

І. Стойко¹, канд. техн. наук; П. Гнатю²

¹Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

²Бережанський агротехнічний інститут Національного аграрного університету

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ДИСКОВИХ ФРЕЗ ДЛЯ КОНТУРНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ ГЛИБОКИХ ПАЗІВ

Подано застосування методики оптимального планування експерименту для дослідження стійкості дискових фрез у процесі контурного фрезерування глибоких пазів у ділільному диску висівного апарата, що характеризується прискоренням та здешевленням проведення багатофакторного експерименту, наведено результати дослідження, встановлено математичні закономірності залежно від режимів різання з відповідними їх обґрунтуваннями.

I. Stojko, P. Gnatjo

EXPERIMENTAL RESEARCH OF STABILITE OF DISK MILLS FOR PLANIMETRIK MILLING DEEP GROOVES

Application of method of the optimum planning of experiment for research of firmness of milling cutters of disks is considered in the process of the contour milling of deep slots of disk of sowing vehicle, which is characteristic an acceleration and reduction of prices of conducting of multifactor experiment, research results are pointed, mathematical conformities to the law are set depending on the modes of cutting with conformable grounds.

Умовні позначення

b – ширина кругового паза, мм;
 h – глибина кругового паза, мм;
 d – діаметр кругового паза, мм;
 T – стійкість інструменту, хв.;
 v – швидкість різання, м/хв.;
 s_z – подача на зуб фрези, мм/зуб;
 t – глибина різання, мм;
 z – кількість зубів фрези;
 n – оберти фрези, об/хв.;
 D – діаметр фрези, мм.

Процес різання дуже складний. Результати його визначаються багатьма параметрами, іноді скритого характеру. Нерівномірність фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, його анізотропія, велика глибина фрезерування, деформування і нагрівання, зміна різальної крайки зуба фрези, різні фізико-хімічні ефекти (налипання, окисні плівки тощо) появляються і зникають у процесі різання, і інші візуально непомітні фактори значно відбиваються на стійкості різального інструменту – нестабільність матеріалу інструменту, термічної обробки і заточки інструменту, його неконтрольовані параметри (мікрогеометрія різальної крайки, радіус її заокруглення), зміна зони жорсткості у зв'язку з режимами роботи верстата – все це у великій мірі впливає на стійкість інструменту, а в кінцевому результаті – на продуктивність.

Питаннями оброблення глибоких пазів і стійкості інструменту присвячені роботи багатьох вчених і технологів [1, 2, 3, 4], однак низка питань залишається невирішеною і потребує подальших досліджень. Це стосується фрезерування тонких глибоких пазів, де є проблеми, зв'язані з нагріванням різального інструменту, труднощами подачі охолоджувальної рідини, налипанням стружки на інструмент, контролю різальних параметрів інструменту і його стійкості в процесі роботи. Стаття розкриває результати проведених досліджень стійкості фрез в процесі контурного

фрезерування глибоких пазів у рамках Постанови Кабінету Міністрів України “Про розвиток сільськогосподарського машинобудування і забезпечення агропромислового комплексу конкурентоздатною технікою” на 2003-2007 роки.

Характерною особливістю пазів в дисках висівного апарата є та, що він розміщений по периферії диска з параметрами: ширина кругового паза $b=1$ мм, глибина $h=10$ мм, зовнішній діаметр $d=100$ мм. Даний круговий паз можна віднести до глибоких пазів, оскільки відношення глибини паза до його ширини складає $h/b=10$. Технологічний процес оброблення даного паза передбачає його контурне фрезерування на вертикально-фрезерному верстаті з ЧПК мілкозубою дисковою фрезою $\Phi 63 \times 1$ у спеціальній пристрої за спеціальною програмою. Параметри кругового паза і схема контурного фрезерування наведені на рис. 1.

