

УДК 621.3: 631.53.027.33

РУХ ЗЕРНОВОЇ МАСИ В КАМЕРІ ОБРОБКИ ПІД ДІЄЮ СИЛЬНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

О.М. Берека, доктор технічних наук

О.В. Науменко, аспірант

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Розглянуті фактори впливу на швидкість зернової маси в камері обробки та час її витоку, представлено встановлені залежності швидкості витоку та часу витоку зерна від кута відкриття затвора при витіканні під дією сили тяжіння та сильного електричного поля.

Зернова маса, швидкість витікання, час обробки, кут відкриття, сильне електричне поле.

Для знищення комах-шкідників у зерновій масі за допомогою сильного електричного поля (СЕП) (рис. 1) необхідно забезпечити ефективну дозу обробки. Основними складовими дози обробки є концентрація озону та час експозиції.

Концентрація озону залежить від напруженості електричного поля в зерновій масі, виду культури та вологості зерна [3, 8]. Час знаходження комах-шкідників в СЕП залежить від висоти камери обробки та швидкості руху зернової маси. В представленій установці (рис. 1) рух зернового матеріалу здійснюється під дією сили тяжіння, вібрації та СЕП. В попередніх роботах [4, 5] досліджувався рух зерна в камері під дією сили тяжіння та вібрації. Оскільки дія сильного електричного поля також впливає на швидкість витоку зерна з камери обробки, то необхідно визначити залежність швидкості та часу витоку зернової маси з камери обробки від напруженості сильного електричного поля.

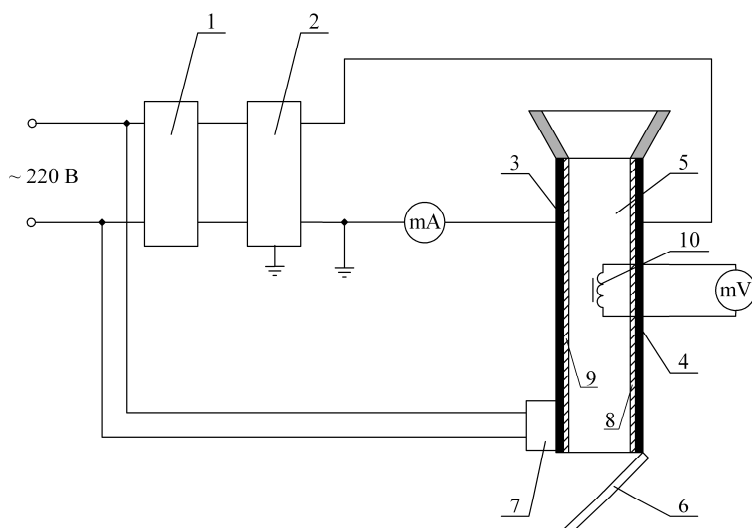


Рис. 1. Схема установки для знищення комах-шкідників у зерновій масі під дією СЕП:

1 – регулятор напруги; 2 – джерело високої напруги; 3, 4 – електроди; 5 – робоча камера; 6 – затвор витікання; 7 – електромагнітний вібратор; 8, 9 – ізоляційні пластини; 10 – індуктивний датчик.

Мета дослідження – теоретичне дослідження процесу витоку зерна під впливом сили тяжіння та сильного електричного поля і встановлення та практична перевірка залежності часу та швидкості витоку зерна від кута відкриття затвора витікання та напруженості електричного поля.

Матеріали і методика досліджень. Залежності швидкості та часу гравітаційного витоку зерна з камери обробки встановлено в попередній роботі [4]. Зокрема встановлено, що швидкість витікання з отвору камери залежить від тиску зернового матеріалу над отвором. Швидкість витоку зернової маси при гравітаційному витіканні з бокового отвору визначається за виразом:

$$v_{a-a} = \lambda \sqrt{\sin^2 \alpha + m \cos^2 \alpha} \sqrt{2g \left(\chi R_{a-a} - \frac{\tau_0}{g\rho f} \right)}, \quad (1)$$

де v_{a-a} – швидкість витоку з бокового отвору при гравітаційному витіканні, м/с; α – кут відкриття затвора (кут нахилу потоку зерна до горизонталі); R_{a-a} – гідравлічний радіус перерізу випускного отвору, м; m – коефіцієнт сипучості зернової маси, χ – коефіцієнт, що залежить від величини коефіцієнта внутрішнього тертя в зерновому матеріалі; f – коефіцієнт внутрішнього тертя

зернового матеріалу; τ_0 – початкова напруга зсуву, Н/м², ρ – насипна густина зерна, кг/м³; g – прискорення вільного падіння ($g = 9,81$ м/с²); λ – коефіцієнт витікання.

