

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И РЕЖИМНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УСТАНОВКИ ПО СУХОЙ ОЧИСТКЕ КЛУБНЕЙ
КАРТОФЕЛЯ ОТ ПОЧВЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Yu.D. Shpiruk, V.V. Matyushev, I.A. Chaplygina,
A.A. Belyakov, A.V. Semenov

VERIFICATION OF STRUCTURAL, TECHNOLOGICAL AND SENSITIVE INDICATORS
OF THE FUNCTIONING OF THE UNIT FOR DRY CLEANING
OF POTATO TUBERS FROM SOIL IMPURITIES

Шпирук Ю.Д. – асп. каф. товароведения и управления качеством продукции АПК Красноярского государственного аграрного университета, г. Красноярск. E-mail: shpiruk57@mail.ru

Матюшев В.В. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. зав. кафедрой товароведения и управления качеством продукции АПК Красноярского государственного аграрного университета, г. Красноярск. E-mail: don.matyusheff2015@yandex.ru

Чаплыгина И.А. – канд. биол. наук, доц. каф. товароведения и управления качеством продукции АПК Красноярского государственного аграрного университета, г. Красноярск. E-mail: ledum_palustre@mail.ru

Беляков А.А. – канд. техн. наук, доц., инженер ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск. E-mail: belyakov@ksc.krasn.ru

Семенов А.В. – канд. техн. наук, доц., зав. каф. Механизация сельского хозяйства Красноярского государственного аграрного университета, г. Красноярск. E-mail: don.matyusheff2015@yandex.ru

Shpiruk Yu.D. – Post-Graduate Student, Chair of Merchandizing and Product Quality Control of AIC, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk. E-mail: shpiruk57@mail.ru

Matyushev V.V. – Dr. Techn. Sci., Prof. Head Chair of Merchandizing and Product Quality Control of AIC, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk. E-mail: don.matyusheff2015@yandex.ru

Chaplygina I.A. – Cand. Biol. Sci., Assoc. Prof., Chair of Merchandizing and Product Quality Control of AIC, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk. E-mail: ledum_palustre@mail.ru

Belyakov A.A. – Cand. Techn. Sci., Assoc. Prof., Engineer, FRC KSC, SB RAS, Krasnoyarsk. E-mail: belyakov@ksc.krasn.ru

Semenov A.V. – Cand. Techn. Sci., Assoc. Prof., Head, Chair of Mechanization of Agriculture, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk. E-mail: don.matyusheff2015@yandex.ru

Целью данного исследования является совершенствование технологии очистки клубней картофеля от почвенных загрязнений за счет оптимального сочетания комплекса конструктивных, технологических и обоснования режимных параметров функционирования установки с использованием компьютерного моделирования и уточняющих экспериментов. В статье описаны методика и результаты исследований по моделированию и прогнозированию изменения показателей работы установки и определению его теоретического и практически допустимого оптимума, характеризующего эффективную очистку картофеля. Запатентованная установка по сухой очистке картофеля от почвенных загрязнений позволяет за счёт конструктивных особенностей и гибкого регулирования

режимов эксплуатации выбрать оптимумы показателей её функционирования, соответствующие типу загружаемого сырья, повысить производственную и энергетическую эффективность технологии. Комплексные исследования позволили выявить основные закономерности технологических процессов с использованием данной установки, определить теоретический и обосновать практический оптимум по обобщённому показателю, характеризующему эффективную очистку картофеля.

Ключевые слова: конструктивные и технологические показатели, режимные параметры, установка по очистке картофеля от загрязнений, моделирование и оптимизация, обобщённый критерий эффективности.

The aim of the study is the improvement of treatment technology of potato tubers from soil impurities due to optimal combination of complex structural, technological and justification of regime parameters of functioning of installation with use of computer modeling and the specifying experiments. In the study the technique and results of researches on modeling and forecasting of change of indicators of the work of installation and the definition of its theoretical and practically admissible optimum characterizing effective cleaning of potatoes are described. Patented installation on dry cleaning of potatoes of soil pollution allows choosing optimum of indicators of its functioning corresponding to the type of loaded raw materials due to design features and flexible regulation of the modes of operation to increase production and power efficiency of technology. Complex researches allowed revealing the main regularities of technological processes while using this installation, to define theoretical and to prove a practical optimum on the generalized indicator characterizing effective cleaning of potatoes.

