) \in \Omega^* \\ t \in [t_0, t^*]}} \left| \text{grad } T(x, y, z, t, z^*) \right| \right]. \quad (20)$$

При этом, $T(x, y, z, t, z^*)$ является температурным полем области точек $(x, y, z) \in \Omega^*$ многослойного (N -слойного) микробиологического материала Ω , а z^* – вектор параметров лазерного воздействия.

Математическая модель 4.

На практике часто встречаются задачи, когда необходимо оценить число жизнеспособных и термически-травмируемых зародышей. Такая задача возникает при лазерном делении ранних элитных эмбрионов крупного рогатого скота для дальнейшей трансплантации частей эмбриона. В этом случае необходимо максимизировать число жизнеспособных зародышей, т.е. найти

$$\sum_{i=1}^N T_i(x_i, y_i, z_i, t, z^*) \rightarrow \max_{\substack{(x_i, y_i, z_i) \in \Omega^* \\ t \in [t_0, t^*] \\ z^* \in Z \\ i=1, N}}, \quad (21)$$

$$\text{где } T_i = \begin{cases} 0, & \text{если } T_i > T^*, \\ 1, & \text{если } T_i \leq T^*; \end{cases}$$

T_i – значение температурного поля в области точек многослойного (трехслойного) микробиологического объекта (эмбриона) Ω . Заметим, что

некоторые приведенные выше математические модели, на первый взгляд, кажутся известными. Однако если обратить внимание на то обстоятельство, что температурные поля биообъектов представляются в параметрическом виде (в зависимости от характеристик дискретного подвижного источника), то эти модели обладают новизной. Кроме того, вопросам моделирования процессов действия лазерного луча на многослойный биологический материал в научных публикациях уделяется недостаточно внимания.

Выводы. Проведённые в статье исследования позволили предложить методику моделирования и оптимизации основных параметров теплового воздействия на многослойный биологический материал с учётом требования обеспечения жизнеспособности сегментируемых частей биоматериала. В рамках решения этой основной задачи авторами усовершенствована математическая модель основной оптимизационной задачи с учетом специфики параметров сканируемых лазерных источников. Рассмотрены прикладные оптимизационные математические модели, являющиеся частными случаями, после их формализации, основной оптимизационной задачи. Это дало возможность осуществить автоматизацию процесса моделирования действия лазерного луча на многослойный биологический материал с целью повышения качества биотехнологического процесса деления биоматериала.

Список литературы:

1. Левкін, Д. А. Математичні моделі оптимізації параметрів дії лазерного променя на багатощарові біосистеми [Текст] / Д. А. Левкін // Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2014. – № 60 (1102). – С. 77–84.
2. Мегель, Ю. Е. Обработка визуальной информации для оценки состояния биообъектов с помощью автоматической системы [Текст] / Ю. Е. Мегель, А. И. Рыбалка // АСУ и приборы автоматики. – 2002. – Вып. 118. – С. 11–16.
3. Стоян, Ю. Г. Размещение источников физических полей [Текст] / Ю. Г. Стоян, В. П. Пуятин. – К.: Наук. думка, 1981. – С. 59–87.
4. Стоян, Ю. Г. Оптимизация технических систем с источниками физических полей [Текст] / Ю. Г. Стоян, В. П. Пуятин. – К.: Наук. думка, 1988. – С. 44–48.
5. Рвачев, В. Л. Алгебро-логические и проекционные методы в задачах теплообмена [Текст] / В. Л. Рвачев, А. П. Слесаренко. – К.: Наук. думка, 1978. – 140 с.
6. Сметанкина, Н. В. Нестационарное деформирование, термоупругость и оптимизация многослойных пластин и цилиндрических оболочек [Текст]: монография / Н. В. Сметанкина. – Х.: Мис'кдрук, 2011. – 376 с.
7. Стоян, Ю. Г. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования [Текст] / Ю. Г. Стоян, С. В. Яковлев. – К.: Наук. думка, 1986. – 268 с.
8. Antinori, S. Experience with the UV non contact laser in a assisted hatching in human [Text] / S. Antinori // J. of Assist Reprod and Genet. – 1997. – Vol. 14, Issue 5.
9. Obruca, A. Fertilization and early embryology: Use of lasers in assisted fertilization and hatching [Text] / A. Obruca, H. Strohmer, D. Sakkas, Y. Menezo, A. Kogosowski, Y. Barak, W. Feichtinger // Human Reproduction. – 1994. – Vol. 9, Issue 9. – P. 1723–1726. doi: [10.1093/oxfordjournals.humrep.a138781](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.humrep.a138781)
10. Douglas-Hamilton, D. H. Thermal effects in laser-assisted pre-embryo zona drilling [Text] / D. H. Douglas-Hamilton, J. Conia // Journal of Biomedical Optics. – 2001. – Vol. 6, Issue 2. – P. 205. doi: [10.1117/1.1353796](https://doi.org/10.1117/1.1353796)

Bibliography (transliterated):