Витікання сипучих матеріалів в сильному електричному полі досліджувалося в Єреванському політехнічному інституті та Вірменському ННІ механізації та електрифікації сільського господарства [9, 10, 11, 12]. Ними встановлено, що швидкість витікання сипучого матеріалу визначається енергією взаємодії сильного електричного поля з сипучим матеріалом. В рамках положень механічної теорії електричного поля для сипучого матеріалу допускається припущення [10, 12]:

$$\tau_{0el} = \tau_0 + W, \quad (2)$$

де τ_{0el} – напруга початкового зсуву під дією СЕП, Н/м² W – середнє значення об'ємної густини енергії взаємодії сильного електричного поля з сипучим матеріалом, Дж/м³.

З урахуванням виразу (2) вираз (1) прийме вигляд:

$$v_{a-a} = \lambda \sqrt{\sin^2 \alpha + m \cdot \cos^2 \alpha} \sqrt{2g(\chi R_{a-a} - \frac{\tau_0 + W}{g\rho f})}, \quad (3)$$

Результати досліджень. В змінному електричному полі з напруженістю

$$e(t) = \sqrt{2}E \sin \omega t, \quad (4)$$

об'ємна густина енергії взаємодії електричного поля з сипучим матеріалом визначиться за виразом [10]:

$$W(t) = P(t)e(t), \quad (5)$$

де $W(t)$ – об'ємна густина енергії електричного поля, Дж/м³; $P(t)$ – поляризація сипучого матеріалу, Кл/м²; $e(t)$ – напруженість електричного поля в зерновій масі, В/м, E – діюче значення напруженості електричного поля в зерновій масі, В/м; ω – кутова частота електричного поля, рад/с.

При хаотичному розміщенні частинок з рівною ймовірністю будь-якого їх положення середня поляризація в напрямку, перпендикулярному напруженості поля, дорівнює нулю, а середня поляризація вздовж поля визначається формою частинок і може бути прийнята рівною [10]:

$$P(t) = \frac{1}{3} P_a(t) + \frac{2}{3} P_b(t), \quad (6)$$

де $P_a(t)$ – поляризація при орієнтації довгої осі a частинок вздовж поля, Кл/м²; $P_b(t)$ – поляризація при орієнтації меншої осі b частинок вздовж поля, Кл/м².

Відповідно і напруженість електричного поля в зерновій масі визначається орієнтацією частинок зерна в полі [2]:

$$e(t) = \frac{1}{3} e_a(t) + \frac{2}{3} e_b(t), \quad (7)$$

де $e_a(t)$ – напруженість електричного поля в частинках зерна при орієнтації всіх частинок довгою віссю a вздовж поля, В/м; $e_b(t)$ – напруженість електричного поля в частинках зерна при орієнтації всіх частинок короткою віссю b вздовж поля, В/м.

Для поляризації і напруженості спотвореного сипучим матеріалом електричного поля можна записати [10]:

$$P_a(t) = \sqrt{2} k_{1a} E \sin(\omega t - \psi_{1a}); \quad (8)$$

$$P_b(t) = \sqrt{2} k_{1b} E \sin(\omega t - \psi_{1b}); \quad (9)$$

$$e_a(t) = \sqrt{2} k_{2a} E \sin(\omega t - \psi_{2a}); \quad (10)$$

$$e_b(t) = \sqrt{2} k_{2b} E \sin(\omega t - \psi_{2b}), \quad (11)$$

де $k_{1a}, k_{1b}, k_{2a}, k_{2b}, \psi_{1a}, \psi_{1b}, \psi_{2a} = 0, \psi_{2b} = 0$ – коефіцієнти, що залежать від орієнтації частинок, їх форми і властивостей.

