

УДК 664.736-2

Экспериментальное определение оптимальной формы лезвийного инструмента для измельчения фруктов и овощей**Л.В. Минаева**, linya99@rambler.ru**Т.В. Минаева**, minaeva_tanya@list.ru**Е.В. Кравцова**, jenuska89@mail.ruД-р техн. наук **Г.В. Алексеев**, gva2003@mail.ru*Университет ИТМО**191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

Рассмотрены некоторые модельные представления о процессе лезвийного резания пищевого сырья, в частности, плодов лимона. Спроектировано и изготовлено устройство, на котором проведены эксперименты. Подобраны оптимальные параметры процесса измельчения: множество размеров кромки рабочего органа (линейные, угловые), множество параметров шероховатости; основное время, непосредственно затраченное на измельчение; стойкость инструмента; эффективная мощность и скорость; частота вращения рабочего органа. Исследованы задачи по определению формы рабочего органа – комплект серповидных ножей, расположенных друг относительно друга со смещением плоскостей на 90° с некоторым зазором между собой. Исходя из экспериментальных и теоретических исследований процесса разрезания, определена оптимальная форма лезвийного рабочего органа измельчителя: угол скольжения лезвия ножа $\tau = 60^\circ$, которому соответствует минимальная удельная работа, трансформированный угол заточки $\beta_1 = 7^\circ 38'$. Разработанная конструкция лезвийного инструмента позволяет интенсифицировать процесс измельчения, предотвратить проскальзывание и застревание продукта между ножами, а также между ножами и стенкой. Данная конструкция способствует увеличению экономической выгоды и сохранению качества получаемого продукта. Результаты исследований подтвердили корректность принятых модельных представлений и дали основание сформулировать практические рекомендации по реализации процесса резания лимонов для приготовления смузи.

Ключевые слова: динамическое измельчение; скользящее резание; лимон; смузи; лезвийный рабочий орган.

DOI: 10.17586/2310-1164-2016-9-3-32-38

Optimum form of the blade instrument for pulverizing fruits and vegetables**Lidiia V. Minaeva**, linya99@rambler.ru**Tatiana V. Minaeva**, minaeva_tanya@list.ru**Eugenia V. Kravtsova**, jenuska89@mail.ruD.Sc. **Gennady V. Alekseyev**, gva2003@rambler.ru*ITMO University**191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9*

The article deals with modelling for the process of food grinding, lemon in particular, by means of blades. An experimental device was designed. The optimum parameters of grinding process are chosen: edge sizes of the working body (linear, angular), roughness parameters, tool life, grinding time, effective grinding power and speed, rotation frequency of the working body. The form of the working body is analyzed. It is a set of sickle-shaped knives arranged with an offset of planes at 90° relative to each other with a clearance between them. On the basis of experimental and theoretical investigations of the grinding process the optimal form of the grinder working body blade are defined: the optimal slip angle of the knife blade $\tau = 60^\circ$ corresponding to the minimum specific work, transformed sharpening angle $\beta_1 = 7^\circ 38'$. The developed design of the blade tool allows to intensifying the process of grinding, preventing slippage and jamming of the product between the blades and between the blades and the wall. The design helps to increase economic benefits and to preserve the quality of the finished product. The research results confirm the correctness the model under investigation and allows making practical recommendations for lemon grinding in smoothie making.

Keywords: dynamic crushing; slide cutting; lemon; smoothie; blade working body.

Введение

Технологический процесс обработки пищевого сырья с целью разделения его на части, осуществляемый режущим инструментом, является одним из распространенных в пищевых производствах. При измельчении, придавая материалу заданную форму, размер и качество поверхности, существенным требованием является полное разделение начального объекта рабочим инструментом без каких-либо отходов [1, 2].

До разрушения в области контакта рабочего инструмента с материалом возникают пластическая и упругая деформации, величины которых зависят от строения материала, скорости его деформирования и физико-механических свойств. Предполагается, что по линии наибольших напряжений происходит разрушение при условии, что эти напряжения становятся равными временному сопротивлению материала. Разрушение происходит при растяжении или срезе в зависимости от состояния материала и характера приложения силы. Работа резания расходуется на создание пластической и упругой деформаций, и преодоление трения инструмента о разрезаемый материал. В общем случае резание как процесс содержит два этапа: предварительный – смятие материала до появления напряжения разрушения и естественное разделение.