1. Levkin, D. A. (2014). Matematychni modeli optymizatsii parametriv dii lazernoho promenia na bahatosharovi biosystemy. Visnyk NTU «KhPI». Ser.: Mekhaniko-tehnologichni systemy ta komplekxy, 60 (1102), 77–84.
2. Megel', Yu. E., Rybalka, A. I. (2002). Obrabotka vizual'noy informatsii dlya ocenki sostoyaniya bioob'ektov s pomoshch'yu avtomaticheskoy systemy. ASU i pribory avtomatiki, 118, 11–16.
3. Stoyan, Yu. G., Putyatin, V. P. (1981). Razmeshchenie istochnikov fizicheskikh poley. Kyiv: Nauk. dumka, 59–87.
4. Stoyan, Yu. G., Putyatin, V. P. (1988). Optimizatsiya tekhnicheskikh sistem s istochnikami fizicheskikh poley. Kyiv: Nauk. dumka, 44–48.
5. Rvachev, V. L., Slesarenko, A. P. (1978). Algebro-logicheskie i proekcionnye metody v zadachah teploobmena. Kyiv: Nauk. dumka, 140.
6. Smetankina, N. V. (2011). Nestacionarnoe deformirovanie, termouprugost' i optimizatsiya mnogoslounykh plastin i cilindricheskikh obolochek. Kharkiv: Mis'kdruk, 376.
7. Stoyan, Yu. G., Yakovlev, S. V. (1986). Matematicheskie modeli i optimizatsionnye metody geometricheskogo proektirovaniya. Kyiv: Nauk. dumka, 268.
8. Antinori, S. (1977). Experience with the UV non contact laser in a assisted hatching in human. J. of Assist Reprod and Genet, 14 (5).

9. Obruca, A., Strohmer, H., Sakkas, D., Menezo, Y., Kogosowski, A., Barak, Y., Feichtinger, W. (1994). Fertilization and early embryology: Use of lasers in assisted fertilization and hatching. *Human Reproduction*, 9 (9), 1723–1726. doi: [10.1093/oxfordjournals.humrep.a138781](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.humrep.a138781)
10. Douglas-Hamilton, D. H., Conia, J. (2001). Thermal effects in laser-assisted pre-embryo zona drilling. *Journal of Biomedical Optics*, 6 (2), 205. doi: [10.1117/1.1353796](https://doi.org/10.1117/1.1353796)

Поступила (received) 12.07.2017

Библиографические описания / Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Математическое моделирование и оптимизация параметров действия лазерного луча на многослойные биоматериалы/ Мегель Ю. Е., Путьгин В. П., Левкин Д. А., Левкин А. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.60–64. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Математичне моделювання та оптимізація параметрів дії лазерного променя на багатосарові біоматеріали/ Мегель Ю. Є., Путьгин В. П., Левкін Д. А., Левкін А. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.60–64. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Mathematical modeling and optimization of parameters of action of a laser beam on multilayered biomaterials/ Megely Yu., Pytyatin V., Levkin D., Levkin A. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2017. – № 20 (1242).– P.60–64. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-545

Сведения об авторах / Відомості про авторів / About the Authors

Мегель Юрій Євгеньевич – доктор технічних наук, Харківський Національний Технічний Університет Сільськогосподарського Хозяйства імені Петра Василенка, професор кафедри „Кибернетики”, ул. Алчевських, 44, г. Харків, Україна, 61002; e-mail: megel_ye@mail.ru.

Путьгин Валерій Петрович – доктор технічних наук, Харківський Національний Технічний Університет Сільськогосподарського Хозяйства імені Петра Василенка, професор кафедри „Кибернетики”, ул. Алчевських, 44, г. Харків, Україна, 61002; e-mail: vasiltsova_natali@mail.ru.

Левкин Дмитрий Артурович – кандидат технічних наук, Харківський Національний Технічний Університет Сільськогосподарського Хозяйства імені Петра Василенка, асистент кафедри „Высшая математика”, ул. Мироносицкая, 92, г. Харків, Україна, 61002; e-mail: valoi@i.ua.

Левкин Артур Владимирович – кандидат технічних наук, Харківський Національний Технічний Університет Сільськогосподарського Хозяйства імені Петра Василенка, доцент кафедри „Кибернетики”, ул. Алчевських, 44, г. Харків, Україна, 61002; e-mail: artur.lav@3g.ua.

Мегель Юрій Євгеньевич – доктор технічних наук, Харківський Національний Технічний Університет Сільськогосподарського імені Петра Василенка, професор кафедри „Кибернетики”, вул. Алчевських, 44, м. Харків, Україна, 61002; e-mail: megel_ye@mail.ru.

Путьгин Валерій Петрович – доктор технічних наук, Харківський Національний Технічний Університет Сільськогосподарського імені Петра Василенка, професор кафедри „Кибернетики”, вул. Алчевських, 44, м. Харків, Україна, 61002; e-mail: vasiltsova_natali@mail.ru.

Левкин Дмитро Артурович – кандидат технічних наук, Харківський Національний Технічний Університет Сільськогосподарського імені Петра Василенка, асистент кафедри „Вищої математики”, вул. Мироносицка, 92, м. Харків, Україна, 61002; e-mail: valoi@i.ua.

Левкин Артур Владимирович – кандидат технічних наук, Харківський Національний Технічний Університет Сільськогосподарського імені Петра Василенка, доцент кафедри „Кибернетики”, вул. Алчевських, 44, м. Харків, Україна, 61002; e-mail: artur.lav@3g.ua.

Yuri Megely – Doctor of technical sciences, professor, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, department of kibernetics, Alchevskykh St., 44, Kharkiv, Ukraine, 61002; e-mail: megel_ye@mail.ru.

Valery Pytyatin – Doctor of technical sciences, professor, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, department of kibernetics, Alchevskykh str., 44, Kharkiv, Ukraine, 61002; e-mail: vasiltsova_natali@mail.ru.

Dmitry Levkin – PhD, Assistant, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, department of higher mathematics, Myronosytska str., 92, Kharkiv, Ukraine, 61002; e-mail: valoi@i.ua.

Artur Levkin – PhD, Associate Professor, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, department of kibernetics, Alchevskykh str., 44, Kharkiv, Ukraine, 61002; e-mail: artur.lav@3g.ua.