Підставивши вирази (6, 7) у (5) з урахуванням (8-11) отримаємо:

$$W(t) = \frac{2}{9} E^2 \sin \omega t (k_{1a} \sin(\omega t - \psi_{1a}) + 2k_{1b} \sin(\omega t - \psi_{1b}))(k_{2a} + 2k_{2b}). \quad (12)$$

Проінтегрувавши даний вираз по dt для середнього значення об'ємної густини змінного електричного поля за період T отримаємо

$$W = \frac{1}{9} E^2 (k_{2a} + 2k_{2b})(k_{1a} \cos \psi_{1a} + 2k_{1b} \cos \psi_{1b}). \quad (13)$$

Коефіцієнти $k_{1a}, k_{1b}, k_{2a}, k_{2b}, \psi_{1a}, \psi_{2b}$ визначаються відповідно до орієнтації частинок в полі:

$$k_{1a} = z_3 \varepsilon_n \sqrt{\frac{\gamma_3^2 + \omega^2 (\varepsilon_3 - \varepsilon_n)^2}{(\gamma_3 (1 - z_3) N_a)^2 + \omega^2 (\varepsilon_n + (\varepsilon_3 - \varepsilon_n)(1 - z_3) N_a)^2}} ; \quad (14)$$

$$k_{1b} = z_3 \varepsilon_n \sqrt{\frac{\gamma_3^2 + \omega^2 (\varepsilon_3 - \varepsilon_n)^2}{(\gamma_3 (1 - z_3) N_b)^2 + \omega^2 (\varepsilon_n + (\varepsilon_3 - \varepsilon_n)(1 - z_3) N_b)^2}} ; \quad (15)$$

$$k_{2a} = \sqrt{\frac{\gamma_3^2 + \omega_e^2 \varepsilon_3^2}{(\gamma_3 (1 - z_3) N_a)^2 + \omega_e^2 (\varepsilon_n + (\varepsilon_3 - \varepsilon_n)(1 - z_3) N_a)^2}} ; \quad (16)$$

$$k_{2b} = \sqrt{\frac{\gamma_3^2 + \omega^2 \varepsilon_3^2}{(\gamma_3 (1 - z_3) N_b)^2 + \omega^2 (\varepsilon_n + (\varepsilon_3 - \varepsilon_n)(1 - z_3) N_b)^2}} ; \quad (17)$$

$$\psi_{1a} = \arctg \frac{\omega \gamma_3 \varepsilon_n}{\gamma_3^2 (1 - z_3) N_a + \omega^2 (\varepsilon_n (\varepsilon_3 - \varepsilon_n) + (\varepsilon_3 - \varepsilon_n)^2 (1 - z_3) N_a)} ; \quad (18)$$

$$\psi_{1b} = \arctg \frac{\omega \gamma_3 \varepsilon_n}{\gamma_3^2 (1 - z_3) N_b + \omega^2 (\varepsilon_n (\varepsilon_3 - \varepsilon_n) + (\varepsilon_3 - \varepsilon_n)^2 (1 - z_3) N_b)} , \quad (19)$$

де ε_3 і ε_n – абсолютна діелектрична проникність відповідно частинок зерна та повітря, Ф/м; γ_3 – питома електропровідність частинок зерна, См/м; z_3 – нормована (відносна) об'ємна концентрація частинок сипучого матеріалу; N_a , N_b – коефіцієнт деполяризації еліпсоїдної частинки (залежить від орієнтації частинок).

Коефіцієнт деполяризації частинки вздовж великої осі a :

$$N_a = \frac{K^2}{\sqrt{(1 - K^2)^3}} (\operatorname{arth} \sqrt{1 - K^2} - \sqrt{1 - K^2}) , \quad (20)$$

де K – коефіцієнт сферичності еліпсоїдної частинки.

Коефіцієнт деполяризації вздовж малої осі b

$$N_b = \frac{K^2}{2(1 - K^2)} \left(\frac{1}{K^2} - \frac{\operatorname{arth} \sqrt{1 - K^2}}{\sqrt{1 - K^2}} \right) . \quad (21)$$

Коефіцієнт сферичності визначається як відношення меншої осі частинки до більшої, тобто:

$$K = \frac{b}{a} , \quad (22)$$

де a – довжина частинки зерна, b – ширина (товщина) частинки зерна.

Відносна діелектрична проникність зернової маси визначається за виразом В.І. Оделевського [13]:

$$\varepsilon = A + \sqrt{A^2 + \frac{\varepsilon_z \varepsilon_n}{2}}, \quad (23)$$

де ε_z – відносна діелектрична проникність зерна; ε_n – відносна діелектрична проникність повітря; A – коефіцієнт, що визначається за виразом

$$A = \frac{1}{4} [(3z_z - 1)\varepsilon_z + (3z_n - 1)\varepsilon_n], \quad (24)$$

де z_z – питомий об'єм маси зерен; z_n – питомий об'єм маси повітря (скважистість).

