

Дослідження за актуальними проблемами інженерно-технічного забезпечення АПК

УДК 631.354.2.026.001.5

Кравчук В., д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НААН України, Занько М., канд. техн. наук (УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого)

Моделювання якості роботи зернозбирального комбайна

Проведено багатофакторні експериментальні дослідження показника «дроблення зерна» зернозбирального комбайна класичного типу та побудовано багатофакторні математичні і графічні моделі. Проведено аналіз пошкодження зерна в залежності від технологічного режиму та умов роботи молотарки.

Ключові слова: моделювання, зернозбиральний комбайн, якість роботи, багатофакторний експеримент.

Суть проблеми. Одним з найважливіших оцінних показників якості технологічного процесу зернозбирального комбайна, що визначає якість отриманого зерна, є ступінь його механічного пошкодження, тобто наявність дробленого зерна. Цей показник має становити не більше ніж 2,0%, проте, як свідчать дослідження, його величина досягає 5,0% [1] і більше [2], що негативно впливає на ефективність систем молотарки та їх оцінку. В особливій мірі це стосується системи очищення зерна: наявність в ній значної кількості дробленого зерна «перевантажує» її, негативно впливає на якість готового зерна в бункері та на загальний рівень втрат за комбайном [3, 4]. Внаслідок цього об'єктивність визначення важливого показника призначення – номінальної продуктивності комбайна знижується. Поліпшити якість зерна і зменшити при цьому втрати можна за рахунок обґрунтованого зменшення кількості дробленого зерна. Одним із можливих варіантів досягнення такого результату є оптимізація технологічних режимів обмолоту технологічної культури в молотарці в залежності від умов її роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання цієї проблеми. Оцінні показники роботи зернозбирального комбайна, зокрема – за якістю зерна, є ключовими під час проведення державних приймальних випробувань з метою поставлення його на виробництво. Окрім того, значна кількість дробленого зерна є свідченням неоптимального режиму роботи молотильно-сепарувальної системи (МСС) та всього комбайна. Механічно пошкоджене зерно в комбайні є наслідком функціонування всіх його систем, де воно з боку робочих органів зазнає жорсткої дії у вигляді численних ударів та тертя. Однак, дослідження свідчать, що в основному зерно зазнає пошкодження під час обмолоту в МСС. Основні фактори, що визначають ступінь пошкодження зерна, це режим обмолоту – технологічні зазори в МСС та частота обертання молотильного барабана [1, 4, 7]. До факторів, які визначають ці режими, першочергово відноситься вологість зерна.

Ефективність проведення багатофакторних досліджень такої складної системи, як «зернозбиральний комбайн», обумовлюється необхідністю використання для

цього наукових методів. Саме вони дозволяють поєднати у відповідні строги залежності оцінні показники та задіяну і враховану в експерименті множину факторів. Зробити об'єктивний аналіз впливу на ступінь пошкодження зерна можливо лише з урахуванням множини факторів, що впливають на цей процес, застосовуючи методи математичного моделювання [5, 6], які в XXI столітті отримали значний розвиток та ефективне використання у багатофакторних дослідженнях.

Мета дослідження – багатофакторне моделювання показника «дроблення зерна» в молотарці класичного типу, аналіз та оптимізація технологічних режимів обмолоту технологічної культури в молотильно-сепарувальній системі в залежності від умов її роботи.

Виклад основного матеріалу. Зерно зазнає макропошкоджень на всіх ділянках руху в комбайні, але основна кількість дробленого зерна формується в МСС, оскільки саме тут під час обмолоту та сепарації воно зазнає жорсткої дії зі сторони молотильного барабана та молотильно-сепарувальної деки. Згідно з результатами досліджень [6, 7], показник дроблення зерна D можливо представити через модель загального вигляду:

$$D = f(X_i; Z_i; U_i), \quad (1)$$

де D – дроблення зерна, %; X_i ($i = 1, n$) – технічні параметри МСС; Z_i ($i = 1, m$) – агрофізичні характеристики хлібної маси; U_i ($i = 1, k$) – технологічні режими функціонування МСС.