Keywords: *constructive and technological indicators, regime parameters, installation on cleaning potatoes from impurities, simulation and optimization, generalized criterion of efficiency.*

Введение. Актуальность использования установок для сухой очистки клубней картофеля от почвенных загрязнений обусловлена поиском путей увеличения их доли в рационе сельскохозяйственных животных. Разработка системы прикладных математических моделей и последующая оптимизация конструктивных, технологических и режимных параметров эксплуатации установки по очистке клубней картофеля от почвенных загрязнений теоретически позволяют повысить её эффективность [4, 5, 9]. Однако практически часто возникают проблемы разрешимости, совместимости и так называемое «проклятие размерности» [7, 8], что характерно и для критерияльных областей задачи совершенствования технологических процессов очистки картофеля от почвенных загрязнений с использованием запатентованной установки [10]. Поэтому для снижения размерности и выбора области допустимых значений показателей на каждом этапе предложены дополнительные уточняющие эксперименты, учитывающие конструкцию установки.

Цель исследований. Совершенствование технологии очистки клубней картофеля от почвенных загрязнений путём оптимального сочета-

ния комплекса конструктивных, технологических и обоснования режимных параметров функционирования установки с использованием компьютерного моделирования и уточняющих экспериментов.

Задачи исследований: разработать модели изменения производительности и удельной энергоёмкости процесса очистки клубней картофеля от почвенных загрязнений в зависимости от конструктивных, технологических и режимных параметров функционирования установки; определить оптимальные значения конструктивных и технологических режимных параметров функционирования установки по очистке картофеля от загрязнений.

Методы исследований. Исследования распределены по трем уровням: выбор исходных показателей и систематизация их значений, формирование расчетных показателей, обоснование моделируемых показателей. В качестве исходных показателей для исследования функционирования новой установки по очистке картофеля от загрязнений выбраны: частота вращения диска (ω); класс картофеля по размеру (K); начальная масса загрязнённого картофеля до обработки на установке ($M_{нач}$); длина (L), угол наклона (α) и шаг установки (H) лопаток. В качестве результатных показателей для моделирования и оптимизации конструктивных, технологических и режимных параметров были выбраны и предварительно рассчитаны удельная энергоёмкость процесса (E , кВт/т) и часовая производительность установки (Q , т/ч)

$$E = \frac{P_n}{Q},$$

где P_n – мощность установки с нагрузкой, кВт;

$$Q = \frac{M_{нач}}{\tau} \cdot \frac{60^2}{10^3},$$

τ – продолжительность обработки загрязнённого картофеля, с.

Для проведения исследований, сочетающих теоретический поиск и уточняющих эксперименты, сформирована структура показателей и критериев для моделирования и оптимизации конструктивных, технологических и режимных параметров установки по очистке картофеля от почвенных загрязнений (рис. 1).

Для решения задач компьютерной обработки данных, моделирования и оптимизации были использованы: аппарат математического моделиро-

вания, статистики и системного анализа [1–3, 6–8, 11], пакеты Maple (Optimization) и DataFit, а также табличный процессор MsExcel.

Результаты исследований и их обсуждение. Модель изменения производительности установки (Q) в зависимости от длины (L), угла наклона

(α) и шага установки лопаток (H), частоты вращения (ω), размера картофеля (K), начальной массы загружаемого загрязнённого картофеля (M_n , кг) представляется следующей полиномиальной функцией (рис. 2):

$$Q(L, \alpha, H, \omega, K, M) = b_1L + b_2\alpha + b_3H + b_4\omega + b_5K + b_6M_n + b_{11}L^2 + b_{12}L\alpha + b_{13}LH + b_{14}L\omega + b_{15}LK + b_{16}LM_n + b_{22}\alpha^2 + b_{23}\alpha H + b_{24}\alpha\omega + b_{25}\alpha K + b_{26}\alpha M_n + b_{33}H^2 + b_{34}H\omega + b_{36}HM_n + b_{45}\omega K + b_{46}\omega M_n + b_{55}K^2 + b_{56}KM_n + b_{66}M_n^2,$$

