

УДК 664.03, 664.08

## **Машины и аппараты с импульсным воздействием для пищевой промышленности**

Головацкий В.А.

gva54@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный университет  
низкотемпературных и пищевых технологий

*В настоящее время повышение производительности, снижение энергопотребления, повышение надежности применяемого технологического оборудования являются важнейшими показателями современного научно-технического прогресса. В этой связи, поиск путей, решающих данную проблему, является чрезвычайно актуальным. В работе показано, что значительно увеличить производительность технологического процесса переработки овощей и измельчения пищевого сырья позволяет использование импульсного воздействия и новых абразивных рабочих органов.*

Ключевые слова: импульсное воздействие, переработка зерна, новые рабочие органы.

## **Cars and devices with pulse influence for the food-processing industry**

**Golovatsky V. A., gva54@mail.ru**

*Now productivity increase, power consumption decrease, increase of reliability of the applied process equipment is the major indicator of modern scientific and technical progress. Thereupon, search of the ways solving the given problem, is extremely actual. In work it is shown what considerably to increase productivity of technological process of processing of vegetables, crushing of food raw materials use of pulse influence and new abrasive working bodies allows.*

Keywords: pulse influence, the grain processing, new working bodies.

Основными направлениями совершенствования машин и аппаратов в пищевой промышленности являются повышение производительности, снижение энергопотребления и количества отходов, повышение надежности, интенсификация технологических процессов.

Решение данной проблемы возможно за счет применения в оборудовании и технологических процессах импульсного воздействия.

Проведенный обзор литературы и анализ практического опыта свидетельствуют о том, что применяемые в настоящее время абразивные вкладыши на основе зерна карбида кремния и органических связок не могут обеспечить выполнение поставленных условий. Более того, придя в овощечистительное оборудование более 20 лет назад, они уже давно морально устарели и не отвечают современным требованиям ни по надежности, ни по качеству получаемого после очистки полуфабриката, содержащего отдельные частицы разрушившегося абразива.

Вместе с тем, во многих областях машиностроения и, в первую очередь, в станкостроении, успешно внедряется, так называемый, многолезвийный режущий инструмент, изготавливаемый методами гальваностегии, путем закрепления металлической связкой на металлической подложке высокопрочных абразивных зерен. Такой инструмент, воздействуя на обрабатываемый объект одновременно многими режущими кромками, прочно закрепленными на подложке, имеет большую долговечность и обеспечивает “мягкий” режим поверхностного слоя материала. Широкие возможности по дисперсности применяемого абразивного зерна, позволяет в большом диапазоне менять глубину снимаемого слоя в одном акте обработки.

При проведении исследований для определения характеристик шероховатости клубней овощей, очищенных разными рабочими органами брали пластины толщиной 2 мм, вырезанные в плоскости, проходящей через центр клубня. Периметр этих пластин изучался под микроскопом с измерительной сеткой, где при увеличении  $\times 10$  определялись соответствующие параметры. Анализ полученных данных свидетельствует о снижении шероховатости поверхности овощей и как следствие улучшению их качества.

Проведенное рассмотрение теоретических предпосылок совершенствования рабочих органов овощечистительных машин с абразивными терочными поверхностями позволило рекомендовать использование новых конструкционных материалов и технологий, позволяющих стабилизировать важнейшие характеристики этих поверхностей.

Одним из перспективных направлений совершенствования абразивных рабочих органов овощечистительных машин является применение для их изготовления вышеуказанного метода гальваностегии.

Суть этого метода состоит в том, что в гальваническую ванну в качестве катода помещают корпус рабочего органа, с поверхностью которого соприкасается абразивное зерно. Положительные ионы, например, никеля, проникают через толщу абразивного зерна, достигают катода и, восстанавливаясь на нем, создают растущий слой металла – связки. При этом получают мелкозернистые, плотные, неотслаивающиеся покрытия, отвечающие требованиям в зависимости от условий эксплуатации.

В настоящее время в различных областях промышленности широко применяют абразивный инструмент, изготовленный методом гальваностегии. Это и шлифовальные головки, отрезные круги с наружной и внутренней

режущими кромками, различные сверла, правящие ролики и блоки, машинные и ручные притиры, напильники и надфили. Не менее важное значение имеют специальные виды инструментов: ленточные пилы, стоматологический инструмент, хирургические иглодержатели и щипцы, режущий инструмент проволочного типа, барабаны и другой инструмент оригинальной конструкции.