З метою конкретизації показників X_i , Z_i і U_i залежності (1) проведено аналіз схеми технологічних потоків молотарки і ймовірної моделі формування функціональних та оцінних показників. У відповідності з ними за основний чинник впливу на рівень пошкодження зерна прийнято МСС. В основу досліджень показника D взято комплексний підхід, що полягає в дослідженні МСС як системи. Показник D виразимо через більш конкретизовану функціональну залежність, вхідними факторами якої є:

1) умови роботи (показником, що характеризує агрофізичний стан зерна, ступінь готовності до обмолоту і визначає його інтенсивність, є вологість зерна);

2) технологічні режими обмолоту: частота обертання молотильного барабана, зазори між барабаном і

сепарувальною декою на вході і виході технологічної маси в (з) МСС, подача хлібної маси в МСС;

3) технічні параметри (зокрема діаметр молотильного барабана, що визначає параметри сепарувальної деки, час обмолоту в МСС, технологічні зазори в МСС і частоту обертання барабана).

З урахуванням зазначених факторів модель формування показника дроблення зерна матиме загальний вигляд:

$$D = f(W_3; n; D_0; D_1; Q, d), \quad (2)$$

де W_3 – вологість зерна, %; n – частота обертання молотильного барабана, об./хв; D_0 – технологічний зазор входу маси в МСС, мм; D_1 – технологічний зазор виходу маси із МСС, мм; d – діаметр молотильного барабана, мм.

В основу досліджень залежності (2) покладено активний експеримент, проведений в польових умовах, з визначення показника D МСС, молотильний барабан якої становить 600 мм. У відповідності з методом синтезу дослідження показника дроблення зерна проведено під час функціонування МСС у складі молотарки комбайна класичного типу. Режим роботи комбайна – пряме комбайнування озимої пшениці з урожайністю зерна 45,0 ц/га. Базові параметри досліджуваної МСС – діаметр барабана і технологічний режим обмолоту знаходяться на рівні аналогічних параметрів молотарок великої групи комбайнів. Це дозволяє виключити даний показник з групи досліджуваних факторів і тим самим в певній мірі оптимізувати план експерименту. Подача і обмолот хлібної маси – тангенціальні відносно положення барабана і МСС. Дослідження проводили в польових умовах протягом кількох днів на одній ділянці. Вологість зерна, в процесі його природного висихання, поступово зменшилась з 25,0 до 9,3%. Такий діапазон вологості зерна є характерним для комбайнового збирання хлібів і відповідає нормативним вимогам. Вагове співвідношення зерна і соломи в процесі досліджень залишалось незмінним. Коефіцієнт варіації з урожайності зерна не перевищував 5,0 %. План зміни технологічних режимів МСС – D_0 , D_1 , W_3 і n , – наведено в табл. 1.

Під час реалізації кожного досліду в МСС встановлювались відповідні режими: оберти барабана – з допомогою тахометра типу ТЧ-10Р, технологічні зазори – за допомогою уніфікованих стандартизованих шаблонів (“щупів”). Після контрольного проходу комбайном дослідної ділянки з робочою швидкістю, що забезпечувала оптимальну подачу хлібної маси в МСС у відповідності з проектною пропускною здатністю молотарки ($q = 7,0$ кг/с) комбайна, з бункера відібрали пробу зерна та оцінили його пошкодження (дроблення).

Аналіз отриманих експериментальних даних (табл. 1) свідчить, що вологість зерна впливає на якість обмолоту і є основним фактором, який визначає технологічний режим роботи молотильно-сепарувальної системи. На всіх допустимих технологічних режимах роботи МСС (з урахуванням зазорів, обертів барабана) зерно максимально допустимої для обмолоту вологості ($W_3 = 18,0\%$) пошкоджується менше – дроблення становить 0,2-0,6%, а сухе зерно ($W_3 = 10\%$) пошкоджується більше ($D = 2,3-5,1\%$). Зменшенню дроблення

Таблиця 1

План багатофакторного експерименту і результати досліджень дроблення зерна (фрагмент)

№ дослід-ду	Технологічні режими та умови роботи МСС				Якість зерна $D, \%$
	$n, \text{об./хв}$	$W_3, \%$	$D_0, \text{мм}$	$D_1, \text{мм}$	
	x_1	x_2	x_3	x_4	
1	1080	25,0	14	2	0,52
2	980	25,0	14	2	0,35
3	880	25,0	14	2	0,32
4	780	24,9	14	2	0,24
5	780	24,5	16	4	0,38
-	-	-	-	-	-
67	780	9,9	18	6	2,36
68	780	10,0	20	8	2,22
69	880	10,2	20	8	2,84
70	980	9,8	20	8	3,24
71	1080	9,3	20	8	5,14

зерна сприяє “м’який” режим обмолоту, за якого оберти барабана не перевищують 900 об./хв.