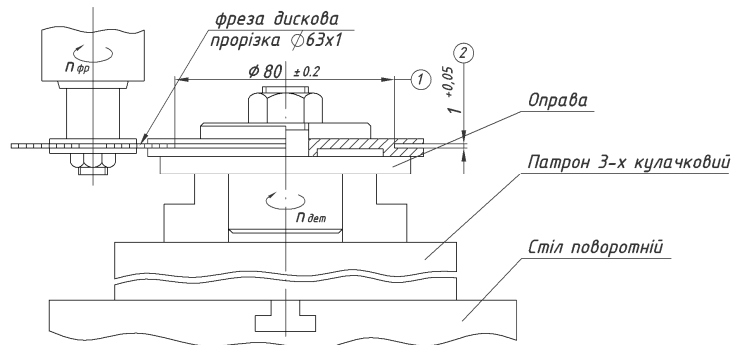


Рисунок 1 – Параметри кругового паза і схема контурного фрезерування

Експеримент проводимо за методикою, розробленою проф. Боксом при вивченні оптимізації процесів хімічної технології і в 1964 році застосованого для випробування стійкості різального інструменту [3]. Він має назву «метод оптимального планування». Для експериментального визначення стійкості мілкозубих дискових фрез для контурного фрезерування пазів дисків висівного апарата створюється математична модель, яка описує поведінку даної організованої системи. Вона дає представлення про поведінку даної системи із зміною ряду факторів і створюється на основі досліджень.

Для визначення стійкості інструменту використовуємо математичну модель зміни стійкості.

Зміна стійкості інструменту T залежно від швидкості різання v , подачі s і глибини різання t визначається математичною моделлю [3]:

$$T^m = C v s_z^p t^q \quad (1)$$

У даній залежності приймаємо T – залежна і v, s_z, t – незалежні змінні.

Треба зауважити: математична модель не описує систему в цілому, а лише окремий комплекс факторів, які нас цікавлять.

В логарифмічному масштабі рівняння буде поліномом першого степеня:

$$\ln T = \frac{\ln C}{m} + \frac{1}{m} \ln v + \frac{q}{m} \ln s_z + \frac{q}{m} \ln t$$

або, враховуючи помилки експерименту ε ,

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \varepsilon \quad (2)$$

Експеримент плануємо на основі багатофакторного аналізу, тобто одночасно варіюємо усі змінні фактори, $x_1(v), x_2(s_z), x_3(t)$. Необхідно визначити постійну b_0 і коефіцієнти b_1, b_2, b_3 . Кожна із цих змінних варіюється на двох рівнях (2^k), де k – число змінних.

Дослідження стійкості фрези проводимо на широкоуніверсальному фрезерному верстаті моделі 6P82Ш, як це зображено на рис. 2. Швидкість різання досліджуємо для 20, 35, 50 м/хв., що відповідає обертам фрези 100, 175, 250 об/хв. відповідно; подачу на

зуб фрези використовуємо 0,005, 0,01, 0,015 мм/зуб; глибину фрезерування – 1, 5, 10 мм.

План дванадцяти дослідів передбачає дві серії по шість дослідів у кожній – шість основних і шість додаткових. Вибір режимів обробки проводиться таким чином, щоб спростити кодування із врахуванням можливостей обладнання і граничних режимів обробки, як це показано в табл. 1.

Таблиця 1 – Режими різання і кодові позначення

Рівень	Режими різання			Кодові позначення		
	v м/хв.	s_z мм/зуб	t мм	x_1	x_2	x_3
Верхній	50	0,015	10	1	1	1
Середній	35	0,01	5	0	0	0
Нижній	20	0,005	1	-1	-1	-1



Рисунок 2 – Дослідження стійкості фрези

Ці рівні закодовані за допомогою рівнів перетворення таким чином, щоб верхній відповідав +1, а нижній -1.

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{2(\ln v - \ln 50)}{(\ln 50 - \ln 20)} + 1 \\ x_2 &= \frac{2(\ln s_z - \ln 0,015)}{(\ln 0,015 - \ln 0,005)} + 1 \\ x_3 &= \frac{2(\ln t - \ln 10)}{(\ln 10 - \ln 1)} + 1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Тут, в плані експерименту, наприклад, за одиницю швидкості фрезерування прийнята величина $\frac{\ln 50 - \ln 20}{2}$. Таким чином, швидкість фрезерування v перетворюється шляхом ділення її на прийняту одиницю.