При изготовлении абразивного инструмента методом гальваностегии может быть использован широкий спектр материалов.

В качестве основной характеристики шероховатости в соответствии с ГОСТ 2789-73 выбирали величину

$$R_z = \frac{1}{5} \cdot \left( \sum_{i=1}^5 |H_{i_{\max}}| + \sum_{i=1}^5 |H_{i_{\min}}| \right), \quad (1)$$

где  $H_{i_{\max}}$  - отклонения пяти наибольших максимумов профиля;

$H_{i_{\min}}$  - отклонения пяти наибольших минимумов профиля на базе 8 мм.

Зависимость этой характеристики для срезов, от важнейших конструктивных параметров: ширины терочной полосы ( $h$ ), расстояния между полосами ( $\Delta$ ) и размера использованного зерна получили следующим образом.

Сначала исследовалась зависимость  $R_z$  от  $h$  и  $\Delta$ .

С этой целью изготавливались образцы с шириной терочных полос 13, 10, 7 и 4 мм. Причем для каждой выбранной ширины полос варьировалось межполосное расстояние  $\Delta$ . Для разных образцов рабочих органов это расстояние брали 2, 5, 10 и 15 мм. Замеры шероховатости производили на трех клубнях, очищенных каждым из испытываемых рабочих органов на основе зерна 24A40.

Результаты обзора литературных данных, анализ теоретических предпосылок создания новых абразивных рабочих органов для овощечистительных машин позволили в качестве принципиальной схемы выбрать схему многолезвийного абразивного инструмента на основе металлической связки и абразивных частиц электрокорунда белого.

Предварительные исследования макетного образца рабочего органа, нанесенной на нее связкой на основе  $N_i$  и электрокорунда белого, выявили в качестве основных параметров, влияющих на эксплуатационные характеристики рабочего органа, представляющего для машин непрерывного действия стальную пружину с нанесенным методом гальваностегии абразивным покрытием (рис. 1), два: отношение диаметра сечения витка к шагу пружины  $\frac{d}{t}$  и относительный размер абразивных частиц  $\frac{a}{d}$ .

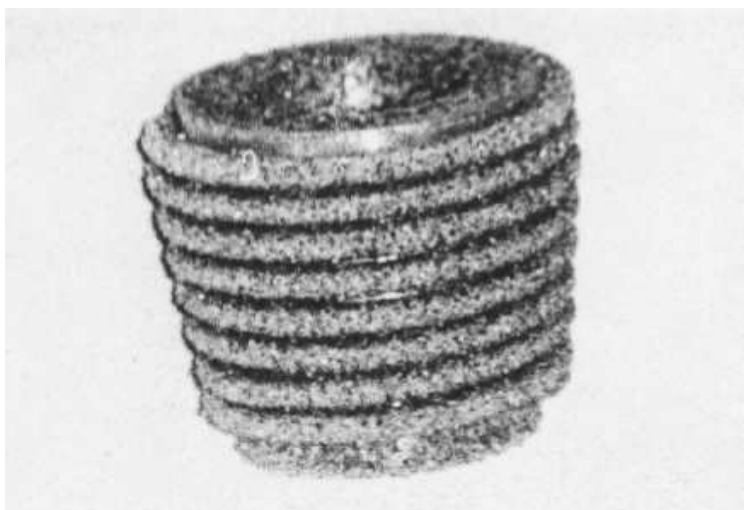


Рис. 1. Макетный образец рабочего органа картофелечистки непрерывного действия

( $\frac{d}{t}$  - отношение диаметра проволоки к шагу пружины аналогично отношению  $\frac{\Delta}{h}$ )

При этом обнаружены интервалы, в которых это влияние сказывается наиболее ощутимо. Для первого из названных параметров это

$$0,6 < \frac{d}{t} < 0,8 ,$$

а для второго

$$0,05 < d < 0,11$$

(2)

Для детального исследования влияния указанных параметров на эксплуатационные характеристики для разработки рекомендаций по проектированию рабочих органов картофелечисток целесообразно провести факторный эксперимент, выбрав указанные выше интервалы в качестве интервалов варьирования изменяемых факторов  $\frac{d}{t}$  и  $\frac{a}{d}$ . На первом этапе проведения такого эксперимента будем искать зависимость эксплуатационных параметров рабочих органов, принятых в качестве функций отклика, от варьируемых параметров в виде

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 \quad (3)$$

Для выбранных модели и интервалов варьирования нормированные переменные проводимого полного факторного эксперимента представляются следующим образом

$$X_1 = \frac{\frac{d}{t} - 0,7}{0,1} ; \quad X_2 = \frac{\frac{a}{d} - 0,08}{0,03}$$

Достаточно высокая точность поддержания выбранных факторов на заданных уровнях, выявленная в ходе предварительных исследований, позволяет для дублирования ограничиться тремя параллельными опытами.