За результатами експериментальних досліджень (табл. 1) розроблено багатофакторну математичну модель, яка ідентифікує технологічний процес МСС за показником дроблення зерна. До її складу увійшли показники W_3 , D_0 , n і D_1 з різними коефіцієнтами:

$$D = 0,3746n^{2*}10^{-5} - 2,4344W_3/D_0 - 0,2099nD_0 \cdot 10^{-3} - 0,1055 \cdot 10^6 / (nW_3) - 0,02583W_3 + 916,8118/W_3^2 + 228,6734 / (nD_1) + 7120,8921/n. \quad (3)$$

Оцінку адекватності моделі (3) проведено із застосуванням критерію Фішера (F), який співставляє дисперсію дослідів та дисперсію апроксимації. Отримано: $F_p \leq F_{0,05}$ (при $F_p = 1,06$ і $F_{0,05} = 1,53$), тому модель (2) є адекватною результатам експерименту з імовірністю 0,95.

Для дослідження впливу вологості зерна, величини зазорів в МСС та частоти обертання барабана на дроблення зерна функціональна залежність (2) за допомогою прикладної програми реалізована в графічні багатофакторні залежності (рис. 1-5).

Аналіз графічних залежностей (рис. 1) свідчить:

1) збільшення частоти обертання барабана в характерному для даного типу МСС діапазоні частоти обертання 780-1080 об./хв за сталої вологості зерна обумовлює збільшення пошкодження зерна (ця закономірність пояснюється з позиції збільшення кінетичної

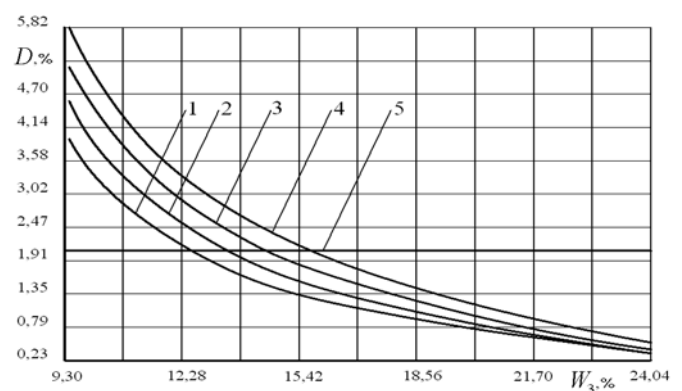


Рис. 1 – Залежність дроблення зерна від його вологості та частоти обертання барабана (при $D_0 = 15$ мм і $D_1 = 5$ мм) – $D = f(W_3; n)$, де 1 – $n = 780$ об./хв., 2 – $n = 880$ об./хв., 3 – $n = 980$ об./хв., 4 – $n = 1080$ об./хв., 5 – допустиме дроблення зерна (2%)

енергії удару барабаном, що передається на зерно для відокремлення з колосу, внаслідок чого пошкодження зерна зростає);

2) за сталої частоти обертання барабана (в діапазоні 780-1080 об./хв) пошкодження зерна зменшується із збільшенням його вологості до величини, що допустима для обмолоту (18,0%) і навпаки;

3) нижня межа вологості зерна під час роботи МСС в "м'якому" режимі ($n = 780$ об./хв) становить 12,0%. Більш "жорсткий" режим обмолоту ($n = 880-1080$ об./хв) прийнятний для обмолоту зерна вологістю до 16,0%.

Інтенсивність обмолоту характеризується також величиною технологічних зазорів в МСС. Їх збільшення передбачено при збільшенні подачі технологічного вороху в молотарку. Кількість технологічної маси в зоні "молотильно-сепарувальна дека – біла молотильного барабана" при цьому збільшується. Умови сприйняття зерном, яке знаходиться в товщі технологічної маси, удару зі сторони біла й інтенсивність сепарації зерна через решітку деки та виходу грубого вороху з МСС – змінюються.