Для визначення напруженості електричного поля в шарі зерна розглянемо камеру обробки з ізоляційними пластинами на електродах (рис. 2).

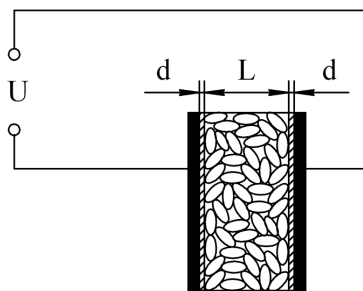


Рис. 2. Розрахункова схема обробки зерна в електричному полі при встановлених діелектричних пластинах

Камеру обробки можна визначити як двошаровий діелектрик, де є шар зерна з діелектричною проникністю ε і шириною L , і шар діелектричних пластин з діелектричною проникністю ε_{nl} товщиною $2d_{iz}$. Напруженість поля в зерновій масі визначиться за виразом

$$E = \varepsilon_{nl} \frac{U}{L\varepsilon_{nl} + 2d_{iz}\varepsilon}, \quad (25)$$

де E – напруженість електричного поля в шарі зерна, В/м; U – підведена напруга, В; ε_{nl} – відносна діелектрична проникність матеріалу діелектричної пластини; d_{iz} – товщина ізоляційної пластини, м.

З урахуванням вищевказаного швидкість витоку зерна v_{el} з отвору камери обробки під дією електричного поля визначиться за виразом, м/с:

$$v_{el} = \lambda \sqrt{\sin^2 \alpha + m \cos^2 \alpha} \sqrt{2g(\chi R_{a-a} - \frac{\tau_0 + \frac{\varepsilon_{nl}^2 U^2 (k_{2a} + 2k_{2b})(k_{1a} \cos \psi_{1a} + 2k_{1b} \cos \psi_{1b})}{9(L\varepsilon_{nl} + 2d_{i3}\varepsilon)^2}}{g\rho f})}, \quad (26)$$

де $k_{1a}, k_{1b}, k_{2a}, k_{2b}, \psi_{1a}, \psi_{1b}$ визначаються за виразами (14) – (19).

Пропускна здатність камери обробки під дією СЕП визначиться за виразом:

$$q_{el} = v_{el} S_{a-a}, \quad (27)$$

де q_{el} – продуктивність камери обробки, м³/с; S_{a-a} – площа випускного вікна, м²:

$$S_{a-a} = XL, \quad (28)$$

де X, L – розміри камери: відповідно ширина електрода та відстань між електродами, м.

Час витікання (час обробки) зерна з камери обробки:

$$t_{el} = \frac{V}{q_{el}}, \quad (29)$$

де t_{el} – час витоку зерна з камери обробки, с; V – об'єм камери, м³:

Середня швидкість v_{cp} проходження зерном камери обробки, м/с:

$$v_{cp} = \frac{H}{t_{el}}, \quad (30)$$

де H – висота камери, м.

За встановленими теоретичними залежностями в програмному забезпеченні Mathcad 14 проведено розрахунок граничних значень часу та швидкості витоку в сильному електричному полі для зерна ячменю з відносною діелектричною проникністю зерна $\varepsilon_3=6...10$ [1] та питомою електропровідністю $\gamma_3 = 1 \cdot 10^{-9} ... 1 \cdot 10^{-8}$ См/м [7]. В розрахунку враховувалося, що на електроди камери обробки встановлено пластини з целулоїду з відносною діелектричною проникністю $\varepsilon_{nl}=4,3$. Значення величин фізико-механічних властивостей приймалися для умов експерименту [4]. Розміри установки приймалися відповідно до конструктивних параметрів експериментальної камери обробки: висота $H=0,82$ м; відстань між електродами $L=0,03$ м; довжина камери $X=0,05$

м. Кут відкриття затвора витікання $\alpha=0\ldots90^\circ$. Розрахунок проводили для напруги живлення $U=0\ldots20$ кВ. Оскільки значення величин фізико-механічних та електрофізичних властивостей зерна змінюються в широких межах, то розрахунковим шляхом визначалися максимально можливе та мінімально можливе значення швидкості та часу витоку зернової маси з камери обробки.