Аналогічно поступаємо з подачею s_z і глибиною різання t . Для спрощення розрахунків композиційний план будується відповідно до так званого “італійського куба” [3], побудованого на трьох ортогональних координатах з початком в центрі куба (рис. 3). На вершинах куба позначені номери дослідів і режимів фрезерування згідно з таблицею 2.

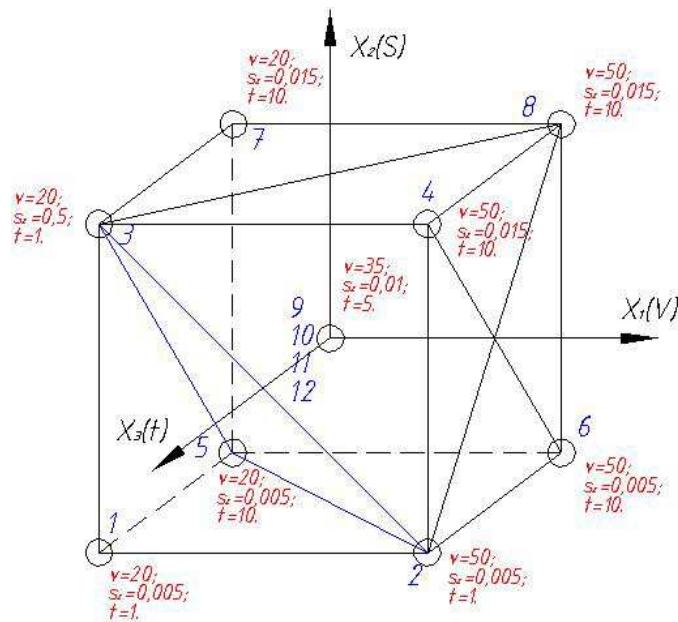


Рисунок 3 – Композиційний план дослідження згідно з “італійським кубом”

Таблиця 2 – Режими різання, кодові значення і стійкість фрези

№ п/ п	№ серії	Режими різання			Кодові позначення			T, хв.	y=lnT
		v, м/хв.	s _z ,мм/зуб	t, мм	x ₁	x ₂	x ₃		
1	2	20	0,005	1	-1	-1	-1	180	5,19
2	1	50	0,005	1	1	-1	-1	120	4,79
3	1	20	0,015	1	-1	1	-1	140	4,94
4	2	50	0,015	1	1	1	-1	90	4,50
5	1	20	0,005	10	-1	-1	1	70	4,25
6	2	50	0,005	10	1	-1	1	50	3,91
7	2	20	0,015	10	-1	1	1	40	3,69
8	1	50	0,015	10	1	1	1	25	3,22
9	1	35	0,01	5	0	0	0	80	4,38
10	1	35	0,01	5	0	0	0	90	4,50
11	2	35	0,01	5	0	0	0	80	4,38
12	2	35	0,01	5	0	0	0	90	4,50

Дослідні точки позначені темними кружками згідно з першими чотирма дослідями; додатково два досліді ставляться в центрі куба для перевірки гіпотези адекватності (досліді 9 і 10). Якщо гіпотеза адекватності не проходить, виконуємо ще шість дослідів: добудовуються ще вершини куба (позначені кружками) і ще два досліді в центрі.

В таблиці 2 наводяться результати 12 дослідів з кругового фрезерування сталі 40Х дисковою прорізною фрезою $\Phi 63 \times 1$ із швидкорізальної сталі Р6М5 з використанням мастильно-охолоджувальної рідини – емульсія 5%. За критерій затуплення фрези прийнята фаска по задній поверхні фрези $h_3 = 0,5$ мм.

Оцінка параметрів.

На основі результатів серії №1 із шести дослідів зручно оцінити чотири коефіцієнти в емпіричній формулі

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3,$$

використовуючи метод найменших квадратів і властивості скалярного добутку основних векторів.