Графічне моделювання дроблення зерна в залежності від його вологості проведено також при фіксованих значеннях показників n , D_0 і D_1 (рис. 2). Аналіз свідчить, що відносно "м'який" і часто застосовуваний режим обмолоту в комбайнах класичного типу ($n = 900$ об./хв, $D_0 = 16$ мм, $D_1 = 5$ мм) забезпечує допустимий рівень дроблення зерна: при $W_3 = 14,0\%$ він не перевищує 2,0%.

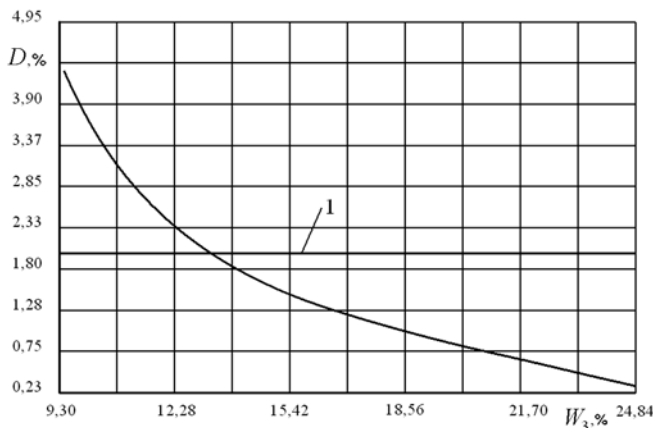


Рис. 2 – Залежність дроблення зерна від його вологості – $D = f(W_3; D_1)$: 1 – максимально допустиме дроблення зерна ($D = 2,0\%$)

Однозначно встановлено, що збільшення вихідного зазору в МСС з 2 до 8 мм (рис. 3) при $W_3 = 14,0\%$, $D_0 = 16$ мм і тим самим "пом'якшення" режиму перебігу технологічних процесів в МСС дозволяє зменшити пошкодження зерна.

Вхідний зазор в МСС за величиною значно перевищує вихідний. Його величина продиктована технологічними вимогами до оптимальності умов і ефективності процесів обмолоту та основної сепарації зерна. Аналіз впливу величини вхідного в МСС зазору на ступінь пошкодження зерна свідчить (рис. 4: при $W_3 = 16\%$, $D_0 = 5$ мм і $n = 900$ об./хв), що збільшення його з 12 до 20

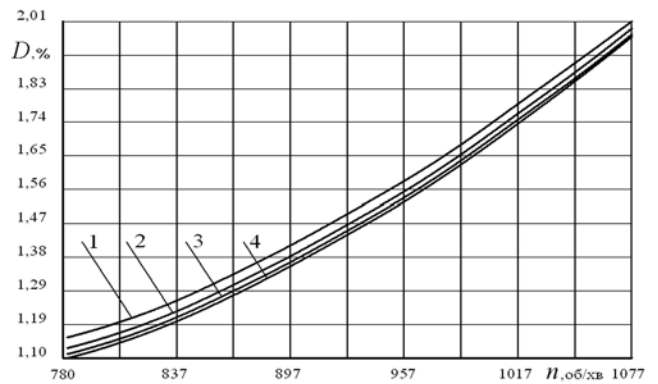


Рис. 3 – Залежність дроблення зерна від частоти обертання молотильного барабана і величини вихідного зазору в МСС (при $W_3 = 16\%$ і $D_0 = 16$ мм) – $D = f(n; D_1)$,

де 1 – $D_1 = 2$ мм; 2 – $D_1 = 4$ мм; 3 – $D_1 = 6$ мм; 4 – $D_1 = 8$ мм

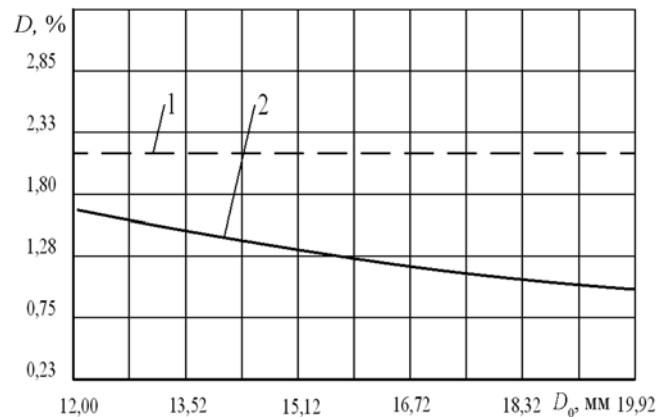


Рис. 4 – Залежність дроблення зерна від вхідного зазору в МСС (при $W_3 = 16\%$, $D_1 = 5$ мм і $n = 900$ об./хв),

де 1 – максимально допустимий рівень дроблення зерна ($D = 2,0\%$), 2 – $D = f(D_0)$

мм дозволяє зменшити дроблення зерна майже в два рази (з 1,70 до 0,85%).

