

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СУХОЙ ОЧИСТКИ КАРТОФЕЛЯ

В.Н. ДАШКОВ¹, А.Л. РАПИНЧУК², А.С. ВОРОБЕЙ², В.А. АГЕЙЧИК¹, А.А. БРЕНЧ¹

¹Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь

²Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства,
Минск, Республика Беларусь

В статье обоснованы параметры и режимы работы машины для сухой очистки картофеля. Приведены экспериментальные зависимости удельной энергоёмкости процесса, эффективности очистки картофеля, а также повреждения клубней от режимных и конструктивных параметров машины.

The parameters and operating running regime machine for dry potato peeling are grounded in the article. The experimental dependences of permissivity, the efficiency of potato peeling and tuber spoiling because of regime and constructive parameters of the machine are hereby given.

Введение

Для обоснования параметров и режимов работы машины по сухой очистке картофеля необходимо определить конструктивные факторы, влияющие на процесс сухой очистки (входные регулируемые параметры), оценочные показатели машины и обрабатываемого картофеля (выходные независимые параметры).

Основная часть

Комплексные исследования научно-технической литературы в области технических средств для сухой очистки картофеля [1, 2] позволили определить в качестве выходных независимых параметров, характеризующих работу машины,

- производительность (Π , кг/час),
- удельную энергоёмкость ($n_{уд}$, Втч/кг),
- повреждаемость клубней (ϵ , %),
- эффективность очистки (δ).

Конструктивными входными регулируемыми параметрами машины для сухой очистки картофеля выбраны:

- угол наклона машины (α , рад),
- статическая нагрузка на картофель (P , Н),
- частота вращения щеток (n , об/мин),
- длина машины (L , м).

Угол наклона машины (α , рад) изменялся в пределах от 1° до 10° и на четырех уровнях был равен: $\alpha_1 = 0,02$ рад (1°), $\alpha_2 = 0,05$ рад (3°), $\alpha_3 = 0,09$ рад (5°), $\alpha_4 = 0,17$ рад (10°).

Еще одним из определяющих факторов, характеризующих работу машины, является статическая нагрузка на картофель (P , Н), вызванная силой тяжести прорезиненного покрытия, которая варьировалась в пределах от 20 до 25 Н ($P_1 = 20$ Н, $P_2 = 22$ Н, $P_3 = 24$ Н, $P_4 = 25$ Н).

Для определения оптимальных параметров работы очистительной машины, в эксперименте задавали частоту вращения щеток в диапазоне от 80 до 210 об/мин: ($n_1 = 80$ об/мин, $n_2 = 130$ об/мин, $n_3 = 160$ об/мин, $n_4 = 210$ об/мин).

Для определения рациональных конструктивных параметров очистительной машины в эксперименте изменяли длину пути щеточной поверхности, пройденного картофелем в пределах от 1,05 м до 2,25 м: $L_1 = 1,05$ м (6 щеток), $L_2 = 1,35$ м (8 щеток), $L_3 = 1,65$ м (10 щеток), $L_4 = 2,25$ м (14 щеток).

Для проведения исследований был разработан и изготовлен экспериментальный стенд, состоящий из машины для сухой очистки картофеля и контрольно-измерительных приборов, представленных на рис. 1.