В качестве режущих рабочих инструментов применяют ножи, имеющие различную конфигурацию и форму лезвий: двугранного одностороннего или двустороннего клина, клина с зубцами (называемые пилами) и в виде проволоки. Основными характеристиками, определяющими резание пищевых материалов, являются: силовые параметры (удельное усилие резания, удельная работа резания, условное напряжение резания); наиболее выгодные скорости резания и подачи, определяющие производительность процесса резания; качество обрабатываемой поверхности; влияние разрезаемого материала на затупление режущего инструмента. Из перечисленных к главным показателям относят усилие резания и его скорость. Поскольку особенности процесса резания сложны для чисто аналитического моделирования, некоторые параметры целесообразно определять экспериментально.

Объекты и методы исследований

В качестве объекта исследований в описанных экспериментах использовали плоды лимона как одного из видов пищевого сырья для изготовления смузи. Целями, поставленными при постановке данных исследований, являлись:

- выявление теоретических закономерностей, объясняющих основы процессов резания, которые нацелены на улучшение и увеличение результативности процесса;
- изучение особенностей аппаратов и методов, используемых при измельчении сырья в процессе изготовления «смузи»;
- анализ данных, полученных при экспериментальном изучении процесса резания, для формирования рекомендаций по модернизации устройства для резания, режимов и протеканию процесса измельчения сырья, при установлении наиболее подходящей формы лезвийного рабочего органа измельчителя.

В настоящий момент процесс измельчения овощей и фруктов для достижения необходимого размера, формы и непосредственно получения напитка осуществляется в основном посредством применения дробилок, соковыжималок, блендеров, относительно медленно вращающихся ножей и неподвижных решеток при непрерывной подаче сырья [3]. Наиболее распространено лезвийное резание фруктов и овощей. В его основу заложено относительное перемещение режущего инструмента и продукта. Направленность действия данного перемещения обуславливает характер процесса резания: рубящее или скользящее [4].

В зависимости от структурно-механических свойств, а также вида продукта, подвергающегося резанию и необходимой степени измельчения, разработаны ножи, отличающиеся по конструкции и форме, оптимально подходящие под определенные параметры процесса [5–7].

Основной задачей при выборе формы линии лезвия стала минимизация энергетических затрат в процессе измельчения материала, уменьшения усилия резания, устранения неравномерности распределения нагрузки на вал и контакта материала режущей кромкой по всей рабочей длине лезвия [8, 9]. Для ее решения при разработке конструкции рабочего органа используют следующие принципы [10]:

- в процессе измельчения материала применять лезвийный ножевой орган, так как резание с его помощью является наименее энергоемким;
- для минимизации усилий резания измельчение выполнять резанием со скольжением [11, 12].

Был проведен анализ схем плосковращательных режущих аппаратов с ножами прямолинейной формы, формы эксцентрической окружности и других. Эксперименты проводились на специально сконструированном устройстве, в основу которого были положены некоторые предварительные соображения.

Силы, действующие на плоскость (фаску) притупления ножа

$$N_1 = f \cdot (P_{сж} \sin \alpha_1 + P_{обж} \cos \alpha_1);$$

$$F_1 = N_1 \cdot f;$$

где f – коэффициент трения.

$$F_1 = f(P_{сж} \sin \alpha_1 + P_{обж} \cos \alpha_1);$$

$$f = \operatorname{tg} \phi;$$

$$N_1 = N_1' \cos \phi = \sqrt{P_{сж}^2 + P_{обж}^2} \cos \alpha_1 = f(P_{сж} \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_1 + P_{обж} \cos^2 \alpha_1) = f(P_{сж} \frac{1}{2} \sin 2\alpha_1 + P_{обж} \cos \alpha_1).$$

Элементарная сила сжатия $dP_{сж}$, действующая со стороны столбика площадью dF длиной, равной единице и стороной dx будет равна [13]:

$$dP_{сж} = E \cdot \varepsilon_{сж} \cdot dh_{сж} \cdot \operatorname{tg} \alpha_1;$$

$$\varepsilon_{сж} = \frac{h_{сж,x}}{h};$$

где $h_{сж,x}$ – сжатие на расстоянии x от вершины лезвия [14, 15].