Експериментальна перевірка теоретичних залежностей проводилася на зерні ячменю сорту «Солнцедар» вологістю 12,5 %. Для цього зерно ячменю засипали в камеру обробки, подавали високу напругу на електроди камери, відкривали затвор і визначали час витоку зерна. За виразом (30) визначали середню швидкість проходження зерном ячменю камери обробки, а за виразом (29) з урахуванням (27), (28) визначали час витоку зерна з камери обробки. Дослідження проводилися в трикратній повторності.

В таблиці приведено результати досліджень витікання зерна ячменю сорту «Солнцедар» вологістю 12 % з камери обробки під дією сильного електричного поля. Під час досліджень на електроди камери обробки встановлено пластини з целулоїду.

Таблиця

Результати досліджень швидкості витoku зерна під дією сильного електричного поля

Кут відкриття затвора, град																													
U, кВ	21										27										32								
	t _р , с			t _{експ} , с	V _р , м/с			V _{експ} , м/с		t _р , с			t _{експ} , с	V _р , м/с			V _{експ} , м/с		t _р , с			t _{експ} , с		V _р , м/с		V _{експ} , м/с			
	мін. знач.	макс. знач			мін.	макс.	знач	макс.	знач	мін.	макс.	знач	макс.	знач	мін.	макс.	знач	макс.	знач	мін.	макс.	знач	макс.	знач	мін.	макс.	знач	макс.	знач
0	6,9	∞		14,2	0	0,119	0,058	4,3	13,4	10,1	0,062	0,190	0,081	3,2	7,7	4,8	0,105	0,255	0,170										
3	6,9	∞		14,3	0	0,119	0,058	4,4	13,8	10,4	0,059	0,189	0,079	3,2	7,8	4,9	0,105	0,255	0,168										
6	7,0	∞		14,4	0	0,118	0,057	4,4	15,6	11,4	0,053	0,188	0,072	3,3	8,4	5,0	0,098	0,253	0,164										
9	7,1	∞		17,0	0	0,116	0,048	4,4	21,1	13,0	0,039	0,185	0,063	3,3	9,5	5,1	0,086	0,250	0,162										
12	7,3	∞		22,0	0	0,113	0,037	4,5	∞	15,5	0	0,182	0,053	3,3	12,5	5,1	0,066	0,246	0,161										
15	7,6	∞		26,2	0	0,109	0,031	4,6	∞	18,3	0	0,177	0,045	3,4	45,2	5,2	0,018	0,241	0,159										
16	7,7	∞		27,3	0	0,107	0,030	4,7	∞	19,7	0	0,175	0,041	3,4	∞	5,8	0	0,239	0,141										
	37										45										63								
0	2,5	5,2	3,4	3,4	0,157	0,326	0,243	1,9	3,4	2,6	0,245	0,445	0,320	1,2	1,9	1,7	0,441	0,701	0,472										
3	2,5	5,3	3,7	3,7	0,155	0,326	0,222	1,9	3,4	2,6	0,242	0,445	0,317	1,2	1,9	1,8	0,438	0,700	0,464										
6	2,5	5,6	3,9	3,9	0,148	0,324	0,213	1,9	3,5	2,7	0,234	0,442	0,304	1,2	1,9	1,8	0,427	0,697	0,447										
9	2,6	6,1	4,0	4,0	0,136	0,320	0,203	1,9	3,7	2,8	0,220	0,439	0,293	1,2	2,0	1,9	0,409	0,692	0,433										
12	2,6	7,1	4,3	4,3	0,116	0,316	0,190	1,9	4,1	2,9	0,199	0,433	0,285	1,2	2,2	2,0	0,383	0,685	0,411										
15	2,7	9,8	4,5	4,5	0,084	0,310	0,184	1,9	4,9	3,0	0,168	0,426	0,274	1,2	2,4	2,1	0,346	0,676	0,391										
16	2,7	12,1	4,6	4,6	0,068	0,308	0,179	1,9	5,3	3,1	0,154	0,423	0,263	1,2	2,5	2,3	0,331	0,672	0,357										

t_р – розрахункове значення часу витoku зерна з камери обробки, с;

t_{експ} – експериментальне значення часу витoku з камери обробки, с;

V_р – розрахункове значення швидкості витoku зерна з камери обробки, м/с;

V_{експ} – експериментальне значення швидкості витoku з камери обробки, м/с;

U – напруга на електродах камери обробки, кВ.