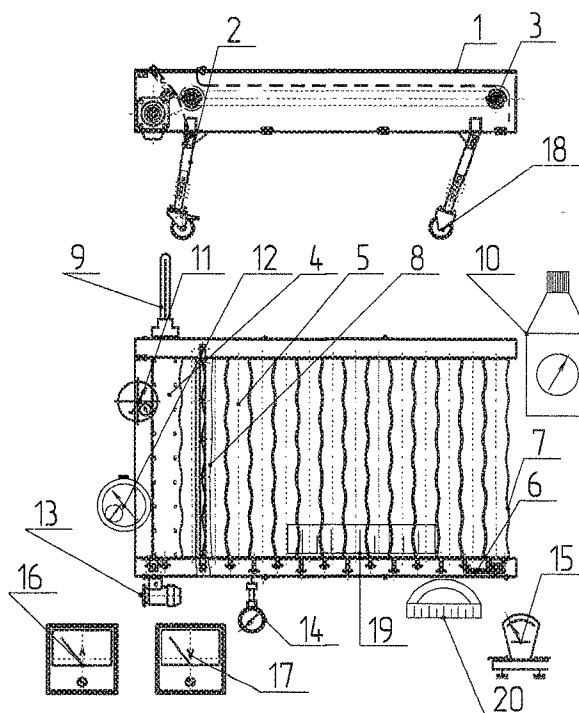


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1 – рама; 2 – стойка; 3 – звездочка; 4 – загрузочный бункер; 5 – щеточный валец; 6 – цепь; 7 – выгрузочный лоток; 8 – прорезиненное покрытие; 9 – термометр; 10 – шумомер; 11 – барометр; 12 – секундомер; 13 – электродвигатель; 14 – тахометр; 15 – стационарные весы; 16 – амперметр; 17 – ваттметр; 18 – колесо; 19 – измерительная линейка; 20 – транспортер

Испытания проводились при следующих условиях:

- температура окружающей среды от $+10^\circ\text{C}$ до $+12^\circ\text{C}$;

- относительная влажность воздуха от 50 до 80 %;
- атмосферное давление от 84,0 до 106,7 кПа (730...760 мм рт. ст.);
- колебания напряжения электрической сети от 5 до 10 % номинального значения.

Зависимость искомого (выходного) параметра (производительность Π , кг/час, удельная энергоёмкость N , Втч/кг; повреждаемость клубней e , %; эффективность очистки δ) от принятых независимых переменных можно представить в виде произведения функций от отдельных аргументов:

$$\Pi = A \cdot f_{1\Pi}(\alpha) \cdot f_{2\Pi}(P) \cdot f_{3\Pi}(n_{\text{вр}}) \cdot f_{4\Pi}(L) \quad (1)$$

$$N_{\text{уд}} = A \cdot f_{1N_{\text{уд}}}(\alpha) \cdot f_{2N_{\text{уд}}}(P) \cdot f_{3N_{\text{уд}}}(n_{\text{вр}}) \cdot f_{4N_{\text{уд}}}(L) \quad (2)$$

$$e = A \cdot f_{1e}(\alpha) \cdot f_{2e}(P) \cdot f_{3e}(n_{\text{вр}}) \cdot f_{4e}(L) \quad (3)$$

$$\delta = A \cdot f_{1\delta}(\alpha) \cdot f_{2\delta}(P) \cdot f_{3\delta}(n_{\text{вр}}) \cdot f_{4\delta}(L) \quad (4)$$

Подобное представление с успехом применяется во многих технологических исследованиях, даже без достаточного теоретического обоснования, являясь одним из наиболее важных общих соотношений. Планом эксперимента выбран греко-латинский квадрат [3, 4, 5]. Существенным этапом в экспериментальном определении функции (1...4) является выбор значений независимых переменных, при которых нужно осуществлять опыты. Набор этих значений представляет собой план эксперимента.

Применение оптимального плана эксперимента позволяет сократить число необходимых опытов и повысить точность обработки. В данном случае, когда число независимых факторов равно четырём, требуется провести шестнадцать опытов, варьируя факторы на четырех уровнях. Соответствующий план

греко-латинского квадрата 4×4 с указанием уровня факторов для каждого опыта приведен в табл. 1.

Для каждого опыта устанавливаются требуемые режимно-конструктивные параметры машины для сухой очистки картофеля.

На весах взвешивается необходимое количество картофеля (50 кг). С помощью секундомера определяется общее время прохождения картофеля в очистительной машине. Производительность машины (Π , кг/ч) определяется по формуле

$$\Pi = \frac{m}{3600T},$$

где m – масса перерабатываемого картофеля, кг;
 T – время обработки, с.