Отсюда:

$$dP_{сж} = E \cdot \frac{h_{сж,x}}{h} \cdot dh_{сж} \cdot \operatorname{tg} \alpha_1;$$

$$P_{сж} = \frac{E \cdot \operatorname{tg} \alpha_1}{h} \int_{h_{сж,1} - l_1}^{h_{сж,1}} dh_{сж} = \frac{E \operatorname{tg} \alpha_1}{h} \left| \frac{h_{сж,x}^2}{2} \right| = \frac{E \operatorname{tg} \alpha_1}{h} \cdot \left(\frac{h_{сж,1}^2}{2} - \frac{(h_{сж,1} - l_1)^2}{2} \right).$$

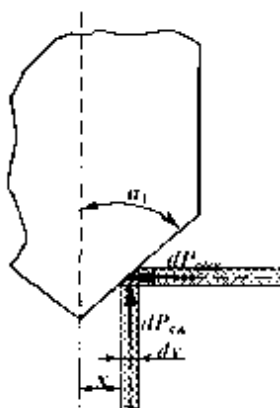


Рисунок 1 – Элементарные силы сопротивления сжатию материала лезвием

Принимаем $(h_{сж,1} - l_1) = h_{сж,2}$, тогда:

$$P_{сж} = \frac{E \cdot \operatorname{tg} \alpha_1}{2h} (h_{сж,1}^2 - h_{сж,2}^2) = \frac{E \cdot \operatorname{tg} \alpha_1}{2h} \cdot \alpha,$$

где $\alpha = (h_{сж,1}^2 - h_{сж,2}^2)$.

$$P_{\text{обж}} = \frac{E \cdot \mu}{h} \int_{h_{\text{сж.1}}}^{h_{\text{сж.1}}} h_{\text{сж.х}} \cdot dh_{\text{сж}} = \frac{E \cdot \mu}{h} \int_{h_{\text{сж.1}}}^{h_{\text{сж.1}}} h_{\text{сж.х}} \cdot dh_{\text{сж}} = \frac{E}{h} \mu \left| \frac{h_{\text{сж.х}}^2}{2} \right| = \mu \frac{E}{2h} \alpha.$$

Усилие на режущей кромке P_k равно:

$$P_k = \delta \cdot \sigma_p,$$

где δ – ширина кромки (длина принята за 1);

σ_p – разрушающее контактное напряжение под кромкой лезвия.

Члены последнего уравнения (проекции на оси):

$$F_1' = F_1 \cos \alpha_1 = f \left(\frac{E}{4h} \alpha \cdot \text{tg} \alpha_1 \cdot \sin 2\alpha_1 + \mu \cdot \frac{E}{2h} \alpha \cdot \cos^2 \alpha_1 \right);$$

$$N_1 \cdot \sin \alpha_1 = A_y = \frac{E}{2h} \text{tg} \alpha_1 \cdot \alpha \cdot \sin^2 \alpha_1 + \mu \frac{E}{4h} \alpha \cdot \sin 2\alpha_1.$$

Принимаем $\alpha_2 - \alpha_1 = \beta$ и $b = (h_{\text{сж.1}}^2 - h_{\text{сж.3}}^2)$, тогда

$$N_2 \sin \beta = C_y = \frac{E}{2h} \text{tg} \beta \cdot b \cdot \sin^2 \beta + \mu \frac{E}{4h} b \sin 2\beta;$$

$$F_2 \cos \beta = D_y = F_2' = f \left(\frac{E}{4h} \text{tg} \beta \sin 2\beta \cdot b + \mu \frac{E}{2h} b \cos^2 \beta \right);$$

$$N_3 \sin \alpha_3 = G_y = \frac{E}{2h} \text{tg} \alpha_3 \cdot c \cdot \sin^2 \alpha_3 + \mu \frac{E}{4h} c \sin 2\alpha_3,$$

где $c = (h_{\text{сж.3}}^2 - h_{\text{сж.А}}^2)$.

$$F_3 \cos \alpha_3 = H_y = F_3' = f \left(\frac{E}{4h} \text{tg} \alpha_3 \sin 2\alpha_3 \cdot c + \mu \frac{E}{2h} c \cos^2 \alpha_3 \right).$$

Лезвия ножей в форме эксцентрической окружности являются наиболее предпочтительными среди всех лезвий криволинейных форм. Данная форма, несколько уступая по эффективности, проще других криволинейных форм.