где $b_1=-10,43193$; $b_2=55,17135$; $b_3=-1,06237$; $b_4=0,03751$; $b_5=-0,63651$; $b_6=1,16410$; $b_{11}=0,18741$; $b_{12}=-0,79084$; $b_{13}=-0,05558$; $b_{14}=-0,00023$; $b_{15}=0,01521$; $b_{16}=-0,00588$; $b_{22}=0,11464$; $b_{23}=-0,22466$; $b_{24}=-0,00154$; $b_{25}=-0,0052$; $b_{26}=0,0080$;

$b_{33}=0,07709$; $b_{34}=0,00021$; $b_{36}=-0,00215$; $b_{45}=-0,00020$; $b_{46}=-0,00043$; $b_{55}=-0,21590$; $b_{56}=0,15526$; $b_{66}=-0,05304$ – коэффициенты регрессии, найденные с помощью компьютерного пакета регрессионного анализа DataFit.

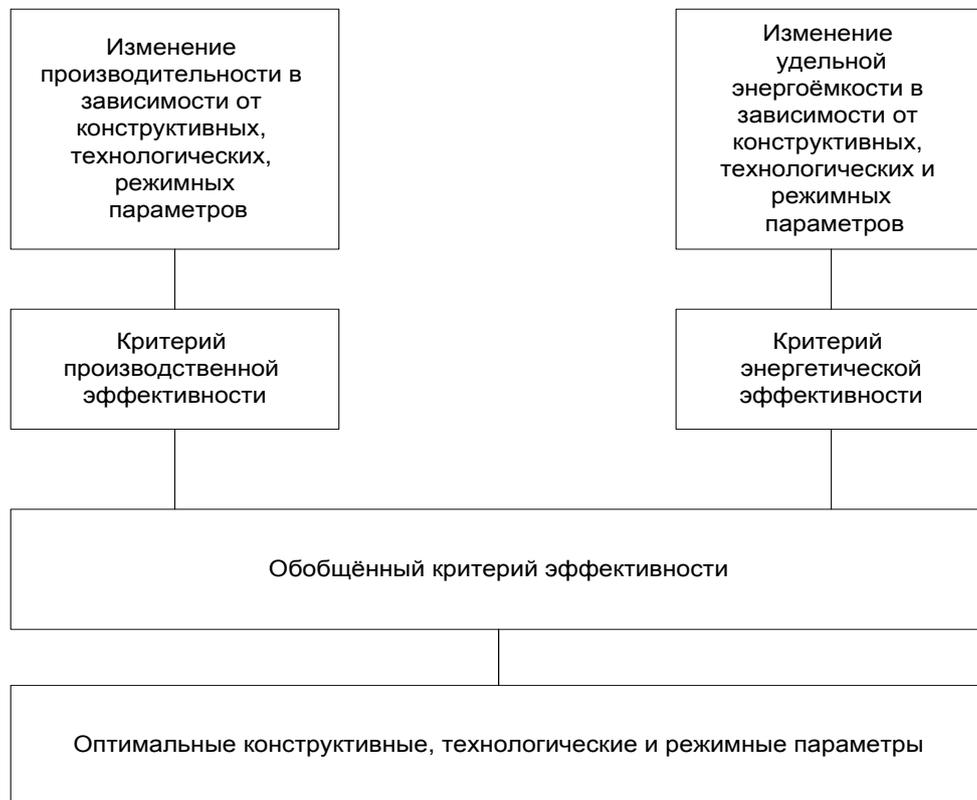


Рис. 1. Схема проведения исследований по определению эффективности технологии очистки картофеля от почвенных загрязнений

Значимость коэффициентов регрессии установлена по t-критерию Стьюдента на уровне 0,05, а адекватность модели – по F-критерию Фишера с использованием подпакета Statistics пакета Maple. В соответствии с $t_{0,05}$ -критерием все коэффициенты значимы: отличны от нуля. Зависимость де-

терминирована на 95,72 % (Coefficient of Multiple Determination 0,95728), что выше порогового значения (95 %). Относительная погрешность сглаживания экспериментальных данных не превосходит 6,3 % – допустимого на практике.

