

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ТЕРМООБРОБКИ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ

***Р. А. Калініченко, докторант
В. Д. Войтюк, доктор технічних наук
Національний університет біоресурсів і
природокористування України
e-mail: vdv-tsim@ukr.net***

Анотація. *Стаття присвячена актуальній темі ідентифікації тепломасообмінних процесів у зерновому матеріалі при високоінтенсивній термообробці. В статті наведений математичний опис процесу термообробки зерна на основі закону збереження енергії і рівняння нагріву матеріалу з врахуванням змінних в часі теплофізичних коефіцієнтів. Отримано аналітичний розв'язок представленої системи рівнянь, що дозволяє з достатньою точністю для інженерних розрахунків визначати кінетики нагріву і зневоднення зернових матеріалів при інфрачервоному або мікрохвильовому підведенні енергії.*

Розроблені математичні моделі на основі експериментально-аналітичної ідентифікації високоінтенсивних процесів термообробки зернових матеріалів забезпечують широкий діапазон прорахунку режимів і параметрів машин для термообробки зернових матеріалів, а також точність і адекватність емпіричних математичних моделей.

Ключові слова: *тепло- і масообмін, термообробка, теплофізичні коефіцієнти, математична модель, зерновий матеріал*

Постановка проблеми. В системі технологічних операцій з післязбиральної обробки і переробки зерна особливе місце займає термообробка. Основні види термообробки зерна представлені на рис. 1. Термічне сушіння забезпечує довготривале збереження зібраного матеріалу [1, 2, 3], мікронізація – підвищує поживні якості фуражного зерна [4], термічна дезінсекція і дезінфекція – знезаражує зерно перед зберіганням або перед висіванням [5], термостимуляція насіння підвищує схожість і енергію проростання [6]. Відновлення хлібопекарських властивостей дефектного зерна також рекомендується здійснювати шляхом інтенсивної

термообробки зернової маси для інактивації амілолітичних і протеолітичних ферментів [7].

Зерно є термолабільним матеріалом і тому більшість видів термообробки мають обмежену максимальну температуру зерна і темп нагріву. Максимально допустимі значення нагріву зерна досягаються при високоінтенсивних видах термообробки: мікронізації – швидке зростання температури зерноматеріалу обмежується можливістю підгоряння поверхні, дезінсекції і дезінфекції – важливий максимальний темп нагріву поверхні зерна до значень температури в залежності від призначення кінцевого продукту. Забезпечити високоінтенсивну термообробку зернових матеріалів найбільш доцільно використовуючи інфрачервоний (ІЧ) або мікрохвильовий (СВЧ) підвід енергії до матеріалу. Оскільки, радіаційне і мікрохвильове випромінювання дозволяє підвести до зерноматеріалу енергії в 20–100 разів більше, ніж при конвективному чи кондуктивному енергопідводі. Таке випромінювання проникає в зерноматеріал і діє безпосередньо на воду в обробляемому матеріалі, а не нагріває проміжний теплоносій і повітропроводи, все це значно скорочує непродуктивні витрати енергії від 40% до декількох разів в залежності від виду термообробки [8, 9].



Рис. 1. Основні види термообробки зерна.

Аналіз останніх досліджень. Питання теоретичних досліджень процесів високотемпературної термообробки зернових рослинних матеріалів розглянуті в роботах [10, 11, 12, 13]. Технологічні аспекти використання зернових кормових термооброблених матеріалів в тваринництві досліджені в роботах [4, 11]. Технічні параметри установок для термообробки досліджувались у роботах [12, 13, 14]. Результати аналітичного дослідження високоінтенсивних тепло- і масообмінних процесів викладені у роботах [15, 16].

В роботі [15], на основі рівнянь енергетичного і матеріального балансів розроблені аналітичні математичні моделі, що описують процеси нагріву і зневоднення зерна при сталих теплофізичних коефіцієнтах. В роботах [16, 17] використовуються розв'язки аналітичних математичних моделей процесів тепло-масообміну для тіл класичної форми, теплофізичні коефіцієнти також приймаються незмінними за процес. В свою чергу, характер протікання високоінтенсивного тепло- і масообміну в зерновому матеріалі при мікронізації має декілька етапів, тобто змінюється за процес [18] і це суттєво впливає на значення тепломасообмінних коефіцієнтів в розроблених аналітичних математичних моделях. Але досліджень процесу високоінтенсивного тепло- і масообміну із врахуванням змінних теплофізичних коефіцієнтів проведено недостатньо, що ускладнює визначення раціональних режимів проведення процесу в залежності від параметрів установки і характеристик зернового матеріалу.