Рандомизировав последовательность опытов при помощи таблицы случайных чисел для устранения влияния случайных погрешностей, получали матрицы планирования эксперимента.

После испытания образцов, результаты заносились в столбцы, отведенные для функций отклика  $Y_1$  - качество очистки;  $Y_2$  - время наработки до снижения производительности опытной машины для 95%.

Для получения статистической достоверности математической модели при анализе экспериментальных данных проверялась однородность дисперсий выборок функций отклика  $Y_1$  и  $Y_2$ . Для этой цели вычислялось значение критерия Фишера по формуле:

$$F_p = \frac{\max\{S_{yi}\}}{\min\{S_{yi}\}} \quad (4)$$

Для экспериментальных данных это значение оказалось равным 4,0, что значительно меньше табличного значения, равного 9,28 для доверительной вероятности 95%. Такое соотношение между расчетным и табличным значениями критерия Фишера свидетельствует о воспроизводимости эксперимента, что дает возможность коэффициенты модели вычислить по формулам

$$a_0 = \frac{\sum_{j=1}^M \bar{Y}_j}{M}; \quad a_j = \frac{\sum_{j=1}^M \bar{Y}_j X_j}{M}; \quad a_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^M \bar{Y}_j X_{ij}}{M}, \quad (5)$$

где  $X_j, X_{ij}$  - столбцы элементов матрицы планирования, причем для коэффициента взаимодействия  $a_{ij}$ ; этот столбец получают перемножением соответствующих столбцов нормированных факторов;  $\bar{Y}_j$  - среднеарифметическое значение для каждой из функций отклика по трем параллельным опытам;  $M$  - число разных экспериментов ( $M = 4$ ).

Вычисления по формулам 5 для проведенного эксперимента дали следующие оценки коэффициентов уравнений регрессии:

для  $y_1 - a_0 = 94,88; a_1 = 1,03; a_2 = 0,93; a_{12} = -0,03;$

для  $y_2 - a_0 = 1482,5; a_1 = 42,5; a_2 = 47,5; a_{12} = 7,5.$

В соответствии с проведенными вычислениями оценки уравнения регрессии записываются в виде:

$$\left. \begin{aligned} \hat{y}_1 &= 94,88 + 1,03X_1 + 0,93X_2 - 0,03X_1X_2 \\ \hat{y}_2 &= 1482,5 + 42,5X_1 + 47,5X_2 + 7,5X_1X_2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Уравнения регрессии, построенные по формулам (6) только в том случае соответствуют реальному процессу, когда член их вносит вклад, значимо отличающийся от случайных колебаний функций отклика. Это условие выполняется, если абсолютная величина коэффициента больше его

доверительного интервала, определяемого при помощи критерия Стьюдента со степенью свободы  $f = M(k - 1)$ , т.е.  $|a_i| > 2\Delta a$ ,

где

$$\Delta a = t_{1-\alpha/2} \cdot S_{aij} ; \quad S_{ai} = \frac{S_y}{\sqrt{k}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M S_{yi}^2}{k(M-1)}} , \quad (7)$$

$k$  - число параллельных опытов.

Вычисления по формулам (7) свидетельствуют о том, что в уравнениях регрессии (6) значимы лишь те члены, для которых выполняется условие

для  $y_1 - |a_i| \geq 0,3637$  ;

для  $y_2 - |a_i| \geq 26,3373$ .

В соответствии с последним требованием, пренебрегая членами взаимодействия  $X_1 X_2$  в уравнениях регрессии, как не вносящими существенных статистически достоверных поправок, уравнения регрессии переписываются в виде:

$$\left. \begin{aligned} \hat{y}_1 &= 94,88 + 1,03X_1 + 0,93X_2 ; \\ \hat{y}_2 &= 1482,5 + 42,5X_1 + 47,5X_2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Последним шагом, предшествующим использованию полученных экспериментально соотношения, является проверка его адекватности. Эта проверка позволяет судить о том, не отброшены ли в процессе обработки результатов величины, существенные для достоверного воспроизведения полученной зависимостью реального процесса и правильно ли выбрана искомая математическая модель. Она заключается в вычислении расчетного значения критерия Фишера и его сравнении с табличным. Расчетное значение определяется соотношением:

$$F_p = \frac{\max\{S_{ag}^2 \cdot S_y^2\}}{\min\{S_{ag}^2 \cdot S_y^2\}} \quad \text{при} \quad S_{ag} = \frac{\sum_{i=1}^M (y_i - y_{pi})^2}{k(M-1)} , \quad (9)$$

где  $y_p$  - рассчитанное по уравнениям (8) значения функций отклика  $y_1$  и  $y_2$  ;  $S_y^2$  - дисперсия среднего значения из (7);  $k$  - число коэффициентов в уравнении (8).