Удельная энергоёмкость машины определяется как общая потребляемая мощность, измеряемая с помощью ваттметра, деленная на производительность машины.

Повреждаемость клубней картофеля (e) определяется визуально по формуле

$$e = \frac{100x_1}{x},$$

где x – исследуемое количество обработанных клубней ($x = 50$);

x_1 – количество поврежденных клубней.

Эффективность очистки картофеля определяется по формуле

$$\delta = \frac{100 - \frac{100y_1}{y}}{100},$$

где y – исследуемое количество обработанных клубней ($y = 50$);

y_1 – количество не полностью очищенных клубней.

Таблица 1. Факторный план экспериментальных исследований

№ опыта	α , рад	P , Н	$n_{\text{вр}}$, об/мин	L , м	Π , кг/ч	$n_{\text{уд}}$, Втч/кг	e , %	δ
1	α_1	P_1	$n_{\text{вр}1}$	L_1	Π_1	$n_{\text{уд}1}$	e_1	δ_1
2	α_2	P_1	$n_{\text{вр}2}$	L_3	Π_2	$n_{\text{уд}2}$	e_2	δ_2
3	α_3	P_1	$n_{\text{вр}3}$	L_4	Π_3	$n_{\text{уд}3}$	e_3	δ_3
4	α_4	P_1	$n_{\text{вр}4}$	L_2	Π_4	$n_{\text{уд}4}$	e_4	δ_4
5	α_1	P_2	$n_{\text{вр}4}$	L_4	Π_5	$n_{\text{уд}5}$	e_5	δ_5
6	α_2	P_2	$n_{\text{вр}3}$	L_2	Π_6	$n_{\text{уд}6}$	e_6	δ_6
7	α_3	P_2	$n_{\text{вр}2}$	L_4	Π_7	$n_{\text{уд}7}$	e_7	δ_7
8	α_4	P_2	$n_{\text{вр}1}$	L_3	Π_8	$n_{\text{уд}8}$	e_8	δ_8
9	α_1	P_3	$n_{\text{вр}2}$	L_2	Π_9	$n_{\text{уд}9}$	e_9	δ_9
10	α_2	P_3	$n_{\text{вр}1}$	L_4	Π_{10}	$n_{\text{уд}10}$	e_{10}	δ_{10}
11	α_3	P_3	$n_{\text{вр}4}$	L_3	Π_{11}	$n_{\text{уд}11}$	e_{11}	δ_{11}
12	α_4	P_3	$n_{\text{вр}3}$	L_1	Π_{12}	$n_{\text{уд}12}$	e_{12}	δ_{12}
13	α_1	P_4	$n_{\text{вр}3}$	L_3	Π_{13}	$n_{\text{уд}13}$	e_{13}	δ_{13}
14	α_2	P_4	$n_{\text{вр}4}$	L_1	Π_{14}	$n_{\text{уд}14}$	e_{14}	δ_{14}
15	α_3	P_4	$n_{\text{вр}1}$	L_2	Π_{15}	$n_{\text{уд}15}$	e_{15}	δ_{15}
16	α_4	P_4	$n_{\text{вр}2}$	L_4	Π_{16}	$n_{\text{уд}16}$	e_{16}	δ_{16}

Данные эксперимента заносятся в таблицу плана экспериментальных исследований. При обработке экспериментальных данных, для того чтобы представить Π от α , в чистом виде необходимо проделать следующее.

Найти логарифмы от средних значений производительности машины Π . Наименьшее значение заданной величины коэффициента α (1 – уровень) устанавливается для 1, 5, 9 и 13 опытов. По полученным экспериментальным значениям Π для этих опытов вычисляем средний логарифм производительности и потенцируем результат. Второй уровень производительности реализуется в опытах 2, 6, 10 и 14. Аналогично с помощью потенцирования среднего логарифма от производительности в этих опытах получаем Π , соответствующий второму уровню варьирования α и т. д. Точно также можно получить зависимости Π от P , n и L .