Порівняно сухе зерно ($W_3 = 9,3\%$, рис. 5), навіть при "м'яких" зазорах в МСС – $D_0 = 16$ мм, $D_1 = 5$ мм суттєво реагує на збільшення інтенсивності обмолоту: із збільшенням частоти обертання барабана з 780 до 1080 об./хв пошкодження зростає вдвічі – з 1,5 до 3,0%.

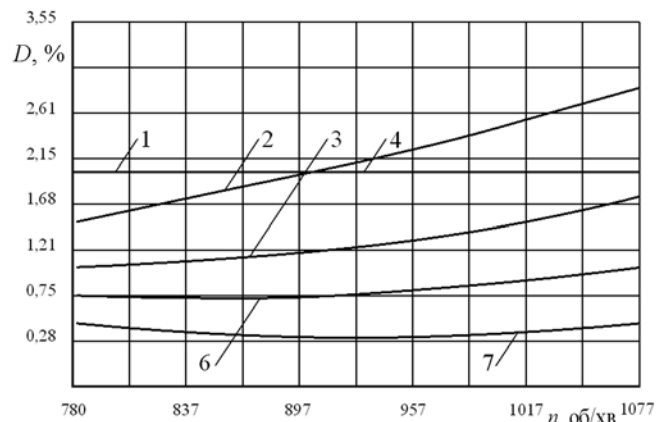


Рис. 5 – Залежність дроблення зерна від частоти обертання барабана і вологості зерна – $D = f(n; W_3)$, де 1, 4 – максимально допустимий рівень дроблення зерна (2,0%);

2 – $W_3 = 9,3\%$; 3 – $W_3 = 14,5\%$; 6 – $W_3 = 19,8\%$; 7 – $W_3 = 25\%$

Майже не реагує на зміну величини показника n зерно вологістю 14,0-18,0%. Це проявляється в незначному зростанні кількості пошкодженого зерна ($D = 0,75-1,68\%$) в широкому діапазоні значень показника n .

Важливим фактором створення сприятливих технологічних умов для обмолоту зерна із колосу є інтенсивність подачі хлібної маси на обмолот. Для оцінювання впливу її величини на дроблення зерна, у відповідності з результатами експериментальних досліджень, побудовано математичну (5) і на її основі – графічну (рис. 6) моделі показника D :

$$D = 267,8199/(Q \cdot D_0) - 49,29 \cdot 106/n^2 + 82,56 \cdot 10^4/(n \cdot D_0) - 8,9767/D_1 + 38828,8008/n + 0,03142 \cdot n - 42,432/(Q \cdot D_1) - 1,1896/D_0, \quad (5)$$

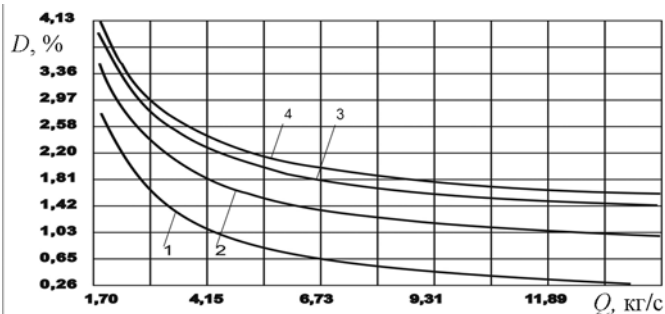


Рис. 6 – Залежність дроблення зерна від подачі технологічної маси в МСС та частоти обертання барабана: $D = f(Q; n)$, де 1 – $n = 800$ об./хв, 2 – $n = 835$ об./хв, 3 – $n = 870$ об./хв, 4 – $n = 910$ об./хв

Однаковість дисперсій двох сукупностей даних показника D – експериментальних і розрахункових згідно з математичною моделлю (3) – проведено із застосуванням критерію Фішера. Отримано: $F_p \leq F_{0,05}$ (при $F_p = 1,11$ і $F_{0,05} = 1,38$), тому вона є адекватною результатам експерименту з імовірністю 0,95.

