

## ВПЛИВ ПРИМУСОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ШЛІФУВАННЯ

Ліщенко Н.В., канд. техн. наук, асистент  
Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса  
Ларшин В.П., д-р техн. наук, професор  
Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса

*Розроблено математичну модель температурного циклу шліфування, інваріантну відносно властивостей оброблюваного матеріалу і режимів шліфування, з регульованими безрозмірними параметрами примусового охолодження, які визначають теплообмін і температуру охолоджувального середовища. Досліджено вплив цих параметрів на безрозмірну і розмірну температуру шліфування.*

*A mathematical model of grinding temperature cycle, invariant to the processed material properties and grinding modes with the managed dimensionless parameters of the forced cooling that determine a heat exchange and coolant temperature is worked out. Influence of these parameters on the dimensionless and dimension grinding temperature is investigated.*

Ключові слова: шліфування, безрозмірна (відносна) температура, примусове охолодження, температурний цикл нагріву і охолодження.

Температурний фактор є одним із найважливіших при оптимізації процесів лезової і алмазно-абразивної обробки. Завдання визначення температурного поля при механічній обробці різанням, і зокрема при шліфуванні, розглянуто у великій кількості робіт, однак дотепер залишається ряд невирішених питань. До числа цих питань відноситься вплив примусової охолоджувальної дії середовища, наприклад, мастильно-охолоджувальної рідини (МОР), на формування температурного поля рухливого смугового джерела й фізико-механічний стан поверхневого шару. Спроба врахувати вплив МОР [1] дозволила одержати тільки наближений розв'язок. Складність завдання обумовлена необхідністю враховувати одночасно граничні умови другого й третього роду – умов теплообміну на поверхні тіла. Отриманий розв'язок [1] має ряд недоліків: не оцінена похибка прийнятих припущень, не враховується вплив температури МОР на температуру шліфування. Так охолоджувальна дія МОР враховується тільки через коефіцієнт теплообміну  $\alpha$ , температура МОР прийнята рівної нулю на етапі постановки задачі.

У роботі [2] приводиться розв'язок, вільний від зазначених недоліків, однак цей розв'язок наведений в розмірному вигляді, не має необхідної спільності, характерної для безрозмірного подання температурного поля (інваріантно щодо режимів шліфування та теплофізичних властивостей оброблюваних матеріалів). Крім того, не досліджено вплив різної ефективності теплообміну на температуру шліфування й не з'ясовано, як впливає на температуру шліфування температура охолоджувального середовища. Це тим більше актуально, якщо врахувати, що в технології шліфування застосовують як підігрів, так і охолодження МОР.

Метою даної роботи є розвиток нового підходу [2] до визначення температури шліфування на поверхні й по глибині поверхневого шару. Для посилення спільності отриманих результатів (тобто для охопту будь-яких умов шліфування й матеріалів) наведені нижче залежності представлені в безрозмірному вигляді.

Температурне поле на етапі нагрівання описується математичною залежністю, що представляє собою розв'язок одномірного диференціального рівняння теплопровідності. Особливістю підходу є умова пропорційності безрозмірного часу дії реального теплового джерела на етапі нагрівання безрозмірній його напівширині [3], оскільки обидві ці величини (при стаціонарному температурному полі) зв'язані. Це дозволяє при використанні розв'язку одномірного диференціального рівняння теплопровідності (не містить просторових параметрів теплового джерела в напрямку його рівномірного руху по координаті  $Z$  зі швидкістю  $V$ ) мати віртуальну координату  $Z'$ , що пропорційна безрозмірному часу. Це час при рівномірному русі джерела пропорційний реальній координаті  $Z$ . Залежність для визначення безрозмірної температури на етапі нагрівання, отримана на основі розмірної залежності, наведеної в роботі [2], має вигляд

$$\Theta_H(X, H) = 2\pi\sqrt{H} \cdot \operatorname{ierfc} \frac{X}{2\sqrt{H}} + \Theta_0 =$$

$$2\pi\sqrt{H} \cdot \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left\{-\left(\frac{X}{2\sqrt{H}}\right)^2\right\} - \frac{X}{2\sqrt{H}} \cdot \operatorname{erfc} \frac{X}{2\sqrt{H}} \right] + \Theta_0 \quad (1)$$

$$H = \frac{Vh}{2a} = \frac{V^2\tau}{4a}; \quad X = \frac{Vx}{2a},$$

де  $0 \leq H \leq H_H$  – безрозмірна просторова координата, пропорційна безрозмірному часу дії теплового джерела;