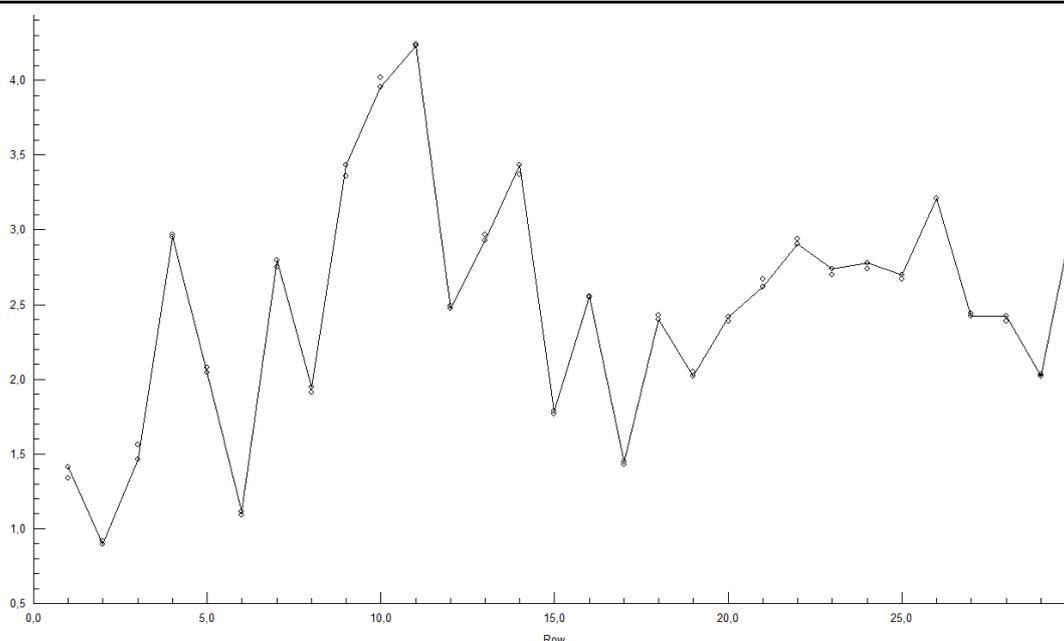


Рис. 2. Теоретически предсказанные расчётные и опытные данные производительности установки по очистке картофеля от почвенных загрязнений

Критерий производственной эффективности – максимум производительности установки

$$Q(L, \alpha, H, \omega, K, M) \rightarrow \max,$$

$$\begin{cases} 60 \leq L \leq 90, \\ 14 \leq \alpha \leq 22, \\ 50 \leq H \leq 70, \\ 350 \leq \omega \leq 450, \\ 1 \leq K \leq 3, \\ 1,360 \leq M \leq 8,045. \end{cases}$$

Выполнение данного критерия равносильно движению точки к оптимуму по гиперповерхности 7-мерного пространства.

Для преодоления «проклятия размерности» были проведены дополнительные исследования по влиянию геометрических характеристик лопатки, позволившие снизить размерность задачи на 2.

$$\min_{L, \alpha} \max_{H_j, \omega_j, K_j, M_j} (Q(L, \alpha, H_1, \omega_1, K_1, M_1) - Q(L, \alpha, H_2, \omega_2, K_2, M_2))^2,$$

$$\begin{cases} 60 \leq L \leq 90, \\ 14 \leq \alpha \leq 22, \\ 50 \leq H_j \leq 70, \\ 350 \leq \omega_j \leq 450, \\ 1 \leq K_j \leq 3, \\ 1,360 \leq M_j \leq 8,045. \end{cases}$$

При отыскании оптимума на гиперповерхности 10-мерного пространства также была использована

Опытным путём на всех режимах эксплуатации установлено, что длина и угол наклона лопатки, соответствующие максимальной производительности установки, в первом приближении оцениваются числовыми значениями

$$L^* = 77,5 + \varepsilon_L \text{ мм}, \quad \alpha^* \approx 16,0 + \varepsilon_\alpha \text{ }^\circ.$$

В дальнейшем численными методами найдены оценки для поправок

$$\varepsilon_L = -0,1937 \text{ мм}, \quad \varepsilon_\alpha = 0,2084 \text{ }^\circ,$$

то есть определены

$$L^* = 77,3063 \approx 77,3 \text{ мм},$$

$$\alpha^* \approx 16,2084 \approx 16,2 \text{ }^\circ.$$

Критерий производственной устойчивости – это минимум колебаний производительности установки: для любых $j = 1, 2$,