Пользуясь данными экспериментов и результатами произведенных ранее вычислений для расчетного критерия Фишера, находим  $F_{p1} = 85,7143$ ;  $F_{p2} = 14,2222$ . Для доверительной вероятности 95% и соответствующих степеней свободы числителя и знаменателя табличное значение критерия Фишера оказалось равным 12,6744.

Соотношение  $F_p > F$  свидетельствует о том, что выбранная на первом этапе линейная математическая модель неадекватна реальной зависимости эксплуатационных характеристик рабочих органов картофелеочистительной машины от варьируемых в эксперименте факторов.

Для отыскания зависимости адекватной реальной достроим план эксперимента до центрального композиционного рототабельного. Были определены матрица планирования и некоторые вспомогательные величины. Зависимости  $y_1$  и  $y_2$  от варьируемых параметров в этом случае будем искать в виде

$$f = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 \quad (10)$$

Дисперсию единичного опыта для данных приведенной таблицы вычислим по результатам испытаний образцов, изготовленных для величин факторов, отвечающих центру плана по формуле:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{n=1}^{n_0} (Y_n^0 - \bar{Y}^0)^2}{n_0 - 1}, \quad \text{где} \quad \bar{Y}^0 = \frac{\sum_{n=1}^{n_0} Y_n^0}{n_0} \quad (11)$$

Численное значение этой дисперсии оказалось равным 0,025. Для вычисления оценок коэффициентов уравнения регрессии (11) далее использовали следующие зависимости

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= 0,2 \sum_{i=1}^N y_i - 0,1 \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^N x_{ij}^2 y_i ; \\ b_j &= 0,125 \sum_{i=1}^N x_{ji} y_i ; \quad b_{nj} = 0,25 \sum_{i=1}^N x_{ni} \cdot x_{ji} \cdot y_i ; \quad n \neq j \\ b_{ii} &= 0,1251 \sum_{i=1}^N x_{ji}^2 y_i + 0,0187 \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^N x_{ij}^2 y_i - 0,1 \sum_{i=1}^N y_i \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Вычисления по приведенным соотношениям привели к следующим результатам:

для  $y_1 - b_0 = 98,1$ ;  $b_1 = 1,0067$ ;  $b_2 = 0,9567$ ;  $b_{12} = -0,025$ ;  $b_{11} = -1,1059$ ;  $b_{22} = -2,1067$

для  $y_2 - b_0 = 1616$ ;  $b_1 = 41,1945$ ;  $b_2 = 46,1655$ ;  $b_{12} = -3$ ;  $b_{11} = -78,51$ ;  $b_{22} = -53,49$

Для того, чтобы записать уравнения регрессии, далее необходимо определить, все ли из вычисленных коэффициентов вносят существенный вклад в значения функций отклика, т.е. все ли они значимы. С этой целью определялись дисперсии вычисленных коэффициентов

$$S_{b_0}^2 = 0,2 S_y^2 ; \quad S_{b_j}^2 = 0,125 \cdot S_y^2 ; \quad S_{b_n}^2 = 0,25 S_y^2 ; \quad S_{b_{jj}}^2 = 0,1438 \cdot S_y^2 \quad (13)$$

Вычисляя указанные дисперсии, имеем

$$y_1 : S_{b_0}^2 = 0,005 ; \quad S_{b_j}^2 = 0,0031 ; \quad S_{b_{mj}}^2 = 0,0063 ; \quad S_{b_{jj}}^2 = 0,0036 ;$$

$$y_2 : S_{b_0}^2 = 26 ; \quad S_{b_j}^2 = 16,25 ; \quad S_{b_{mj}}^2 = 32,5 ; \quad S_{b_{jj}}^2 = 18,694 .$$

Значимость коэффициентов, как и ранее, определялась по зависимостям (7). В рассматриваемом случае для 95% доверительной вероятности и степени свободы  $f = n_0 - 1 = 4$ , значимым оказались:

для  $y_1 - b_0 = 98,1$ ;  $b_1 = 1,0067$ ;  $b_2 = 0,9567$ ;  $b_{11} = -1,1059$ ;  $b_{22} = -2,1067$ ;

для  $y_2 - b_0 = 1616$ ;  $b_1 = 41,1945$ ;  $b_2 = 46,1655$ ;  $b_{11} = -78,51$ ;  $b_{22} = -53,49$ .