$H_H = \frac{V^2\tau_H}{4a}$  – максимальне значення  $H$ , що точно дорівнює безрозмірній напівширині  $H_H$  дже-

рела тепла (безрозмірний час пропорційний безрозмірній напівширині рухливого джерела);

$h_H \geq h \geq 0$  – поточна розмірна напівширина смугового джерела тепла, що визначає проміжну температуру нагрівання на ділянці нагрівання, м;

$h_H$  – максимальне значення  $h$  на етапі нагрівання, рівне напівширині реального теплового джерела, м;

$\tau = \frac{2h}{V}$  – розмірний час нагрівання, що змінюється в інтервалі  $\tau_H \geq \tau \geq 0$ , с;

$\tau_H = \frac{2h_H}{V}$  – максимальний розмірний час нагрівання на етапі нагрівання, с.

$X$  – безрозмірна координата;

$x$  – розмірна координата, м;

$V$  – швидкість переміщення реального джерела тепла, м/с;

$a$  – коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу, м<sup>2</sup>/с;

$\Theta_0$  – безрозмірна початкова температура оброблюваної заготовки (постійна величина).

Безрозмірну температуру шліфування  $\Theta_O(X, H_H, H_O)$  на етапі охолодження (з початковими умовами, отриманими на етапі нагрівання) знаходять за таким рівнянням, отриманим перетворенням відповідної розмірної залежності [2]

$$\Theta_O(X, H_H, H_O) = \int_0^\infty \left[ \frac{1}{2\sqrt{\pi H_O}} \left\{ \exp\left[-\left(\frac{X-X'}{2\sqrt{H_O}}\right)^2\right] + \exp\left[-\left(\frac{X+X'}{2\sqrt{H_O}}\right)^2\right] \right\} - \frac{Bi}{H_H} \times \right.$$

$$\left. \times \exp\left\{ \left(\frac{Bi}{H_H}\right)^2 H_O + \frac{Bi}{H_H} (X+X') \right\} \cdot \operatorname{erfc} \left[ \frac{X+X'}{2\sqrt{H_O}} + \frac{Bi}{H_H} \sqrt{H_O} \right] \right] \times f(X') dX' +$$

$$+ \frac{Bi}{H_H} \int_0^{\frac{4a}{V^2} H_O} \left[ \frac{\exp\left[-\left(\frac{X}{2\sqrt{H_O-H}}\right)^2\right]}{\sqrt{\pi(H_O-H)}} - \frac{Bi}{H_H} \exp\left\{ \left(\frac{Bi}{H_H} \sqrt{H_O-H}\right)^2 + \frac{Bi}{H_H} X \right\} \times \right.$$

$$\left. \times \operatorname{erfc} \left[ \frac{X}{2\sqrt{H_O-H}} + \frac{Bi}{H_H} \sqrt{H_O-H} \right] \right] \cdot \Theta_C(H_O) dH; \quad f(X') = 2\pi\sqrt{H_H} \operatorname{ierfc} \frac{X'}{2\sqrt{H_H}} + \Theta_0, \quad (2)$$

де  $Bi = \frac{\alpha h_H}{\lambda}$  – критерій Біо, що характеризує теплообмін;

$\alpha$  – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

$\infty \geq H_O = \frac{V^2 \tau_O}{4a} \geq 0$  – безрозмірна просторова координата ( $Z'$ ), пропорційна реальному часу охолодження  $\tau_O$ , що відлічується від моменту закінчення етапу нагрівання;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу, Вт/(м · °С);

$\Theta_C(H_O)$  – безрозмірна температура охолоджувального середовища (може бути змінною величиною, що залежить від безрозмірного часу  $H_O$ ).

Для одержання розмірної температури на етапах нагрівання й охолодження необхідно вирази (1) і (2) помножити на загальноприйнятій у теплофізиці механічної обробки коефіцієнт  $K = \frac{2qa}{\pi\lambda V}$ ,

де  $q$  – щільність теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>.

Одномірна математична модель у складі рівнянь (1) і (2) описує безрозмірну температуру шліфування на етапах нагрівання й охолодження оброблюваної поверхні з урахуванням примусового охолодження цієї поверхні (на етапі охолодження) відповідно до розв'язку одномірного диференціального рівняння теплопровідності. Відмінною рисою цієї моделі є облік на тільки інтенсивності теплообміну (критерій Біо  $Bi$ ), але також безрозмірної температури охолодженого середовища (температура  $\Theta_C$ ), що у загальному випадку може бути змінною на інтервалі безрозмірного часу охолодження  $H_O$ .