Згідно зі способом найменших квадратів, необхідно, щоб сума квадратів

відхилень фактичних значень y від формальних, отриманих за рівнянням (3) $y_{x_1x_2x_3}$, була найменшою, тобто:

$$\Sigma(y - y_{x_1x_2x_3})^2 = \min \quad (4)$$

Ліву частину виразу (4) позначимо буквою f (f – функція від невідомих параметрів b_0, b_1, b_2, b_3).

Мінімум цієї функції знайдемо із рівнянь:

$$\frac{df}{db_0} = 0; \quad \frac{df}{db_1} = 0; \quad \frac{df}{db_2} = 0; \quad \frac{df}{db_3} = 0. \quad (5)$$

Продиференціювавши, напишемо систему цих рівнянь у кінцевому вигляді:

$$\begin{aligned} \Sigma y &= nb_0 + b_1 \Sigma x_2 + b_2 \Sigma x_2 + b_3 \Sigma x_3; \\ \Sigma yx_1 &= b_0 \Sigma x_1 + b_1 \Sigma x_1^2 + b_2 \Sigma x_1x_2 + b_3 \Sigma x_1x_3; \\ \Sigma yx_2 &= b_0 \Sigma x_2 + b_1 \Sigma x_2x_1 + b_2 \Sigma x_2^2 + b_3 \Sigma x_2x_3; \\ \Sigma yx_3 &= b_0 \Sigma x_3 + b_1 \Sigma x_3x_1 + b_2 \Sigma x_3x_2 + b_3 \Sigma x_3^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Рівняння (6) дають можливість визначити $b_0 = \frac{\Sigma y}{n}$, де n – число дослідів; $n = 6$.

$$b_1 = \frac{\Sigma yx_1}{\Sigma x_1^2} = \frac{\Sigma yx_1}{4}; \quad b_2 = \frac{\Sigma yx_2}{\Sigma x_2^2} = \frac{\Sigma yx_2}{4}; \quad b_3 = \frac{\Sigma yx_3}{\Sigma x_3^2} = \frac{\Sigma yx_3}{4}. \quad (7)$$

Необхідно додати, що інші члени рівнянь (6) будуть рівні нулю, оскільки вектори x_1, x_2, x_3 є ортогональними і $\Sigma x_i = 0$.

Очевидно, було б простіше не вирішувати рівнянь (4) – (6), а використати матриці $(x'x)$ і $(x'x)^{-1}$:

$$x'x = \begin{vmatrix} 6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 \end{vmatrix}, \quad (x'x)^{-1} = \begin{vmatrix} \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{4} \end{vmatrix}.$$

Залежності для визначення коефіцієнтів $b_0...b_3$ відповідно до рівнянь (7) будуть мати вигляд:

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= 1/6(y_2 + y_3 + y_5 + y_8 + y_9 + y_{10}) \\ b_1 &= 1/4(y_2 - y_3 - y_5 + y_8) \\ b_2 &= 1/4(-y_2 + y_3 - y_5 + y_8) \\ b_3 &= 1/4(-y_2 - y_3 + y_5 + y_8) \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Тут індекси при y визначають номери дослідів (табл. 2).

Підставляючи в останні рівняння (8) значення дослідів із таблиці 2, отримаємо:

$$b_0 = \frac{1}{6}(4,79 + 4,94 + 4,25 + 3,22 + 4,38 + 4,50) = 4,35;$$

$$b_1 = \frac{1}{4}(4,79 - 4,94 - 4,25 + 3,22) = -0,3;$$

$$b_2 = \frac{1}{4}(-4,79 + 4,94 - 4,25 + 3,22) = -0,22;$$

$$b_3 = \frac{1}{4}(-4,79 - 4,94 + 4,25 + 3,22) = -0,57.$$

У цьому випадку для серії дослідів №1 отримаємо формулу для визначення стійкості прорізних фрез:

$$\ln T \approx 4,35 - 0,3x_1 - 0,22x_2 - 0,57x_3. \quad (9)$$

Формулу (9) необхідно розшифрувати згідно з рівняннями (3), тобто:

$$x_1 = \frac{2(\ln v - \ln 50)}{\ln 50 - \ln 20} + 1 \approx \frac{2(\ln v - 3,91)}{3,91 - 3,00} + 1 = 2,198 \ln v - 7,59;$$

$$x_2 = \frac{2(\ln s_z - \ln 0,015)}{\ln 0,015 - \ln 0,005} + 1 \approx \frac{2(\ln s_z + 4,2)}{-4,2 + 5,3} + 1 = 1,82 \ln s_z + 8,64;$$

$$x_3 = \frac{2(\ln t - \ln 10)}{\ln 10 - \ln 1} + 1 \approx \frac{2(\ln t - 2,30)}{2,3 - 0} + 1 = 0,87 \ln t - 1,00.$$

Підставляємо значення x_1 , x_2 , x_3 в рівняння (9) і отримаємо уточнену формулу для визначення логарифма стійкості фрези:

$$\begin{aligned} \ln T &= 4,35 - 0,3(2,198 \ln v - 7,59) - 0,22(1,82 \ln s_z + 8,64) - \\ &- 0,57(0,87 \ln t - 1,00) = 5,30 - 0,66 \ln v - 0,40 \ln s_z - 0,50 \ln t. \end{aligned}$$

Отже, кінцева формула для визначення стійкості фрези для контурного фрезерування кругового паза диска висівного апарата прийме вигляд:

$$T = \frac{e^{5,3}}{v^{0,66} s_z^{0,4} t^{0,5}} = \frac{200}{v^{0,66} s_z^{0,4} t^{0,5}}, \text{ хв.} \quad (10)$$

Після статистичного аналізу результатів серії №1, коли виявилися сильно великі інтервали стійкості для 95% достовірності, були виконані ще шість дослідів серії №2 досліджень.

В результаті всіх 12 дослідів відповідно до вищенаведених розрахунків і таблиці 2, отримаємо уточнені коефіцієнти для визначення стійкості фрези:

$$b_0 = \frac{1}{12} \left(5,19 + 4,79 + 4,94 + 4,50 + 4,25 + 3,91 + 3,69 + 3,22 + 4,38 + \right. \\ \left. + 4,50 + 4,38 + 4,50 \right) = 4,35;$$

$$b_1 = \frac{1}{8} (-5,19 + 4,79 - 4,94 + 4,50 - 4,25 + 3,91 - 3,69 + 3,22) = -0,21;$$

$$b_2 = \frac{1}{8} (-5,19 - 4,79 + 4,94 + 4,50 - 4,25 - 3,91 + 3,69 + 3,22) = -0,22;$$

$$b_3 = \frac{1}{8} (-5,19 - 4,79 - 4,94 - 4,50 + 4,25 + 3,91 + 3,69 + 3,22) = -0,54.$$

$$\begin{aligned} \ln T &= 4,35 - 0,21(2,198 \ln v - 7,59) - 0,22(1,82 \ln s_z + 8,64) - \\ &- 0,54(0,87 \ln t - 1,00) = 4,58 - 0,46 \ln v - 0,4 \ln s_z - 0,47 \ln t \end{aligned}$$

$$T = \frac{e^{4,58}}{v^{0,46} s_z^{0,4} t^{0,47}} = \frac{97,5}{v^{0,46} s_z^{0,4} t^{0,47}}, \text{ хв.} \quad (11)$$

Порівняння стійкості фрези, обчисленої за формулами (10) і (11) для режимів різання [3]: $v=20$ м/хв., $s_z=0,1$ мм/зуб, $t=10$ мм з метою оцінки уточнення після проведення додаткової серії уточнюючих досліджень, показують, що уточнення становить 5,9%.

Для даної технологічної операції оброблення кругового паза в диску висівного апарата глибиною $t=10$ мм, де передбачено використання фрези $\Phi 63*1$, у якої кількість зубів $z=48$, а верстат передбачає встановлення кількості обертів фрези $n=1000v/\pi d$ і хвилинної подачі $s_M=s_z z n$, формула стійкості фрези (11), після відповідних математичних підставлень і розрахунків, буде мати вигляд:

$$T = \frac{327}{n^{0,06} \cdot s_M^{0,4}}, \text{ хв.}$$

Аналіз формули (11) показує, що результат обчислення мало відрізняється від результату, отриманого за формулою (10), але 95-процентні довірчі інтервали значно покращилися завдяки більшій кількості дослідів.