Учитывая проведенные вычисления, уравнения регрессии записывали в виде

$$y_1 = 98,1 + 1,0067 X_1 + 0,9567 X_2 - 1,1059 X_1^2 - 2,1067 X_2^2 ;$$

$$y_2 = 1616 + 41,1945X_1 + 46,1655X_2 - 78,51X_1^2 - 53,49X_2^2 .$$

Полученные уравнения лишь в том случае имеют практическую ценность, когда адекватно описывают исследуемую зависимость. С целью проверки адекватности полученных уравнений регрессии вычисляли дисперсию адекватности

$$S_{ад}^2 = \frac{S_{оцм}^2 \cdot f_{оцм} - S_y^2 \cdot f_y}{f_{оцм} - f_y} ; \quad S_{оцм}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2}{N - l} \quad (14)$$

Адекватным уравнение регрессии признается, как известно, в том случае, когда

$$\frac{S_{ад}^2}{S_y^2} < F_{табл} ,$$

где  $F_{табл}$  - табличное значение критерия Фишера.

Для экспериментальных данных, уровня значимости 0,05 и соответствующих степеней свободы числителя и знаменателя, расчетное значение критерия Фишера значительно меньше табличного.

Полученные, таким образом, уравнения регрессии отображают реальные зависимости эксплуатационных характеристик новых абразивных рабочих органов картофелеочистительных машин типа КНА-600 от конструктивных параметров.

Для удобства использования полученных моделей рабочих органов при реальном проектировании нормированные факторы целесообразно перевести в физические переменные. С этой целью в полученные уравнения регрессии необходимо подставить выражения (3). После соответствующих преобразований получим

$$\left. \begin{aligned} T &= 11401,9 \cdot \frac{d}{t} + 9910,5 \cdot \frac{a}{d} - 7850 \cdot \left(\frac{d}{t}\right)^2 - 52322,2 \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^2 - 6990,5 \\ K &= 164,9 \cdot \frac{d}{t} + 406,4 \cdot \frac{a}{d} - 110,6 \cdot \left(\frac{d}{t}\right)^2 - 2340,8 \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^2 - 115,6 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Соотношения (15) могут служить для прогнозирования величин эксплуатационных характеристик рабочих органов по величине используемого абразивного зерна и шага выполненной абразивной спирали при известном диаметре используемой стальной проволоки. С другой стороны, для заранее заданных значений  $K_0$  и  $T_0$  могут быть подобраны величины  $\left(\frac{a}{d}\right)_0$  и  $\left(\frac{d}{t}\right)_0$ , удовлетворяющие заказчика по техническим и экономическим соображениям.

Таким образом, полученные экспериментальные уравнения регрессии могут служить математическими моделями новых абразивных рабочих органов картофелечисток, которые целесообразно использовать для разработки конкретных конструкций.

Наличие вторых степеней варьируемых переменных говорит об экстремальном характере полученных моделей и вызывает необходимость



исследования характера монотонности функций отклика в выбранных диапазонах изменения независимых параметров.

Для проведения такого исследования для функции отклика было построено графическое изображение, полученного уравнения регрессии.

Точное определение области экстремума, т.е. значений изменяемых параметров, при которых достигается максимальное качество очистки, определяется дифференцированием полученного уравнения.

$$\text{Для } X_1 \text{ имеем: } \frac{\partial Y_1}{\partial X_1} = 1,0067 - 2 \cdot 1,1059 \cdot X_1 = 0 ;$$

$$X_1 = \frac{\left(\frac{d}{t} - 0,7\right)}{0,1} = 0,4551 \text{ или } \frac{d}{t} = 0,7455 \quad (16)$$

$$\text{Для } X_2 \text{ имеем: } \frac{\partial Y_1}{\partial X_2} = 0,9567 - 2 \cdot 2,1067 \cdot X_2 = 0 ;$$

$$X_2 = \frac{\frac{a}{d} - 0,08}{0,03} = 0,2271 \text{ или } \frac{a}{d} = 0,0868 \quad (17)$$

При использовании проволоки  $d = 6$  мм экстремум по качеству очистки должен, таким образом, достигаться при шаге пружины  $t = 8$  мм и зернистости абразива  $a = 520$  мкм.