Отриману одномірну математичну модель порівнювали з аналогічною двовимірною моделлю, що містить одне рівняння для ділянок нагрівання й охолодження – розв'язком двовимірного диференціального рівняння теплопровідності. Це розв'язок отримано при граничних умовах третього роду, однак з рядом допущень, що дозволяють урахувати неоднорідні (розривні) граничні умови реального завдання. Це розв'язок має вигляд [1]

$$\theta(Z, X, H) = k \cdot \left[ \int_{Z-H}^{Z+H} \exp(-\xi) K_0 \left( \sqrt{X^2 + \xi^2} \right) d\xi - \beta \cdot \int_{Z-H}^{Z+H} \exp(\beta X - \xi) \cdot \int_X^\infty \exp(-\beta X) K_0 \left( \sqrt{X^2 + \xi^2} \right) \cdot dX \cdot d\xi \right] \quad (3)$$

Причому,

$$\xi = \frac{V(z-z')}{2a}; \quad X = \frac{Vx}{2a}; \quad Z = \frac{Vz}{2a}; \quad H = H_H = \frac{Vh_H}{2a}; \quad k = \frac{1}{1 - \frac{\beta}{2\pi H} \int_{-H}^H \theta(Z) \cdot dZ},$$

де  $\beta = \frac{2a \alpha}{V \lambda}$  – безрозмірний комплекс, що характеризує ефективність теплообміну;

$K_0$  – модифікована функція Бесселя другого роду нульового порядку;

$z = z' - V\tau'$  – розмірна координата в напрямку вектора швидкості джерела тепла, причому в зоні контакту  $0 \leq |z| \leq h_H$ , м;

$z'$  – додаткова змінна, м;

$\tau'$  – час, що визначає координату  $z$  у квазіустановленому температурному процесі, с.

У рівнянні (3) використовується множник  $k > 1$ , обумовлений числовим шляхом, тому що вираження у квадратних дужках цього рівняння отримано з умови примусового охолодження не тільки за межами смугового джерела, але й під джерелом теж. Відомо, що під джерелом немає примусового охолодження, тому що саме джерело (шліфувальний круг) перешкоджає проникненню в зону різання охолодженого середовища.

Видно, що використовуваний у рівнянні (3) комплекс  $\beta$  можна виразити залежністю  $\beta = \frac{Bi}{H_H}$ , що використовується в рівнянні (2). Дійсно

$$\beta = \frac{Bi}{H_H} = \frac{Bi}{1} \frac{1}{H_H} = \frac{\alpha h_H}{\lambda} \frac{2a}{V h_H} = \frac{2a \alpha}{V \lambda}.$$