на дополнительная информация о геометрических данных лопатки: получена близкая точка

$L^* \approx 77,3 \text{ мм}$, $\alpha^* \approx 16,0^\circ$, которой соответствующую поправку:

$$\varepsilon_L = 0,0063 \text{ мм}, \varepsilon_\alpha = 0,2084^\circ.$$

Модель изменения удельной энергоёмкости процесса очистки на установке в зависимости от

длины, угла наклона и шага установки лопатки, частоты вращения диска, размера картофеля и начальной массы загружаемого загрязнённого картофеля представляется регрессионной функцией (рис. 3)

$$E(L, \alpha, H, \omega, K, M) = b_1L + b_2\alpha + b_3H + b_4\omega + b_5K + b_6M_n + b_{11}L^2 + b_{12}L\alpha + b_{13}LH + b_{15}LK + b_{16}LM_n + b_{22}\alpha^2 + b_{23}\alpha H + b_{24}\alpha\omega + b_{25}\alpha K + b_{26}\alpha M_n + b_{33}H^2 + b_{35}HK + b_{36}HM_n + b_{45}\omega K + b_{55}K^2 + b_{56}KM_n + b_{66}M_n^2,$$

где $b_1=-10,27312$; $b_2=55,58923$; $b_3=-0,83194$; $b_4=-0,00085$; $b_5=-1,50879$; $b_6=-1,47534$; $b_{11}=0,18614$; $b_{12}=-0,79570$; $b_{13}=-0,05594$; $b_{15}=0,01098$; $b_{16}=-0,00059$; $b_{22}=0,09142$; $b_{23}=-0,22957$; $b_{24}=0,00019$;

$b_{25}=0,04745$; $b_{26}=0,02598$; $b_{33}=0,07697$; $b_{35}=-0,01207$; $b_{36}=0,00556$; $b_{45}=-0,00049$; $b_{55}=0,130908$; $b_{56}=0,04558$; $b_{66}=0,05447$ – коэффициенты регрессии.