Мета досліджень. Розробка та ідентифікація за експериментальними даними аналітичної математичної моделі тепло- і масообмінних процесів при високоінтенсивній термообробці зернових матеріалів для її використання при обґрунтуванні раціональних параметрів і режимів проведення термообробки зернового матеріалу.

Результати досліджень. Для аналізу процесів складемо математичну модель на основі енергетичного балансу і рівняння нагріву [19, 20].

$$mc \frac{d\theta}{d\tau} - mr_0 \frac{dU}{d\tau} + \alpha f(\theta - t) = A\eta P; \quad (1)$$

$$\frac{d\theta}{d\tau} = k(\theta_m - \theta); \quad (2)$$

де: U – вологовміст зерна, кг/кг; θ – температура зерна, $^{\circ}\text{C}$; t – температура оточуючого повітря, $^{\circ}\text{C}$; m – маса зерна, кг; c – теплоємність зерна, Дж/кг·К; r_0 – теплота пароутворення, Дж/кг вип.вологи; α – коефіцієнт теплообміну, Вт/м²·К; f – площа поверхні зерна, м²; A – коефіцієнт поглинання енергії матеріалом, η – к.к.д. опромінювача, k – коефіцієнт нагріву, с⁻¹.

Розв'яжемо, рівняння (2) за умови $\theta(0) = \theta_0$, отримаємо:

$$\theta(\tau) = \theta_m - (\theta_m - \theta_0) \exp(-k\tau) \quad (3)$$

де: θ_m – максимальна температура нагріву зерна, θ_0 – початкова температура зерна.

Коефіцієнт k – визначаємо за експериментальними даними у вигляді лінійної емпіричної залежності:

$$k = -0.0024 - 0.08U_0 + 0.0016E \quad (4)$$

де: U_0 – вологовміст, кг/кг; E – підведена енергетична освітленість,

кВт/м², що визначається із залежності:

$$E = \frac{P \cdot \eta}{F} \quad (5)$$

де: F – опромінювана поверхня, м².

З рівняння (3) визначимо експозицію термообробки зерна:

$$T = -\frac{1}{k} \ln \frac{\theta_k - \theta_m}{\theta_0 - \theta_m} \quad (6)$$

Розрахункова поверхня експозиції нагріву, за формулами (4) і (6), ($\theta_k = 170 \text{ }^\circ\text{C}$) зерноматеріалу і експериментальні дані представлені на рис. 2.

Теплофізичні коефіцієнти у формулі (1) можна визначити так [20]:

c – теплоємність зерна, залежить від його вологості:

$$c = c_c(1-U) + c_v U, \quad (7)$$

де: c_c – теплоємність сухої речовини зерна, Дж/кг·К; c_v – теплоємність води, Дж/кг.

r_0 – енергія пароутворення, залежить від температури зерна:

$$r_0 = r - b\theta, \quad (8)$$

A – коефіцієнт поглинання енергії матеріалом, залежить від вологовмісту матеріалу, прийемо залежність лінійною:

$$A = A_0 - A_1 U \quad (9)$$

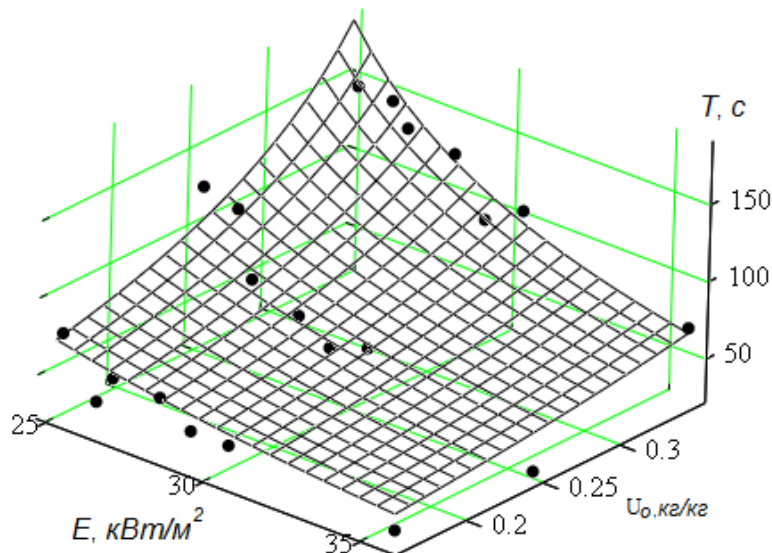


Рис. 2. Поверхня експозиції нагріву зернівки до температури $\theta_k = 170 \text{ }^\circ\text{C}$ розрахована за формулами (3), (4); ● – експериментальні дані; рівень множинної кореляції $R = 0.91$.

Підставимо (3), (4), (7), (8), (9) в (1), отримаємо:

$$m(c_c(1-U) + c_v U)(k(\theta_m - \theta_0) \exp(-k\tau)) - m(r - b(\theta_m - (\theta_m - \theta_0) \exp(-k\tau))) \frac{dU}{d\tau} + (10) \\ + \alpha f(\theta_m - (\theta_m - \theta_0) \exp(-k\tau) - t) = (A_0 - A_1 U) \cdot \eta \cdot P$$

Після розкриття дужок і зведення подібних доданків матимемо:

$$(B_1 + B_2 e^{k\tau}) \frac{dU}{d\tau} + (M_1 + M_2 e^{k\tau}) U = (D_1 + D_2 e^{k\tau}) \quad (11)$$

де

$$B_1 = bm(\theta_0 - \theta_m); \quad (12)$$

$$B_2 = m(b\theta_m - r); \quad (13)$$

$$M_1 = km(\theta_0 - \theta_m)(c_c - c_v); \quad (14)$$

$$M_2 = A_1 \eta P; \quad (15)$$

$$D_1 = (\theta_0 - \theta_m)(c_c km - \alpha f); \quad (16)$$

$$D_2 = A_0 \eta \frac{P}{F} + \alpha f(t - \theta_m). \quad (17)$$

Розв'язок звичайного неоднорідного диференціального рівняння першого порядку (11) за початкової умови $U(0)=U_0$ отримаємо у вигляді:

$$U(\tau) = \left(\int_0^\tau (B_1 + B_2 \cdot e^{k \cdot s})^{\frac{-k B_1 B_2 + M_2 B_1 - B_2 M_1}{k B_1 B_2}} \cdot (e^{k s})^{\frac{M_1}{k B_1}} (D_1 + D_2 e^{k s}) ds + \frac{U_0}{(B_1 + B_2) \left(\frac{M_1}{k B_1} - \frac{M_2}{k B_2} \right)} \right) \times \\ \times (B_1 + B_2 e^{k \tau})^{\left(\frac{M_1}{k B_1} - \frac{M_2}{k B_2} \right)} (e^{k \tau})^{\frac{-M_1}{k B_1}} \quad (18)$$

На рис. 3. представлена кінетика зміни вологовмісту зерна розрахована за представленою залежністю (18) і експериментальні дані.