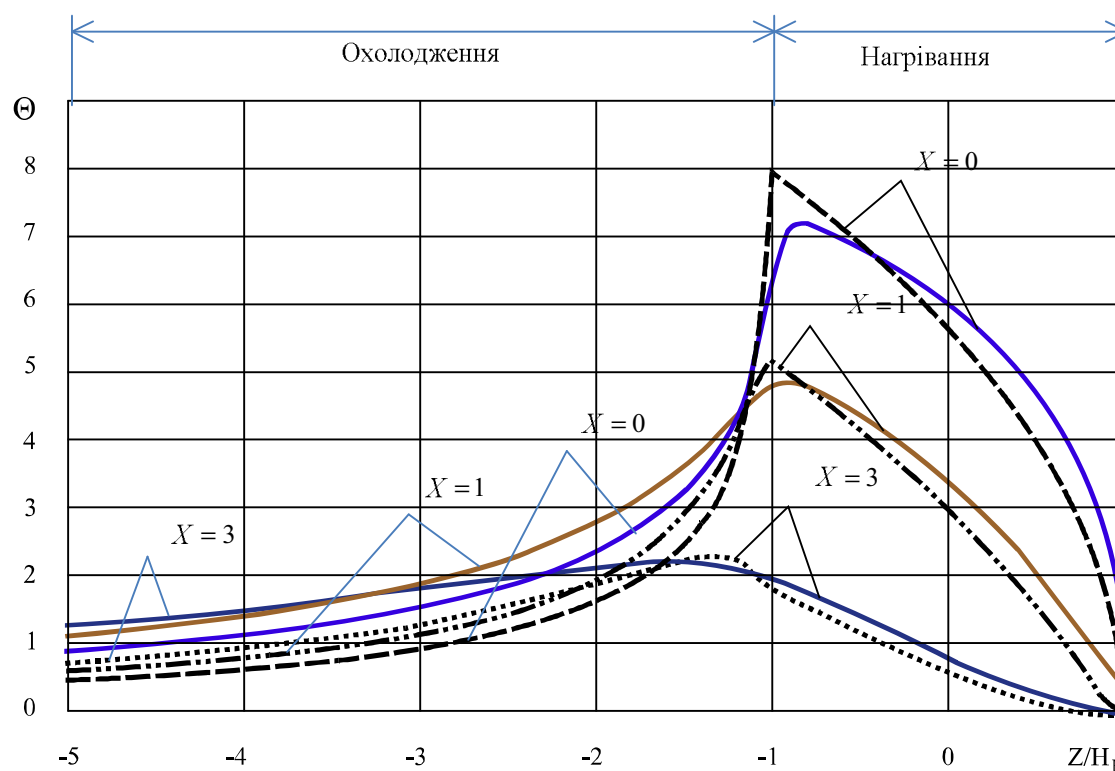
Таким чином, одномірна математична модель – рівняння (1) і (2) – містить ті ж самі змінні величини й відрізняється від моделі (3) тільки відсутністю координати  $Z$ , у напрямку якої зі швидкістю  $V$  рухається теплове джерело. Змінні  $H_H \geq H \geq 0$  й  $\infty \geq H_O \geq 0$  у рівняннях (1) і (2) аналогічні координаті  $Z$  у двовимірному диференціальному рівнянні теплопровідності, тому для порівняння одно- і двовимірної математичних моделей використовується відносна координата  $Z/H_H$ . У цьому випадку повна безрозмірна ширина джерела (у розмірному вигляді це  $2h_H$ ) змінюється від -1 до +1 (рис.1).

Порівняльні дослідження одно- і двовимірної математичної моделі виконали при таких вихідних даних, наведених в [1]:

$a = 5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\lambda = 25,54$  Вт/м·°С;  $\alpha = 36000$  Вт/м<sup>2</sup>·°С;  $V = 3$  м/хв = 0,05 м/с;  $h_H = 1$  мм (напівширина контакту);

$$H_H = \frac{Vh_H}{2a} = 5; \quad Bi = \frac{\alpha h}{\lambda} = \frac{36000 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{25,54} = 1,41; \quad k = 1,54; \quad \beta = \frac{2a \alpha}{V \lambda} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 36000}{5 \cdot 10^{-2} \cdot 25,54} = 0,282 \text{ або}$$

$\beta = \frac{Bi}{H_H} = \frac{1,41}{5} = 0,282$ . Безрозмірну координату  $X$  (по глибині поверхневого шару) у рівнянні (3) приймали:  $X = 0$ ,  $X = 1$  і  $X = 3$  (рис.1).



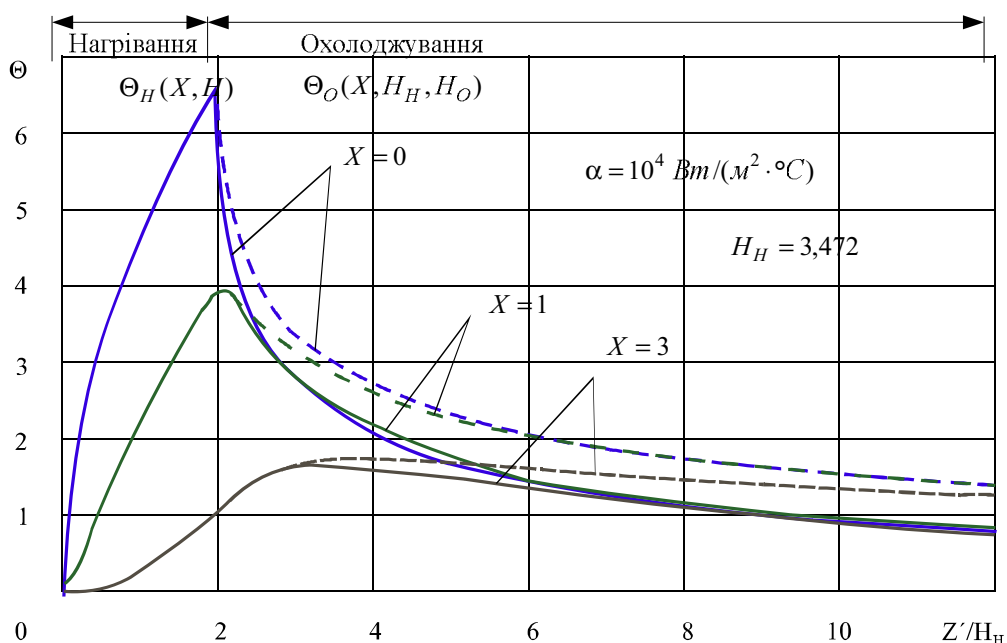
**Рис. 1 – Зміна температури шліфування у двовимірній системі координат рухливого джерела (суцільні лінії) і в одномірній системі координат нерухливого еквівалентного джерела (переривчасті лінії)**