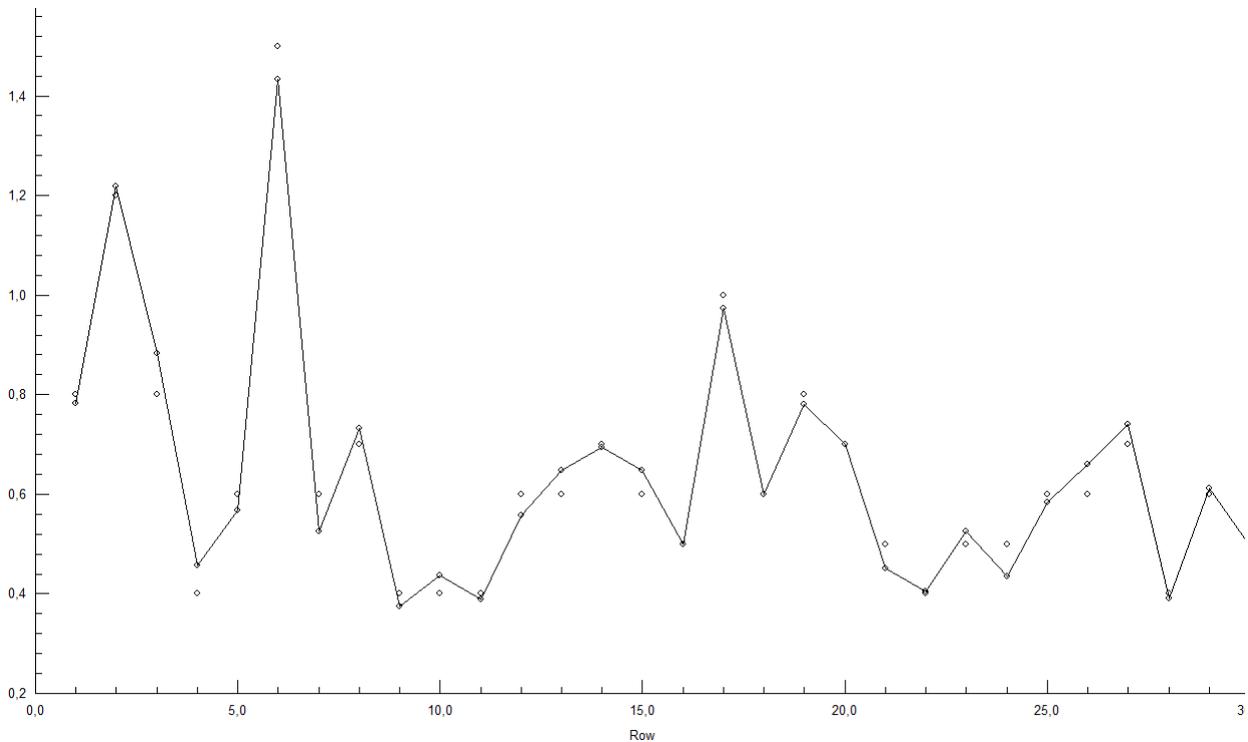


Рис. 3. Теоретически предсказанные расчётные и опытные данные удельной энергоёмкости установки по очистке картофеля от загрязнений

Значимость коэффициентов регрессии и адекватность модели установлена с помощью $t_{0,05}$ - и F-тестов, реализованных в подпакете Statistics пакета Maple. Зависимость детерминирована на 95,43 % (Coefficient of Multiple Determination 0,95432), что выше порогового значения (95 %). Абсолютная погрешность приближения не превосходит 0,09 кВт/т.

Критерий энергетической эффективности – это минимум удельной энергоёмкости процесса

$$E(L, \alpha, H, \omega, K, M) \rightarrow \min ,$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 60 \leq L \leq 90, \\ 14 \leq \alpha \leq 22, \\ 50 \leq H \leq 70, \\ 350 \leq \omega \leq 450, \\ 1 \leq K \leq 3, \\ 1,360 \leq M \leq 8,045 \end{array} \right. .$$

Критерий энергетической устойчивости – минимум колебаний удельной энергоёмкости установки

$$\min_{L, \alpha} \max_{H_j, \omega_j, K_j, M_j} (E(L, \alpha, H_1, \omega_1, K_1, M_1) - E(L, \alpha, H_2, \omega_2, K_2, M_2))^2,$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 60 \leq L \leq 90, \\ 14 \leq \alpha \leq 22, \\ 50 \leq H_j \leq 70, \\ 350 \leq \omega_j \leq 450, \\ 1 \leq K_j \leq 3, \\ 1,360 \leq M_j \leq 8,045 \end{array} \right.$$

Система критериев эффективности – это минимум копроизводительности и минимум удельной энергоёмкости

$$\left\{ \begin{array}{l} -Q(L, \alpha, H, \omega, K, M) \rightarrow \min, \\ E(L, \alpha, H, \omega, K, M) \rightarrow \min, \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 60 \leq L \leq 90, \\ 14 \leq \alpha \leq 22, \\ 50 \leq H \leq 70, \\ 350 \leq \omega \leq 450, \\ 1 \leq K \leq 3, \\ 1,360 \leq M \leq 8,045. \end{array} \right.$$

В нашем случае заменили «производительность» на «копроизводительность» и, соответственно, задачу максимизации « $Q(L, \alpha, H, \omega, K, M) \rightarrow \max$ » заменили на задачу минимизации « $-Q(L, \alpha, H, \omega, K, M) \rightarrow \min$ ».

$$F(L, \alpha, H, \omega, K, M) = -b_Q \cdot Q(L, \alpha, H, \omega, K, M) + b_E \cdot E(L, \alpha, H, \omega, K, M),$$

где b_Q и b_E – весовые коэффициенты частных показателей, соответственно Q и E , определяемые исходя из их средних значений 2,49 и 0,64

$$0,64 \cdot b_Q = 2,49 \cdot b_E.$$

Отсюда, с учётом условия нормировки $0 \leq b_Q \leq 1$ и $b_E = 1$, в первом приближении получим значения весовых коэффициентов:

$$b_Q = 0,26; b_E = 1,00.$$

Заменив систему частных показателей на обобщённый показатель, тем самым заменим систему критериев эффективности на один обобщённый критерий эффективности. Задачу оптимизации по обобщённому критерию эффективности можно считать приближением к задаче оптимизации по двум критериям. Решив задачу оптимизации по системе критериев, «обратным ходом» можно уточнить значения весовых коэффициентов так, чтобы полученные оптимумы совпа-

В общем случае классическая задача оптимизации по двум критериям неразрешима, поскольку функции $-Q, L$ могут иметь существенно различные (отклоняющиеся более чем на 10%) точки минимума. Однако в этом конкретном случае опытным путём доказана разрешимость задачи в окрестности точки $L^* \approx 77,5, \alpha^* \approx 16,0$. Это удобно сделать методом вычислительного эксперимента, покрыв указанную окрестность сетью с шагом (диаметром сети) $h = 0,1$ и выполнив соответствующие расчёты в узлах сети.