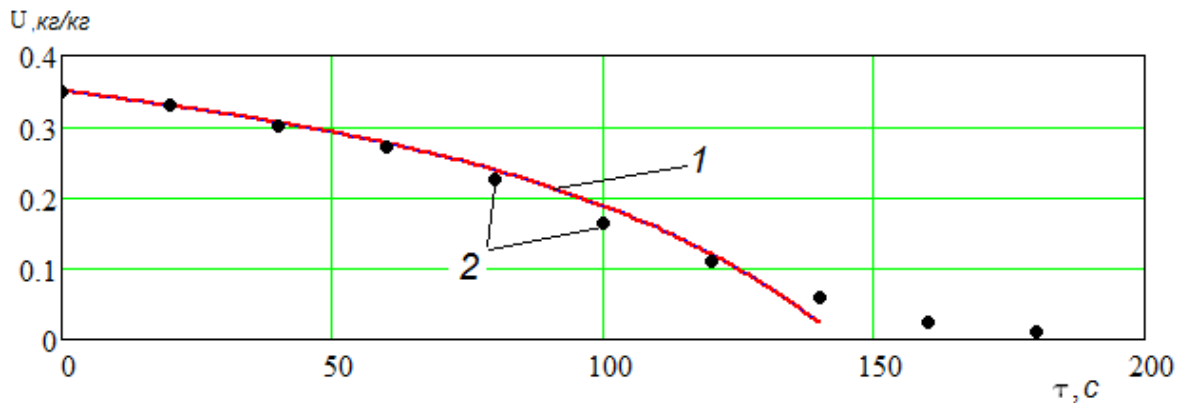


Рис. 3. Кінетика зміни вологовмісту при мікронізації зерна з енергетичною освітленістю $E=25\text{кВт/м}^2$: 1 – аналітична залежність за формулою (18), 2 – експериментальні точки.

Висновки

Розроблений аналітичний математичний апарат із змінними експериментально ідентифікованими коефіцієнтами дозволяє з достатньою точністю для інженерних розрахунків визначати експозицію процесів нагріву і зневоднення зерна в залежності від початкової вологості зернового матеріалу і його енергетичної освітленості.

Розроблені математичні моделі на основі експериментально-аналітичної ідентифікації високоінтенсивних процесів термообробки зернових матеріалів забезпечують широкий діапазон прорахунку режимів і параметрів машин для термообробки зернових матеріалів, а також точність і адекватність емпіричних математичних моделей.

Список літератури

1. Kotov B., Kalinichenko R., Spirin A. Mathematical modeling of heat and mass transfer process under heat treatment of grain materials in dense layer. ТЕКА. Lublin. 2016. Vol. 16. №4. P. 35–42.
2. Гулавський В. Т. Научные основы применения различных видов ВТО при переработке зерна. Зернові продукти і комбікорми. 2014. № 3. С. 27–37.
3. Гапонюк І. О. Вітчизняні зерносушарки: стан та перспективи. Хранение и переработка зерна. 2014. №2. С. 25–29.
4. Мишуров Н. П. Совершенствование инженерно-технического обеспечения молочных ферм на основе комплексной энергетической оценки: научное издание. Москва. Росинформагротех. 2011. 120 с.
5. Герещенко Б. О., Токарчук Т. А., Анаевич О. А. Применение инфракрасного облучения для обеззараживания зерна при хранении. Хранение и переработка зерна. 1998. №6. С. 36–37.
6. Червинский Л. С., Романенко А. И., Калиниченко Р. А. Влияние комбинированного оптического излучения на семена огурца. Инновации в сельском хозяйстве. 2016. №1(16). С. 93–96.
7. Губиев Ю. К., Пунков С. П., Еркинбаева Р. К. Термообработка зерна микроволновым полем. Известия вузов. Пищевая технология. 1995. № 1-2. С. 86–90.
8. Котов Б. І., Калініченко Р. А., Романенко О. І. Математичне моделювання динаміки нагрівання зернівки в змінному радіаційному потоці. Науковий вісник ТДАТУ. Мелітополь. ТДАТУ. 2015. Вип. 5. Т. 2. С. 210–218.
9. Елькин Н. В. Теория и практика инфракрасной обработки зерна и крупы. Хранение и переработка зерна. 2006. № 4. С. 26–30.
10. Котов Б. І., Калініченко Р. А., Степаненко С. П., Швидя В. О., Лісецький В. О. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентилявання, охолодження). Ніжин. Видавець ПП Лисенко М.М. 2017. 552 с.
11. Кочанов Д. С. Научное обеспечение процесса микронизации зерновых культур и разработка технологии производства комбикормов из микронизированного зерна. Автореф. дис. канд. техн. наук. Воронеж. 2014. 23 с.
12. Филатов В. В. Совершенствование процесса термообработки зерна при инфракрасном энергоподводе. Автореф. дис. канд. техн. наук. Москва. 2005. 32 с.
13. Проничев С. А. Импульсная инфракрасная сушка семенного зерна. Автореф. дис. канд. техн. наук. Москва. 2007. 22с.
14. Лигидов В. А. Повышение эффективности микронизатора с поперечно расположенными линейными инфракрасными излучателями при обработке зерна и круп. Автореф. дис. канд. техн. наук. Москва. 2006. 26 с.
15. Дубровин В., Калиниченко Р., Кифяк В. Моделирование динамики тепловых процессов при микронизации и сушении зернопродуктов в терморadiационных установках ИК-излучением. MOTROL. 2015. Vol. 17. No 3. P. 150–157.