Видно, що температурні поля для одно- і двовимірної моделі аналогічні на ділянках нагрівання й охолодження. На ділянці нагрівання ( $+1 \geq Z/H_H \geq -1$ ) у міру збільшення  $X$  безрозмірна температура  $\Theta$  зменшується. На ділянці сталого охолодження, в інтервалі  $-4 \geq Z/H_H \geq -5$ , навпаки, у міру збільшення  $X$  безрозмірна температура  $\Theta$  збільшується. Однак відповідно до одномірного розв'язку (переривчасті лінії на рис.1) температура на ділянці охолодження у всьому досліджуваному інтервалі  $X$  виявляється нижчою (переривчасті лінії на рис. 1 виявляються нижчими відповідних суцільних ліній приблизно у два рази). З огляду на те, що при шліфуванні найнебезпечнішими є високі температури в інтервалі  $-0,5 \geq Z/H_H \geq -1,5$  (задня крайка джерела), можна дійти висновку про непогану відповідність результа-

тів розрахунку температури: в інтервалі аргументу  $-0,5 \geq Z/H_H \geq -1,5$  розходження в результатах розрахунку не перевищує (4,5...10,6) %.

Відомо [3], що для гнітючої кількості схем шліфування інтервал зміни критерію Пекле  $H_H$  становить:  $20 \geq H_H \geq 4$ . Причому розходження між одно- і двовимірної моделями зростає в міру наближення величини  $H_H$  до меншого значення цього інтервалу, тобто до значення  $H_H = 4$ . Отже, порівняння двох розв'язків при несприятливій ситуації ( $H = H_H = 5$ ) методично виправдане, тому що в інтервалі  $H_H \geq 5$  розходження в розрахунках буде меншим від зазначеного (4,5...10,6) %.

Розроблена математична модель температурного поля в складі рівнянь (1) і (2) може застосовуватися для вивчення процесу шліфування і його технологічної діагностики. Як приклад розглянемо безрозмірне температурне поле, розраховане за рівняннями (1) і (2), при таких даних:  $H_H = 3,472$  і  $\Theta_0 = \Theta_C = 0$ . Тобто без обліку початкової температури заготовки і при нульовій температурі МОР, однак при ефективному її охолоджувальному впливі:  $\alpha = 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ . Безрозмірну координату  $H_O$  на відповідному етапі охолодження змінювали в інтервалі, що в 5 разів перевищував величину  $H_H$ , тобто  $0 \leq H_O \leq 5H_H$  (рис. 2).



**Рис. 2 – Зміна температури шліфування  $\Theta$  залежно від відношення безрозмірної координати  $Z'$  до безрозмірної напівширини джерела  $H_H$  на етапах нагрівання ( $2 \geq Z'/H_H \geq 0$ ) і охолодження ( $Z'/H_H \geq 2$ ) на поверхні ( $X = 0$ ) і на різній відстані від поверхні ( $X = 1$  і  $X = 3$ ) з обліком (суцільні лінії) і без обліку (переривчасті лінії) примусового охолодження**

Видно, що при  $X=3$  температура шліфування продовжує збільшуватися навіть на етапі охолодження без теплообміну (пунктирні лінії), досягає максимального значення  $\Theta_O(X, H_H, H_O) = 1,7$ , а потім зменшується. При наявності теплообміну (суцільні лінії) температура глибоких шарів при  $X = 1$  й  $X = 3$  стає більшою від температури поверхневого шару ( $X = 0$ ).

Розроблені теоретичні залежності (1) і (2) можна використовувати як математичне забезпечення систем комп'ютерної діагностики процесу шліфування й адаптивного керування верстатами з ЧПК за температурним критерієм з метою оптимізації технологічних систем алмазно-абразивної обробки, а також для оптимізації конструкцій переривчастих шліфувальних кругів із примусовою подачею МОР по каналах цих кругів.