Обобщённый показатель функционирования F , характеризующий изменение комплекса показателей установки по очистке картофеля, введён посредством свёртки показателей Q и E

дали, то есть получим поправку:

$$b_Q = 0,26 + \varepsilon_Q; b_E = 1,00.$$

В дальнейшем вычислительными методами найдена поправка $\varepsilon_Q = 0,02845$ и получены более точные значения весовых коэффициентов:

$$b_Q = 0,28845; b_E = 1,00.$$

Обобщённый критерий эффективности – минимум обобщённого показателя функционирования

$$F(L, \alpha, H, \omega, K, M) \rightarrow \min,$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 60 \leq L \leq 90, \\ 14 \leq \alpha \leq 22, \\ 50 \leq H \leq 70, \\ 350 \leq \omega \leq 450, \\ 1 \leq K \leq 3, \\ 1,360 \leq M \leq 8,045. \end{array} \right.$$

Выполнение данного критерия реализуется алгоритмом движения точки к оптимуму по гиперповерхности 7-мерного пространства. Выбрав конкретные значения K' , M' , соответствующие классу, начальной массе загрязнённого картофеля, понизим размерность задачи на 2

$$F(L, \alpha, H, \omega, K', M') \rightarrow \min, \\ \left\{ \begin{array}{l} 60 \leq L \leq 90, \\ 14 \leq \alpha \leq 22, \\ 50 \leq H \leq 70, \\ 350 \leq \omega \leq 450. \end{array} \right.$$

Для картофеля среднего размера и загрязнённости, с использованием пакета численной оптимизации Optimization системы Maple, установлено, что минимум из всех значений обобщённого показателя $F = -0,33261$ ед. соответствует показателям производительности установки $Q = 1,68029$ т/ч, удельной энергоёмкости $E = 0,11083$ Вт/т и достигается при следующей комбинации конструктивных, технологических, режимных параметров: длина лопатки $L^* = 77,3063 \approx 77,3$ мм, угол наклона лопатки $\alpha^* \approx 16,2084 \approx 16,2^\circ$, шаг установки лопатки $H = 69,97383 \approx 70$ см, частота вращения диска $\omega = 450,0000 = 450$ мин⁻¹.

Выводы

1. Разработанные модели изменения производительности и удельной энергоёмкости процесса очистки картофеля от загрязнений в зависимости от конструктивных, технологических и режимных параметров функционирования установки, предложенные критерии производственной и энергетической эффективности, производственной и энергетической устойчивости, а также обобщённый критерий эффективности позволили при заданном типе сырья провести серию вычислительных экспериментов по подбору области их допустимых изменений и поиску допустимых для практики оптимальных сочетаний – теоретическому и практическому обоснованию оптимума.

2. В результате компьютерного моделирования, постановки дополнительных уточняющих экспериментов и оптимизации системы конструктивных, технологических режимных параметров функционирования установки по очистке карто-

феля от почвенных загрязнений получен следующий оптимум: обобщённый показатель $F = -0,33$ ед., производительность установки $Q = 1,68$ т/ч, удельная энергоёмкость $E = 0,11$ Вт/т, длина лопатки $L = 77,3$ мм, угол наклона лопатки $\alpha = 16,2^\circ$, шаг установки лопатки $H = 70$ см, частота вращения горизонтального диска $\omega = 450$ мин⁻¹.