Для изготовления лезвийного рабочего органа аппарата для динамического измельчения лимонов ниже описаны основные значения и формул, с помощью которых он был спроектирован:

- уравнение окружности с радиусом R и эксцентриситетом e :

$$R^2 = l^2 + r^2 + 2er \cdot \cos \theta$$

- оптимальный угол скольжения $\tau = 60^\circ$
- трансформированный угол заточки $\beta_1 = 7^\circ 38'$
- формула усилия резания (2):

$$P_{\text{рез.ср}} = 75 \cdot 10^{-0,00129} \cdot v_{\text{рез}}^{2,26} + 40$$

- частота вращения рабочего органа $n = 3360$ об/мин
- скорость резания $v = 10,14$ м/с
- критическое усилие резания (в упрощенном виде):

$$P_{\text{кр}} = \delta \cdot \sigma_p + \frac{E}{2} \cdot \frac{h_{\text{сж}}^2}{h} \cdot \left[\tan \beta + f \cdot \sin^2 \beta + \mu \cdot (f + \cos^2 \beta) \right].$$

Полученные значения и соотношения позволили на основании свойств измельчаемого продукта (лимон), а также конструктивных параметров машины для измельчения определить угол наклона лезвия, угол его заточки, форму линии лезвия аппарата, а также проверить прочность выбранной конструкции режущего устройства.

Таким образом, разработанный лезвийный инструмент представляет набор серповидных ножей, которые закреплены друг относительно друга со смещением плоскостей на 90° . Ножи подобны друг

другу в соответствии с геометрией и размещены с некоторым зазором между собой. Эта конструкция позволяет интенсифицировать процесс размельчения, предотвратить проскальзывание и застревание материала между самими ножами, а также между ножами и стенкой.

Некоторые результаты исследований на установке, схема которой приведена на рисунке 2, приведены ниже на рисунке 3.

По оси X на графике отложено время хранения лимонов при комнатной температуре, а по оси Y, соответственно:

Y_1 – усилие резания, Н/см;

Y_2 – условный модуль упругости, кПа;

Y_3 – упруго-пластический модуль, кПа.

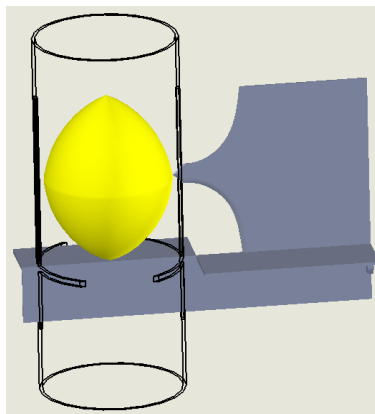


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки

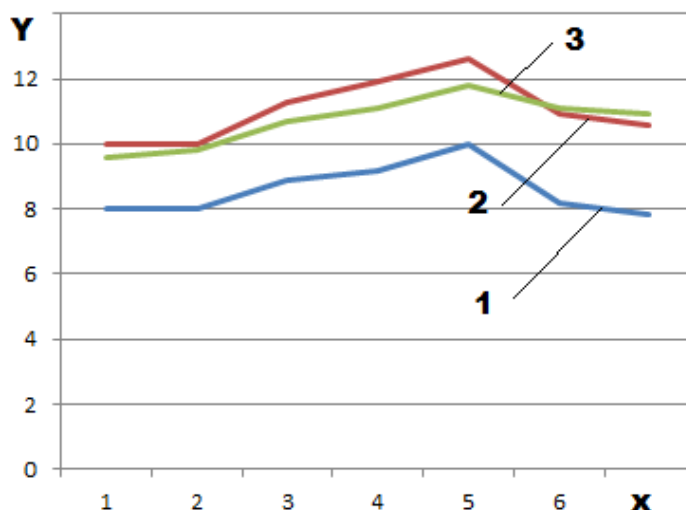


Рисунок 3 – Характер изменения важнейших характеристик лимона, влияющих на процесс резания: X – время, час; Y_1 – усилие резания, Н/см; Y_2 – условный модуль упругости, кПа; Y_3 – упруго-пластический модуль, кПа

Выводы

Анализ приведенных данных свидетельствует о том, что наилучшими параметрами процесса измельчения плодов лимона для производства «смузи» являются: Y_1 – усилие резания (7,9 Н/см), Y_2 – условный модуль упругости (10,3 кПа), Y_3 – упругопластический модуль (10,4 кПа), определяемые полученным графиком. Эти параметры меняются с течением времени хранения продукта. При этом выявлено, что усилие резания имеет экстремумы примерно в тех же временных промежутках хранения, что и основные упругопластические характеристики. С одной стороны, это подтверждает развиваемые модельные представления о процессе резания, с другой – позволяет сформулировать практические рекомендации по использованию разработанного лезвийного инструмента. С точки зрения минимизации усилия

резания, а следовательно, и основных энергетических параметров процесса целесообразно использовать лимоны хранящиеся не более 8 ч при комнатной температуре.