Характер монотонности, судя по знакам при квадратичных членах, для функции отклика  $Y_2$  аналогичен функции  $Y_1$ .

Дифференцирование по изменяемым переменным дает

$$\text{- для } X : \frac{\partial Y_2}{\partial X_2} = 46,1655 - 2 \cdot 53,49 \cdot X_2 = 0 ;$$

$$X_2 = 0,4315 \text{ или } \frac{a}{d} = 0,0929 ; \quad (18)$$

$$\text{- для } X : \frac{\partial Y_2}{\partial X_1} = 41,1945 - 2 \cdot 78,51 \cdot X_1 = 0 ;$$

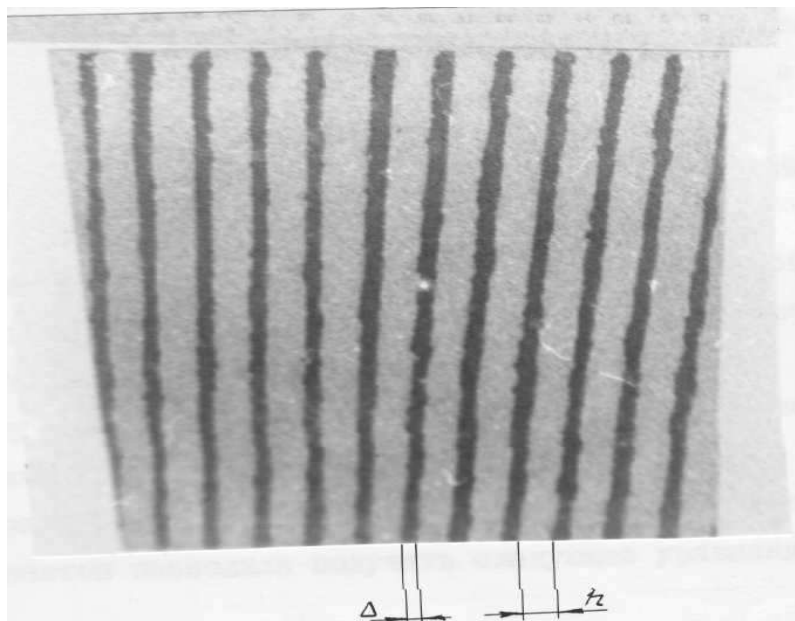
$$X_1 = 0,2624 \text{ или } \frac{d}{t} = 0,7262 . \quad (19)$$

$$X_1 = \left(\frac{d}{t} - 0,7\right) / 0,1 ; \quad X_2 = \left(\frac{a}{d} - 0,08\right) / 0,03$$

При использовании той же проволоки максимальное время до снижения производительности на 5% должны обеспечить рабочие органы с шагом пружины  $t = 8,3$  мм и зернистостью абразива  $a = 558$  мкм.

Выполненный анализ, с учетом нормативно определенной зернистости абразивного зерна, позволяет рекомендовать для картофелечисток типа КНА рабочие органы в виде пружины с сечением проволоки 6 мм и шагом 8 – 8,3 мм с закрепленным на ней методом гальваностегии зерном 24А50.

Исследования, аналогичные описанным выше, проведены и для рабочих органов в виде пластин, с закрепленными на них методом гальваностегии абразивными полосами (рис. 2).



Исследования проводились и для измельчения кофе на микромельнице МИМ, с последующим приготовлением его в аппарате Nivona NICR770. Испытания показали повышение качества приготовленного продукта за счет получения более мелкой фракции и увеличения присутствия экстрактивных веществ.

### **Список литературы**

1. Головацкий В.А. Совершенствование процессов и аппаратов для переработки пищевого сырья. – СПб.: НИЭУиД, 2008.-123с.
2. Алексеев Г.В., Головацкий Г.А., Краснов И.В. Некоторые направления повышения эффективности технологического оборудования для переработки пищевого сырья. – Известия СПбГУНиПТ, 2007, №3, С. 52-54.
3. А.с. № 1412710 «Рабочий орган картофелеочистительной машины» 01.04.1987. Опубл. 30.07.88. Бюл. № 28.
4. А.с. № 1629025 Головацкий В.А., и др. «Покрытие для рабочих органов картофелечистки» 22.10.1990.