Литература

1. *Draper, Norman R. and Smith, Harry.* Applied Regression Analysis. – New York: Wiley, 1998. – 3rd ed.
2. *Montgomery, Douglas C.* Introduction to Statistical Quality Control. – 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1991.
3. *Stuart, Alan, and Ord, Keith.* Kendall's Advanced Theory of Statistics. Distribution Theory. – London: Edward Arnold, 1998. – 6th ed. – Vol. 1.
4. *Долбаненко В.М., Селиванов А.Л.* Оптимизация режимов и параметров устройства для сухой очистки корнеклубнеплодов // Вестник КрасГАУ. – 2008. – № 4. – С. 210–215.
5. *Дусенов М.К., Мухин В.А.* Анализ принципов действия устройств для сухой очистки корнеплодов // Мат-лы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию со дня рожд. проф. В.Ф. Дубинина. – Саратов: Изд-во Саратов. ГАУ, 2010. – С. 145–148.
6. *Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика для инженеров и научных работников. – М.: Физматлит, 2012. – 816 с.
7. Компьютерные технологии при проектировании и эксплуатации технологического оборудования: учеб. пособие / *Г.В. Алексеев, И.И. Бриденко, В.А. Головацкий* [и др.]. – СПб.: ГИОРД, 2012. – 256 с.
8. *Моисеев Н.Н.* Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981. – 448 с.
9. *Неверов Д.А.* Сравнительная характеристика различных типов картофелесортировальных машин // Проблемы и перспективы развития сельского хозяйства России: мат-лы Всерос. науч.-практ. конф. – Саратов: Изд-во Саратов. ГАУ, 2008. – 259 с.
10. Патент № 161769 RU, МПК А01D 33/08 (2006.01). Устройство для сухой очистки корнеклубнеплодов / *Ю.Д. Шпирук, В.В. Матюшев, И.А. Чаплыгина.* – Заявка № 2015139018/13, 11.09.2015. – Оpubл. 10.05.2016, Бюл. № 13.

11. Численные методы при моделировании технологических машин и оборудования: учеб. пособие / Г.В. Алексеев, Б.А. Вороненко, М.В. Гончаров [и др.]. – СПб.: ГИОРД, 2014. – 200 с.
6. Kobzar' A.I. Prikladnaja matematicheskaja statistika dlja inzhenerov i nauchnyh rabotnikov. – M.: Fizmatlit, 2012. – 816 s.
7. Komp'yuternye tehnologii pri proektirovanii i jekspluatacii tehnologicheskogo oborudovanija: ucheb. posobie / G.V. Alekseev, I.I. Bridenko, V.A. Golovackij [i dr.]. – SPb.: GIORД, 2012. – 256 s.

Literatura

1. Draper, Norman R. and Smith, Harry. Applied Regression Analysis. – New York: Wiley, 1998. – 3rd ed.
2. Montgomery, Douglas C. Introduction to Statistical Quality Control. – 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1991.
3. Stuart, Alan, and Ord, Keith. Kendall's Advanced Theory of Statistics. Distribution Theory. – London: Edward Arnold, 1998. – 6th ed. – Vol. 1.
4. Dolbanenko V.M., Selivanov A.L. Optimizacija rezhimov i para-metrov ustrojstva dlja suhoj ochistki korneklubneplodov // Vestnik KrasGAU. – 2008. – № 4. – S. 210–215.
5. Dusenov M.K., Muhin V.A. Analiz principov dejstvija ustrojstv dlja suhoj ochistki korneplodov // Mat-ly Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvjashh. 70-letiju so dnja rozhd. prof. V.F. Dubinina. – Saratov: Izd-vo Saratov. GAU, 2010. – S. 145–148.
8. Moiseev N.N. Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza. – M.: Nauka, 1981. – 448 s.
9. Neverov D.A. Sravnitel'naja harakteristika razlichnyh tipov kartofelesortiroval'nyh mashin // Problemy i perspektivy razvitija sel'skogo hozjajstva Rossii: mat-ly Vseros. nauch.-prakt. konf. – Saratov: Izd-vo Saratov. GAU, 2008. – 259 s.
10. Patent № 161769 RU, MPK A01D 33/08 (2006.01). Ustrojstvo dlja suhoj ochistki korneklubneplodov / Ju.D. Shpiruk, V.V. Matjushev, I.A. Chaplygina. – Zajavka № 2015139018/13, 11.09.2015. – Opubl. 10.05.2016, Bjul. № 13.
11. Chislennye metody pri modelirovanii tehnologicheskikh mashin i oborudovanija: ucheb. posobie / G.V. Alekseev, B.A. Voronenko, M.V. Goncharov [i dr.]. – SPb.: GIORД, 2014. – 200 s.