Литература

1. Минаева Л.В., Минаева Т.В. Интенсификация процесса измельчения плодов при производстве напитков типа смузи // Материалы I студенческого инновационного форума «Потенциал» (Санкт-Петербург, 17–18 декабря 2013). СПб., 2013. С. 88–90.
2. Минаева Л.В., Минаева Т.В., Синявский Ю.В. Интенсификация процесса измельчения плодов и овощей при производстве напитков с мякотью // III Международная научно-техническая конференция «Новое в технологии и технике функциональных продуктов питания на основе медико-биологических воззрений» (Воронеж, 30–31 октября, 2013): сб. тр. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та инж. техн., 2013. С. 295–298.
3. Кравцова Е.В., Алексеев Г.В. Исследование технологических особенностей процесса резания пищевых продуктов лезвийным инструментом // Научный журнал ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. № 3(21). С. 99–106.
4. Кравцова Е.В., Минаева Л.В., Минаева Т.В. Применение инновационных технологий в пищевой промышленности для эффективного измельчения плодов и овощей // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: сб. тр. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2013. С. 371–374.
5. Алексеев Г.В., Аксенова О.И. Использование математического моделирования для ресурсосберегающих пищевых производств // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. № 3. С. 1–10.
6. Ежова Л.А., Кравцова Е.В. Сила квазистатического резания пищевых продуктов как решение краевой задачи стесненной деформации // Синтез науки и общества в решении глобальных проблем современности (Уфа, 28 июля 2016): сб. докл. Уфа: Омега Сайнс, 2016. С. 38–40.
7. Алексеев Г.В., Бриденко И.И. Виртуальный лабораторный практикум по курсу «Процессы и аппараты пищевых производств». СПб.: Лань, 2011. 144 с.
8. Матвеева Н.А., Худошина А.В. Обработка лимонов для использования в производстве лимонного напитка // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 2.
9. Алексеев Г.В., Гончаров М.В., Аксенова О.И. Современные тенденции в решении задач неопределенности при проектировании технологического оборудования // Современные концепции развития науки: сб. науч. тр. Тамбов: Юком, 2015. Т. 1. С. 18–23.
10. Алексеев Г.В., Аксенова О.И., Новиков И.В. Моделирование технологических процессов для ресурсосбережения в пищевых производствах // Технические науки: проблемы и перспективы: сб. науч. тр. Уфа: Омега Сайнс, 2015. С. 3–6.
11. Пеленко В.В., Зуев Н.А., Ольшевский Р.Г., Азаев Р.А., Кузьмин В.В. Фундаментальные особенности процесса резания пищевых продуктов лезвийным инструментом // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2008. № 1.
12. Ушакова В.Н. Мойка и дезинфекция. Пищевая промышленность, торговля, общественное питание. М.: Профессия, 2008. 308 с.
13. Бредихин С.А. Технологическое оборудование мясокомбинатов. М.: Колос, 2010, 392 с.
14. Былинская Н.А., Леенсон Г.Х. Механическое оборудование предприятий пищевых производств. М.: КолоС, 2012, 295 с.
15. Попов В.Д., Стабников В.Н., Лисянский В.М. Процессы и аппараты пищевых производств. М.: Агропромиздат, 2015. 511 с.

References

1. Minaeva L.V., Minaeva T.V. Intensifikatsiya protsessy izmel'cheniya plodov pri proizvodstve napitkov tipa smuzi [Intensification of the grinding process in the production of fruit drinks like smoothies]. *Proceedings of the 1st Student Innovation Forum "Potential"* (St. Petersburg, 17–18 December 2013). St. Petersburg, 2013, pp. 88–90.
2. Minaeva L.V., Minaeva T.V., Sinyavskii Yu.V. Intensifikatsiya protsessy izmel'cheniya plodov i ovoshchei pri proizvodstve napitkov s mykot'yu [Intensification of the process of chopping the fruit and vegetables in the manufacture of beverages with pulp]. *Proceedings of the 3th International scientific-technical conference "Innovations in technology and technique of functional foods on the basis of the medical and biological views"* (Voronezh, October 30–31, 2013). Voronezh, Voronezh State University of Engineering Technology Publ., 2013, pp. 295–298.
3. Kravtsova E.V., Alekseev G.V. Issledovanie tekhnologicheskikh osobennostei protsessy rezaniya pishchevykh produktov lezviinym instrumentom [Investigation of the technological characteristics of cutting process the cutting