Дані, наведені в таблиці, показують, що експериментальні значення часу та швидкості витоку зерна з камери обробки знаходяться в межах допустимих значень, які визначені розрахунковим шляхом.

Висновки

Розглянуто процес гравітаційного витоку зернової маси в сильному електричному полі з камери обробки. Встановлені залежності дозволяють визначати час та швидкість витоку зерна з камери обробки в залежності від кута відкриття затвора витікання, прикладеної до електродів напруги, враховуючи значення величин його фізико-механічних та електрофізичних властивостей. Також встановлено, що під дією сильного електричного поля значно уповільнюється рух зернової маси в камері обробки, що може призвести до повної зупинки потоку зерна.

Список літератури

1. Авдеев М.В. Влияние диэлектрической проницаемости семян на напряженность электрического поля в их слое / М.В. Авдеев, Е.М. Басарыгина, М.Р. Хаматдинова, Г.П. Лещенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2005. – №9. – С. 24-26.
2. Басов А.М. Электрозерноочистительные машины. Теория, конструкция и расчет. / А.М. Басов, Ф.Я. Изаков, В.Н. Шмигель, Т.Н. Лукиенко, Г.А. Яснор, Ю.В. Панус – Москва: Из-ство «Машиностроение». – 1985. – 201 с.
3. Берека О.М. Дослідження режимних параметрів при незаражуючій обробці зерна різних видів культур у сильному електричному полі / О.М. Берека, С.М. Усенко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Вип. 166. Ч.3. – К.: НУБіП України, 2011. – С. 32-37.
4. Берека О.М. Дослідження швидкості потоку зернової маси в камері обробки при гравітаційному витіканні / О.М. Берека, О.В. Науменко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ. – Мелітополь: ТДАТУ, 2013. – Вип. 13, т.4. – С. 65-70.

5. Берека О.М. Дослідження швидкості потоку зернової маси в камері обробки при вібраційному витіканні / О.М. Берека, О.В. Науменко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – К.: ВЦ НУБіП України, 2013. – Вип. 184, ч. 2. – С. 44- 50.
6. Берека О.М. Знешкодження в сильних електричних полях комах-шкідників зерна / О.М. Берека, О.В. Науменко // Motrol. Motorization and power industry in agriculture. – 2011. – Volume 13D. – С. 291 - 295.
7. Берека О.М. Сильні електричні поля в зерновій галузі рослинництва: монографія / О.М. Берека. – К.: ВЦ НУБіП України, 2011. – 400 с.
8. Берека О.М. Часткові розряди в зерновій масі під дією сильного електричного поля / О.М. Берека, С.М. Усенко, С.В. Петриченко // Праці Таврійського державного агротехнічного університету. Вип. 11. Том 6. – Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – С. 184-191.
9. Цатурян А.И. Влияние частоты на гравитационное истечение сыпучих материалов в электрическом поле / А.И. Цатурян, В.М. Миняйло, А.А. Торунян // Известия Академии наук Армянской ССР (серия технических наук). Т. XXV, №6. – 1982. – С. 30-35.
10. Цатурян А.И. К теории гравитационного истечения сыпучих материалов в электрическом поле / А.И. Цатурян // Электричество. – 1985. – № 10. – С. 40-45.
11. Цатурян А.И. О механизме гравитационного истечения сыпучих материалов в электрическом поле / А.И. Цатурян // Электричество. – 1981. – №6 – С. 50-52.
12. Цатурян А.И. Свободное истечение сыпучего материала в комбинированном электрическом поле / А.И. Цатурян, А.А. Цатурян // Известия НАН и ГИУ Армении (серия «Технические науки»). – Т. LI, №1. – 1998. – С. 54-58.
13. Шмигель В.Н. Определение напряженности поля внутри зернового слоя / В.Н. Шмигель, В.Г. Рахманин // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1966. – № 2. – С. 30-32.

Рассмотрены факторы влияния на скорость зерновой массы в камере обработки и время ее истечения, представлены установленные зависимости времени и скорости истечения зерна от угла открытия затвора истечения и действия силы тяжести и сильного электрического поля.

Зерновая масса, скорость истечения, время обработки, угол открытия, сильное электрическое поле.

It is looked at influence factors during processing on grain flood speed and time processing, it is determined grain flood speed and time dependences on bolt turning angle and voltage applied to the electrodes of processing cell.

Grain mass, flow speed, processing time, turning angle, high electrical field.