Аналіз графічної залежності $D = f(Q; n)$ (рис. 6) додатково підтверджує, що збільшення частоти обертання барабана спричиняє збільшення дроблення зерна. При $n = 910$ об./хв і подачі хлібної маси, більшої за 6,0 кг/с, можна отримати зерно встановленої якості за кількістю дробленого.

Отримання зерна, яке за рівнем дроблення відповідає вимогам, можливо під час роботи МСС в технологічному режимі, який обумовлюється вологістю зерна 14%. У відповідності з цим результатом таку вологість доцільно прийняти як нормальну.

За вологості зерна 14% і його дроблення до 2,0% частота обертання барабана повинна становити 780-950 об./хв (див. рис. 1). Такий режим обмолоту забезпечує подачу технологічної маси в молотарку і її пропускну здатність на рівні (6-8 кг/с), що є задовільним для класичної молотарки. Для попередження “недомолоту зерна” вихідний зазор повинен становити 5 мм (див. рис. 2). У відповідності з цим вихідний зазор становитиме 15-18 мм, що забезпечить “м’який” режим обмолоту хлібної маси в МСС.

Обмолот сухих хлібів (вологість зерна менша 10%) необхідно проводити з пониженою частотою обертання барабана до 800-850 об./хв (див. рис. 5).

“М’який” режим роботи МСС забезпечить вихідний зазор в 6-8 мм; вхідний зазор встановлюється рівним 20 мм.

При “м’яких” режимах роботи МСС за інтенсивністю обмолоту ($n = 900$ об./хв, $D_0 = 16$ мм) оптимальною є вологість зерна 13,0%.

Висновки.

1. Математична багатофакторна залежність (3), до складу якої входять показники вологості зерна, частоти обертання молотильного барабана та технологічні зазори в молотильно-сепарувальній системі, моделює показник «дроблення зерна» з достовірністю 0,95.

2. Графічні моделі, побудовані на базі математичної залежності (3), дозволяють визначити фактичний рівень дроблення зерна в зернозбиральному комбайні у відповідності з реальними умовами роботи та прийнятими при цьому оптимальними технологічними режимами.

3. Для забезпечення допустимого дроблення зерна – до 2,0% на збиранні зернових колосових культур з нормальною вологістю зерна 14% частота обертання молотильного барабана класичної молотарки повинна становити 800 об./хв, а вихідний зазор в МСС – 5 мм.

Список літератури

1. Пугачев А.Н. Повреждение зерна машинами. – М.: Колос, 1976. – С.146 – 205.
2. Недовесов В.І. Збирання хлібів на Україні // Пропозиція. – 1998. – №1. – С.20-21.
3. Пугачев А.Н. Потерям зерна – надёжный заслон: учебное пособие. – М.: Колос, 1981. – С. 70-75.
4. Машины для збирання зернових та технічних культур: посібник; за ред. В.І. Кравчука – Дослідницьке: УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. – 2009. – 296 с.
5. Осипов Н., Занько Н. Оптимизация режимов работы МСУ зерноуборочного комбайна // ISSN 0235-8573 // Тр-ры и с.х. машины. – 1997. – № 4. – С.24 -25.
6. Занько Н.Д. Функциональная схема молотилки зерноуборочного комбайна // Тракторы и сельхозмашины. – М.: Машиностроение. – 2010 г. – № 1. – С. 35-39.
7. Антоненко А. А. Исследование влияния подбаранья комбайна СК-5 на дробление зерна // Механизация работ в полеводстве. – Саратов: СаратовСХМ. – 1978. – С.47-52.

Аннотация. Проведены экспериментальные исследования показателя «дробление зерна» зерноуборочного комбайна классического типа и разработаны многофакторные математические и графические модели. Выполнен анализ повреждения зерна в зависимости от технологического режима и условий работы молотилки.

Summary. Multifactorial experimental studies of “crushing grain” indicator of classical type combine harvester are made and multifactor mathematical and graphical models are built. The analysis of grain damage, depending on the thresher technological mode and working conditions is made.