- edge of food instrument]. *Scientific journal NRU ITMO. Series: Processes and Food Production Equipment*. 2014, № 3(21), pp. 99–106.
4. Kravtsova E.V., Minaeva L.V., Minaeva T.V. Primenenie innovatsionnykh tekhnologii v pishchevoi promyshlennosti dlya effektivnogo izmel'cheniya plodov i ovoshchei [Application of innovative technologies in the food industry for the efficient crushing of fruits and vegetables]. *Technologies and equipment for chemical, biotech and food industry*. Collection of works. Biisk, Altai State Technical University Publ., 2013, pp. 371–374.
 5. Alekseev G.V., Aksenova O.I. spol'zovanie matematicheskogo modelirovaniya dlya resursosberegayushchikh pishchevykh proizvodstv [The use of mathematical modeling for resursosberegayuschih food production]. *Scientific journal NRU ITMO. Series: Processes and Food Production Equipment*. 2014, № 3, pp. 1–10.
 6. Ezhova L.A., Kravtsova E.V. Sila kvazistaticheskogo rezaniya pishchevykh produktov kak reshenie kraevoi zadachi stesnennoi deformatsii [The strength of quasi-static cutting food products as a solution to the boundary value problem of constrained deformation]. *Synthesis of science and society in addressing global problems*. Collection of works. Ufa, Omega Sains Publ., 2016, pp. 38–40.
 7. Alekseev G.V., Bridenko I.I. *Virtual'nyi laboratornyi praktikum po kursu «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv»* [Virtual laboratory workshop on the course "Processes and food production equipment"]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2011, 144 p.
 8. Matveeva N.A., Khudoshina A.V. Obrabotka limonov dlya ispol'zovaniya v proizvodstve limonnogo napitka [Handling lemons for use in the production of lemon drink]. *Scientific journal NRU ITMO. Series: Processes and Food Production Equipment*. 2013, № 2.
 9. Alekseev G.V., Goncharov M.V., Aksenova O.I. Sovremennye tendentsii v reshenii zadach neopredelennosti pri proektirovanii tekhnologicheskogo oborudovaniya [Modern trends in the solution of problems of uncertainty in the design of technological equipment]. *The modern concept of science development*. Scientific collection. Tambov, Yukom Publ., 2015, V. 1, pp. 18–23.
 10. Alekseev G.V., Aksenova O.I., Novikov I.V. Modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov dlya resursosberezheniya v pishchevykh proizvodstvakh [Modeling of technological processes for resource-efficient food production]. *Engineering science: problems and prospects*. Scientific collection. Ufa, Omega Sains Publ., 2015, pp. 3–6.
 11. Pelenko V.V., Zuev N.A., Ol'shevskii R.G., Azaev R.A., Kuz'min V.V. Fundamental'nye osobennosti protsessa rezaniya pishchevykh produktov lezviinym instrumentom [Fundamental characteristics of the cutting process the cutting edge of food instrument]. *Scientific journal NRU ITMO. Series: Processes and Food Production Equipment*. 2008, № 1.
 12. Ushakova V.N. *Moika i dezinfektsiya. Pishchevaya promyshlennost', trgovlya, obshchestvennoe pitanie* [Washing and disinfection. Food industry, trade, public catering]. Moscow, Professiya Publ., 2008, 308 p.
 13. Bredikhin S.A. *Tekhnologicheskoe oborudovanie myasokombinatov* [Technological equipment of meat processing plants]. Moscow, Kolos Publ., 2010, 392 p.
 14. Bylinskaya N.A., Leenson G.Kh. *Mekhanicheskoe oborudovanie predpriyatii pishchevykh proizvodstv* [Mechanical equipment of enterprises of food production]. Moscow, KoloS Publ, 2012, 295 p.
 15. Popov V.D., Stabnikov V.N., Lisyanskii V.M. *Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv* [Processes and food production equipment]. Moscow, Agropromizdat Publ., 2015, 511 p.

Статья поступила в редакцию 30.05.2016