Без значения постоянной A , входящей в формулу (1), эти зависимости нельзя использовать непосредственно для определения производительности при заданных значениях конструктивных параметров, так как они представляют усредненные, а не дискретные значения. При построении каждой зависимости используются результаты всех 16 экспериментов, а каждая точка зависимости строится по результатам четырех опытов.

После обработки графических (экспериментальных) данных получаем уравнения:

$$\Pi = f_1(\alpha), \quad \Pi = f_2(P), \quad \Pi = f_3(n), \quad \Pi = f(L),$$

перемножение которых в конечном итоге позволяет получить выражение, связывающее производительность с независимыми управляемыми α , P , n и L с точностью до неизвестного постоянного множителя – A .

Аналогично получаем зависимости удельной энергоёмкости машины $n_{уд}$, Втч/кг, от принятых независимых переменных α , P , n и L [1...4].

В таблице 2 представлены результаты экспериментальных исследований процесса сухой очистки картофеля, соответствующие многофакторному плану эксперимента греко-латинского квадрата 4×4 .

Для того чтобы представить зависимость выходных параметров от входных, находим логарифмы от средних значений выходных параметров эксперимента и потенцируем результат для каждого из четырех уровней.

После математической обработки графических зависимостей получаем уравнения

$$\Pi = f(\alpha), \quad \Pi = f(P), \quad \Pi = f(n), \quad \Pi = f(L);$$

$$n_{уд} = f(\alpha), \quad n_{уд} = f(P), \quad n_{уд} = f(n), \quad n_{уд} = f(L);$$

$$e = f(\alpha), \quad e = f(P), \quad e = f(n), \quad e = f(L);$$

$$\delta = f(\alpha), \quad \delta = f(P), \quad \delta = f(n), \quad \delta = f(L).$$

Перемножение уравнений позволяет в конечном итоге получить выражение, связывающее выходные параметры Π , $n_{уд}$, e и δ с управляемыми α , P , n и L с точностью до постоянного множителя A , который определяется как

$$A = \sum_{i=1}^{16} A_i / 16.$$

После обработки результатов эксперимента получена графическая зависимость производительности от управляемых переменных: угла наклона машины (α , рад); статической нагрузки (P , Н), частоты вращения валцов (n , об/мин) и длины машины (L , м), представленная на рис. 2.

Таблица 2. Результаты экспериментальных исследований

№ опыта	α , рад	P , Н	n , об/мин	L , м	Π , кг/час	$n_{уд}$, Втч/кг	e , %	δ , доли
1	0,02	20	80	1,05	5057	0,15	1,3	0,91
2	0,05	20	130	1,65	4906	0,19	1,5	0,93
3	0,09	20	160	2,25	5173	0,21	2,05	0,98
4	0,17	20	210	1,35	5700	0,24	1,95	0,98
5	0,02	22	210	2,25	5533	0,22	2	0,97
6	0,05	22	160	1,35	5325	0,19	1,65	0,96
7	0,09	22	130	1,05	5078	0,19	1,55	0,91
8	0,17	22	80	1,65	4920	0,2	1,65	0,95
9	0,02	24	130	1,35	5325	0,18	1,45	0,91
10	0,05	24	80	2,25	4754	0,19	1,65	0,95
11	0,09	24	210	1,65	4843	0,24	1,95	0,99
12	0,17	24	160	1,05	5400	0,23	1,9	0,95
13	0,02	25	160	1,65	5259	0,2	1,95	0,95
14	0,05	25	210	1,05	6095	0,22	1,95	0,97
15	0,09	25	130	1,35	4906	0,21	1,85	0,95
16	0,17	25	80	2,25	4800	0,22	2,1	0,99