16. Поперечний А. М., Миронова Н. О. Кінетика процесу сушіння плодкових кісточок у віброкиплячому шарі при інфрачервоному нагріванні. Вісник харківського національного технічного університету сільського господарства. Харків. 2007. Вип. 58. С. 122–129.
17. Ляхно В. А., Ширяев Д. А. Использование компьютерных систем для повышения эффективности информационной поддержки инфракрасной сушки зерна: монография. Луганск. Элтон-2. 2011. 165 с.
18. Павлов С. А. Обоснование параметров установки для обработки кормового зерна интенсивным инфракрасным излучением. Автореф. дис. канд. техн. наук. Москва. 1987. 20 с.
19. Худогогов А. М. Технология обработки дикорастущего и сельскохозяйственного сырья высококонцентрированным инфракрасным нагревом. Автореф. дис. док. техн. наук. Новосибирск. 1989. 46 с.
20. Калініченко Р. А., Котов Б. І. Ідентифікація математичної моделі процесу мікронізації зерна за даними експериментів. Механізація та електрифікація сільського господарства. 2017. №5(104). С.123–131.

References

1. Kotov, B., Kalinichenko, R., Spirin, A. (2016). Mathematical modeling of heat and mass transfer process under heat treatment of grain materials in the dense layer. TEKA. Lublin. Vol. 16. No. 4. 35–42.
2. Gulevskiy, V. T. (2014). Scientific basis for the use of different types of WTO when prerabotka grain. Grain Products and Mixed Fodders. No. 3. 27–37.
3. Gaponyuk, I. A. (2014). Domestic dryers: status and prospects. Storage and Processing of Grain. No. 2. 25–29.
4. Mishurov, N. P. (2011). Improvement engineering support dairy farms based on a comprehensive energy assessment: scientific publication. Moscow. Rosinformagrotech. 120.
5. Gerashenko, A., Tokarchuk, T. A., Anaemic, A. A. (1998). Application of infrared radiation for grain fumigation during storage. Storage and Processing of Grain. No 6. 36–37.
6. Chervinsky, L. S., Romanenko, A. S., Kalinichenko, R. A. (2016). Effect of combined optical radiation on seeds of cucumber. Innovations in Agriculture. No 1(16). 93–96.
7. Gubiev, J. K., Erkinbaeva, G. K. (1995). Heat treatment of grain microwave field. Izvestiya vuzov. Food Technology. No 1-2. 86–90.
8. Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A., Romanenko, A. I. (2015). Mathematical modeling of dynamics of heating of the grains in an alternating flow of radiation. TDATA. Melitopol. Vol. 5. No 2. 210–218.
9. Elkin, N. V. (2006). Theory and practice of infrared processing of grains and cereals. Storage and Processing of Grain. No 4. 26–30.
10. Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A., Stepanenko, S. P., Swida, V. A., Lisiecki, A. V. (2017). Modeling of technological processes in the model objects post-harvest processing and grain storage (separation, drying, aeration, cooling). Nizhyn. Publisher Lysenko. 552.
11. Kochanov, D. C. (2014). Scientific support of the process the micronized substance of grain crops and development of the technology of feed production from micronized grain. Abstract. Dis. Cand. Tech. Sciences. Voronezh. 23.
12. Filatov, V. V. (2005). Improving the process of heat treatment of grain with infrared energopodachi. Abstract. Dis. Cand. Tech. Sciences. Moscow. 32.
13. Pronichev, S. A. (2007). Pulsed infrared drying of seed grain. Abstract. Dis. Cand. Tech. Sciences. Moscow. 22.