Графічну залежність стійкості фрези від швидкості різання наведено на рис.3.

Графічна залежність (рис. 3а) показує зміну стійкості фрези від швидкості різання. Побудувавши графік $T - v$ в логарифмічних координатах (рис. 3б), можна виразити залежність стійкості від швидкості різання:

$$T = \frac{C_T}{v^{1/m}},$$

де C_T – постійна, що залежить від матеріалу виробу, фрези, подачі, глибини різання тощо; $1/m$ - ступінь відносної стійкості, рівна тангенсу нахилу прямої в логарифмічних координатах.

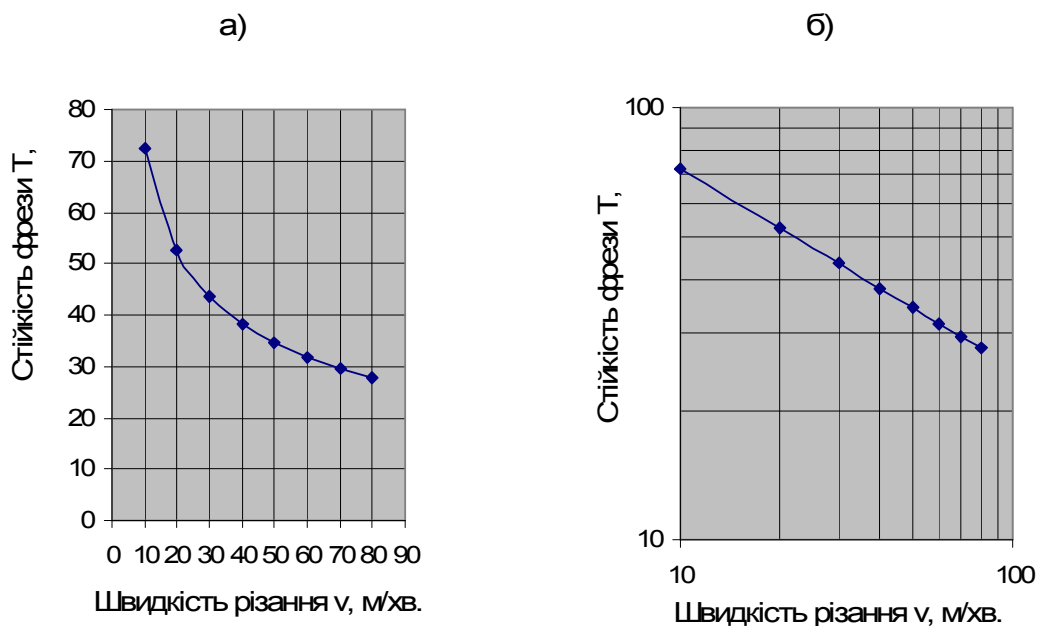


Рисунок 3 – Залежність стійкості фрези від швидкості різання (а); те ж в логарифмічних координатах (б)

Величина $1/m$ має велике практичне значення. Вона показує, наскільки інтенсивно змінюється стійкість інструменту із зміною швидкості різання.

Висновки

1. Метод оптимального планування, який передбачає проведення багатofакторного аналізу, прискорює і здешевлює дослідження, хоч при цьому і ускладнюється обробка даних.
2. Незалежні змінні (швидкість різання, подача на зуб фрези, глибина різання) при фрезеруванні в дійсності є сильно корельованими величинами, закономірно зв'язаними між собою.

Література

1. Родин П.Р. Основы формообразования поверхностей резанием. – К.: Вища школа, 1977. – 191с.
2. Аршинов В.А., Алексеев Г.А. Резание металлов и режущий инструмент. – М.: Машиностроение, 1976. – 440с.
3. Вульф А.М. Резание металлов. Изд-ние 2-е. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1973. – 496 с.

4. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с., ил.

Одержано 03.10.2007 р.