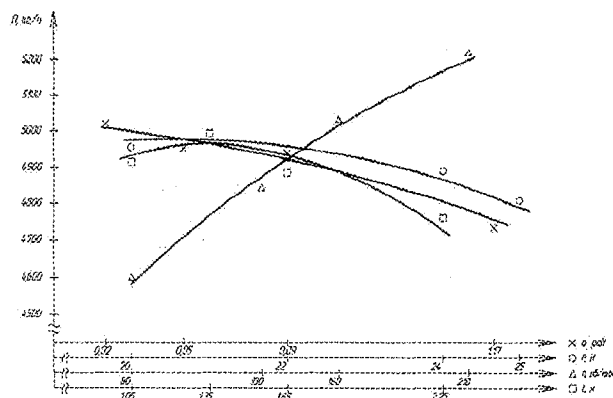


Рис. 2. Зависимость производительности от управляемых переменных: 1 – α ; 2 – P ; 3 – n ; 4 – L

Полученный график позволяет наглядно оценить степень влияния конструктивных параметров машины на производительность в процессе очистки картофеля.

Для прогнозирования и расчетов основных технических характеристик машины после обработки экспериментальных данных получено уравнение, позволяющее определять ее производительность:

$$P = 3162,8\alpha^{-0,02} P^{-0,12} n^{0,16} L^{-0,05},$$

где α – угла наклона машины, рад;

P – статическая нагрузка на картофель, Н;

n – частота вращения валцов, об/мин;

L – длина машины, м.

После анализа значимости влияния каждого входного параметра, по показателю степени, было получено следующее уравнение

$$P = 3162,8P^{-0,12} n^{0,16}.$$

Для графического отражения влияния конструктивных параметров машины на удельную энергоёмкость процесса очистки картофеля построена зависимость представленная на рис. 3.

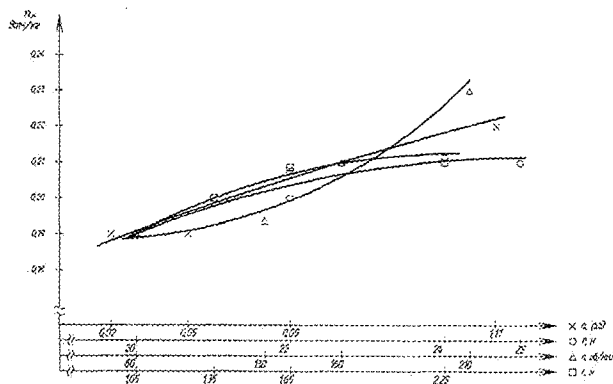


Рис. 3. Зависимость удельной энергоёмкости от управляемых переменных: 1 – α ; 2 – P ; 3 – n ; 4 – L

При обработке полученных экспериментальных данных получена зависимость удельной энергоёмкости процесса очистки от конструктивных параметров машины:

$$n_{y0} = 0,15\alpha^{0,74} P^{0,48} n^{0,19} L^{0,14}.$$

После анализа значимости влияния каждого входного параметра, по показателю степени, было получено следующее уравнение:

$$n_{y0} = 0,15\alpha^{0,74} P^{0,48} n^{0,19}.$$

Комплексные исследования технических характеристик позволили научно обоснованно подойти к расчету, осуществлению и прогнозированию этого процесса с целью создания высокоэффективной конструкции машины для очистки корнеплодов.

На рисунке 4 представлена зависимость эффективности очистки картофеля (δ , %), выбранная одним из основных технологических параметров, характеризующих работу машины от α , P , n и L .