14. *Legalov, V. A.* (2006). Improving the efficiency of micronizer with a transverse linear infrared emitters in the processing of grains and cereals. Abstract. Dis. Cand. Tech. Sciences. Moscow. 26.
15. *Dubrovin, V., Kalinichenko, R.* (2015). Modeling of dynamics of thermal processes with micronized substance and grain products heat in drying installations of infrared radiation. MOTROL. Vol. 17. No 3. 150–157.
16. *Cross, A. M., Mironova, N. A.* (2007). Kinetics of drying process of fruit seeds in vbrakes layer by infrared heating. Bulletin of Kharkov national technical University of agriculture. Kharkov. Vol. 58. 122–129.
17. *Lakhno, V. A., Shiryayev, D. A.* (2011). Use of computer systems to improve the efficiency of information support of infrared drying of grain: monograph. Lugansk. Elton-2. 165.
18. *Pavlov, S. A.* (1987). Substantiation of parameters of installations for the processing of coarse grain, intense infrared radiation. Abstract. Dis. Cand. Tech. Sciences. Moscow. 20.
19. *Hudonogov, A. M.* (1989). Technology of processing of wild and agricultural raw materials highly concentrated infrared heating. Abstract. Dis. Doc. Tech. Sciences. Novosibirsk. 46.
20. *Kalinichenko, R. A., Kotov, B. I.* (2017). Identification of the mathematical model of the process mcrose grain according to the experiments. Mechanization and Electrification of Agriculture. No 5 (104). 123–131.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ ЗЕРНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Р. А. Калиниченко, В. Д. Войтюк

Аннотация. *Статья посвящена актуальной теме идентификации теплообменных процессов в зерновом материале при высокоинтенсивной термообработке. В статье приведено математическое описание процесса термообработки зерна на основе закона сохранения энергии и уравнения нагрева материала с учетом переменных во времени теплофизических коэффициентов. Полученное аналитическое решение представленной системы уравнений, позволяет с достаточной точностью для инженерных расчетов определять кинетики нагрева и обезвоживания зерновых материалов при инфракрасном или микроволновом способе подведения энергии.*

Разработанные математические модели на основе экспериментально-аналитической идентификации высокоинтенсивных процессов термообработки зерновых материалов обеспечивают широкий диапазон просчета режимов и параметров машин для термообработки зерновых материалов, а также высокую точность и адекватность как у эмпирических математических моделях.

Ключевые слова: *тепло- и массообмен, термообработка, теплофизические коэффициенты, математическая модель, зерновой материал*

**MATHEMATICAL MODELING OF TEPLOMASS-EXCHANGE
PROCESSES OF HIGH-TEMPERATURE THERMO-PROCESSING
OF GRAIN MATERIALS**

R. A. Kalinichenko, V. D. Voytyuk

Abstract. *The article is devoted to the actual topic of identification of heat-exchange processes in grain material under high-intensity heat treatment. The paper gives a mathematical description of the process of heat treatment of grain based on the law of conservation of energy and the equation of material heating, taking into account the time-varying thermophysical coefficients. The obtained analytical solution of the presented system of equations allows, with sufficient accuracy for engineering calculations, to determine the kinetics of heating and dehydration of grain materials in the infrared or microwave energy supply method.*

The developed mathematical models on the basis of experimental and analytical identification of high-intensity processes of heat treatment of grain materials provide a wide range of calculation modes and parameters of machines for heat treatment of grain materials, as well as high accuracy and adequacy in empirical mathematical models.

Key words: *heat and mass transfer, heat treatment, thermophysical coefficients, mathematical model, grain material*

УДК 531

**КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ ДИНАМІЧНОГО АНАЛІЗУ
ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕХАНІЗМІВ ПОВОРОТУ
ВАНТАЖОПІДЙОМНИХ КРАНІВ З ВАНТАЖЕМ НА ПРУЖНІЙ
ПІДВІСЦІ (КАНАТІ)**

**Ю. В. Човнюк, І. М. Сівак, кандидати технічних наук
Національний університет біоресурсів і
природокористування України
e-mail: sivakim@ukr.net**

Анотація. *Запропонована математична модель для динамічного аналізу функціонування механізмів повороту вантажопідйомних кранів, які несуть на пружній підвісці (канаті) вантаж, котра базується на методах аналітичної механіки й геометрії, розроблених В. І. Арнольдом, завдяки підходу до розв'язку основних задач класичної механіки, який застосовує геометричні*

© Ю. В. Човнюк, І. М. Сівак, 2017