**Висновки:**

— розроблено більш функціональна в порівнянні із прототипом математична модель температурного циклу шліфування, що дозволяє досліджувати безрозмірне температурне поле на ділянках нагрівання й

охлаждения обработанной поверхности с учетом влияния принудительного охлаждения обработанной поверхности на температуру шлифования;

— ступінь впливу примусового охолодження характеризується безрозмірною температурою охолоджувального середовища ( $\Theta_C$ ) і безрозмірним коефіцієнтом теплообміну  $\beta$ , рівним відношенню безрозмірних критеріїв Біо ( $Bi$ ) і Пекле ( $H_H$ );

— виконано порівняльне дослідження одно- і двовимірної математичної моделі безрозмірного температурного поля при безрозмірному часі нагрівання  $H = H_H = 5$  й установлена якісна й кількісна їхня відповідність в інтервалі найбільш значущих для процесу шлифования температур ( $-0,5 \geq Z / H_H \geq -1,5$ ) і при сталому процесі охолодження ( $-4 \geq Z / H_H \geq -5$ );

— встановлено, що в інтервалі найбільш значущих температур ( $-0,5 \geq Z / H_H \geq -1,5$ ) розходження в результатах розрахунку безрозмірної температури за рівняннями одно- і двовимірної математичних моделей не перевищує (4,5...10,6) %;

— порівняння двох моделей виконано при несприятливій ситуації ( $H = H_H = 5$ ), тому що відомо, що розходження в розрахунках температури за рівняннями одно- і двовимірної математичних моделей зменшується в міру збільшення критерію Пекле  $H_H$  в інтервалі  $20 \geq H_H \geq 5$ ;

— за розробленою математичною моделлю температурного поля виконаний аналіз розподілу безрозмірної температури по безрозмірній глибині поверхневого шару залежно від безрозмірного часу, який характеризується критерієм Пекле на ділянці нагрівання ( $H_H \geq H \geq 0$ ) і охолодження ( $5H_H \geq H_O \geq 0$ ), де  $H_H$  та  $H_O$  – безрозмірний час нагрівання і охолодження.

#### Література

1. Сипайлов, В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.
2. Лищенко, Н.В. Исследование влияния смазочно-охлаждающей жидкости на температуру шлифования / Н.В. Лищенко // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2011. – Вып.2 (36). – С. 80-86.
3. Ларшин, В.П. Применение решений теплофизических задач к расчету температуры и глубины дефектного слоя при шлифовании // Межвузовский сборник научных трудов / В.П. Ларшин, Е.Н. Ковальчук, А.В. Якимов. – Пермь: Изд. ППИ, 1986. – С. 9-16.

УДК 628.161.08537.6

## ОБРОБКА ОБЕРТОВИМ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ РІДИННИХ ХАРЧОВИХ СЕРЕДОВИЩ

Михайлова К.А., аспірант, Штепа Є.П., канд. техн. наук, доцент  
Одеська національна академія харчових технологій

*Показано, що ефект магнітної обробки в залежності від напруженості магнітного поля має поліекстремальний характер. Наведено опис установки для створення обертового магнітного поля за допомогою одного або двох статорів трифазного асинхронного двигуна. Таке магнітне поле змінюється по експоненціальному закону. Результати проведених дослідів показали позитивний вплив на видалення кристалів солей жорсткості води, на рослинну і тваринну клітинну проникність, а також на пророщення насіння.*

*It is rotined that the effect of magnetic treatment depending on tension of magnetic-field has poliekstremal'nyy character. Description of fluidizer is resulted creation of circulating magnetic-field by one or two stators of three-phase asynchronous engine. Such magnetic field changes on an exponential law. The results of the conducted experiments rotined positive influence on the delete of crystals of salts of inflexibility of water, on vegetable and animal cellular permeability, and also on seed-germinating.*

Ключові слова: поліекстремальна залежність; обертове магнітне поле; статор трифазного асинхронного двигуна; кристали солей жорсткості; рослинна і клітинна проникність; пророщення насіння.

**Постановка проблеми.** Обробка магнітним полем рідинних харчових середовищ змінює ряд їх фізико-хімічних показників, наприклад, поверхневе натягнення, електропровідність, водневий показник і тому подібне. Якість обробки залежить від багатьох факторів.