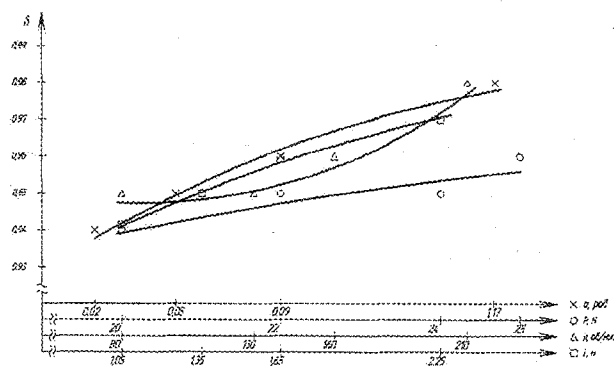


Рис. 4. Зависимость эффективности очистки картофеля от управляемых переменных: 1 – α ; 2 – P ; 3 – n ; 4 – L

Уравнение для определения эффективности процесса очистки картофеля имеет вид

$$\delta = 0,66\alpha^{0,02} P^{0,08} n^{0,03} L^{0,04}.$$

После анализа значимости влияния каждого входного параметра, по показателю степени, было получено следующее уравнение:

$$\delta = 0,66P^{0,08} L^{0,04}.$$

Вторым основным технологическим параметром является повреждаемость клубней во время очистки (e). Зависимость повреждаемости клубней от α , P , n и L эффективности очистки картофеля представлена на рис. 5. Уравнение для определения повреждаемости клубней во время очистки имеет вид

$$e = 0,12\alpha^{0,07} P^{0,58} n^{0,19} L^{0,21}.$$

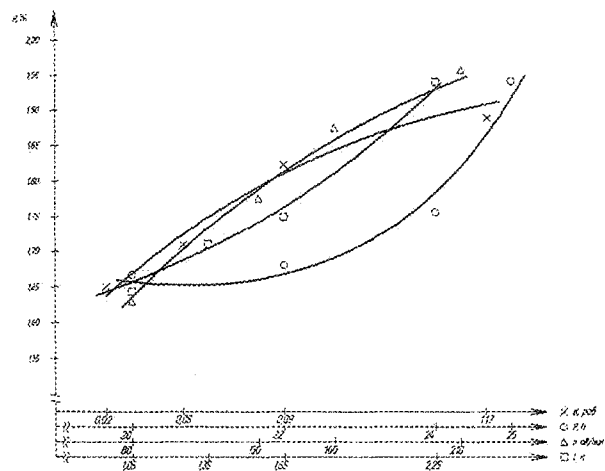


Рис. 5. Зависимость эффективности очистки картофеля от управляемых переменных: 1 – α ; 2 – P ; 3 – n ; 4 – L

После анализа значимости влияния каждого входного параметра, по показателю степени, было получено следующее уравнение:

$$e = 0,12P^{0,58} n^{0,19} L^{0,21}.$$

Заключение

1. Наибольшее влияние на производительность машины оказывает частота вращения щеток. С увеличением угла наклона машины, статической нагрузки на картофель и длины щеточной поверхности производительность ее уменьшается.

2. Определяющими параметрами, влияющими на удельную энергоемкость процесса очистки картофеля, являются угол наклона, статическая нагрузка на картофель и частота вращения щеток.

3. Главными параметрами, влияющими на качество выполнения технологического процесса (эффек-

тивность и повреждаемость клубней), являются статическая нагрузка, длина пройденного картофелем пути и частота вращения щеток.

Полученные экспериментальные зависимости удельной энергоемкости процесса, производительности, эффективности очистки картофеля и повреждаемости клубней от режимных и конструктивных параметров машины наглядно доказывают целесообразность использования разработанной конструкции машины для сухой очистки картофеля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем для вузов. Мн.: Дизайнпро, 1997. С. 640.
2. Найданов С.А. Экспериментальные исследования щеточных очистителей. Сборник научн. трудов. МИИСП. М., 1983. С. 76–80.
3. Груданов В.Я. Основы инженерного творчества. Минск: Изд. Центр БГУ, 2005. С. 299.
4. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. М.: МИР, 1972. С. 151.
5. Турчак Л.И. Основы численных методов / Под ред. В.В. Щенникова. М.: Наука, 1987. С. 320.