

## ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КУТТЕРНЫХ НОЖЕЙ МЕТОДОМ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

А.Н. Матяс, А.М. Милюкова, Н.В. Бурносов

Физико-технический институт НАН Беларуси  
г. Минск, Республика Беларусь

*С целью повышения работоспособности ножей куттерных для измельчения фарша при производстве мясных и колбасных изделий применен новый метод магнитно-импульсной обработки (МИО). Проведены их испытания в условиях производства на ОАО «Агрокомбинат Джержинский».*

*По результатам проведенных исследований образцов, вырезанных из ножей, определены оптимальные режимы упрочняющей обработки. Металлографические исследования образцов ножей после магнитно-импульсной обработки и испытаний показали, что этот метод позволил за счет улучшения микроструктуры поверхностного слоя повысить период стойкости до первой переточки в 2 раза.*

**Ключевые слова:** магнитно-импульсная обработка, изменения структуры, микроструктура, режим упрочнения, куттерные ножи, хром, работоспособность

## INCREASING THE EFFICIENCY OF CUTTER KNIVES BY THE METHOD OF MAGNETIC- PULSE TREATMENT

A.N. Matsias, A.M. Miliukova, N.V. Burnosov

Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus  
Minsk, Republic of Belarus

*In order to increase the efficiency of cutter knives for mincemeat chopping at meat and sausage products manufacture, a new method of magnetic-pulse treatment (MPT) has been applied. The tests were carried out in the conditions of manufacture at OJSC "Agrokombinat Dzherzhinsky".*

*According to the results of samples study, cut out from the knives, optimal regimes of strengthening treatment were determined. Metallographic studies of knife patterns after magnetic-pulse treatment and tests are indicated, that this method allowed increasing the period of resistance up to the first regrinding in 2 times by improving a surface layer microstructure.*

**Keywords:** magnetic-pulse treatment, changes in the structure, microstructure, regime of hardening, cutter knives, chrome, working capacity

**E-mail:** kent1690@mail.ru

## Введение

В промышленности широко используются упрочняющие технологии, повышающие износостойкость деталей и инструментов: термообработка, химико-термическая обработка, электрофизические методы, в т.ч. лазерная обработка, электронно-лучевая обработка, ионно-плазменное напыление и др. Режущие свойства ножей обычно восстанавливают путем переточек режущих граней, тем самым увеличивая суммарный ресурс их работы. Благодаря повышению работоспособности инструмента уменьшается время простоя основного технологического оборудования; сокращается количество потребляемых инструментов и затраты на подготовку производства и наладку оборудования; повышается качество обработки и интенсификация режимов резания и другие показатели.

В Республике Беларусь и за рубежом активно развивается использование метода упрочнения магнитно-импульсным воздействием. Суть его состоит в том, что обработку готовых стальных изделий проводят воздействием импульсами электромагнитного поля определенной напряженности в магнитно-импульсной установке (МИУ) с использованием специальной оснастки с возможностью управления технологическими режимами импульсной обработки.

В лаборатории объемных гетерогенных систем Физико-технического института НАН Беларуси разработаны и изготовлены экспериментальные установки для исследования процесса магнитно-импульсной упрочняющей обработки (МИО), которые представлены на рис. 1.

МИО – это метод обработки металлов, при котором происходит комплексное воздействие на ферромагнитный материал электромагнитных и тепловых вихревых потоков, механических деформаций, магнитострикционных процессов.

Под воздействием МИО в металлической детали возникают вихревые токи, которые нагревают участки в области структурных неоднородностей и приводят к значительному повышению локальной температуры и возникновению механических напряжений, в результате чего в поверхностном слое детали происходит дробление зерен и образование однородной мелкодисперсной структуры. Установлено, что локальность нагрева тем выше, чем менее однородна микроструктура металла. Максимальная температура нагрева в области границ зерен в процессе МИО может достигать 1000 °С, что достаточно для осуществления процесса рекристаллизации. Вследствие адиабатического характера тепловыделения, которое связано с малой скоростью отвода тепла, в области зерна температура ферромагнитного материала становится близка к температуре Кюри и на границе превосходит ее. Таким образом, при локальном нагреве металла в присутствии импульсного магнитного поля, происходит комбинированное воздействие на его структуру [1].

К процессам, приводящим к упрочнению поверхности изделия под воздействием МИО вместе с тепловыми процессами за счет импульсного магнитного поля в металле происходит полярная ориентация спинов электронов атомов, которые расположены в области контакта зерен сплавов. При этом процессе деталь, находящаяся в импульсном магнитном поле, подвергается «сжатию». Электродинамические силы, которые возникают при обработке, уплотняют кристаллиты стали, вследствие чего происходит снижение



Рис. 1. Магнитно-импульсные установки для упрочняющей обработки

концентрации напряжений, уменьшается избыточная энергия, что улучшает механические свойства материала [2, 3].

Преимуществом применения в производстве МИО по сравнению с известными методами упрочнения является то, что геометрические параметры упрочненных изделий не меняются, не требуется проводить дополнительную механическую или термическую обработку, финишные операции, данный процесс отличается высокой производительностью, низким энергопотреблением, экологической безопасностью. Особенно высока эффективность использования данного метода для готовых изделий, например, закаленные заточенные ножи для пищевой промышленности, к которым трудно или невозможно применить другие известные методы упрочнения [4].

Установлено, что на технологические режимы МИО, обеспечивающие повышение износостойкости и улучшение качества поверхности стальных изделий, в сильной степени влияет химический состав стали и процентное содержание углерода, которое и обеспечивает высокую концентрацию карбидов и мелкодисперсную структуру металла.

### Материалы и методика исследования

Широко используемым материалом для изготовления режущих инструментов являются легированные стали с различным содержанием легирующего элемента хрома (Cr). Способность хрома образовывать карбиды делает его одним из активных карбидообразующих легирующих элементов. Хром повышает стойкость к коррозии и окислению, а также сопротивление к абразивному износу, обеспечивает повышение прочности сталей при повышенных температурах. Однако хром является антиферромагнетиком. Это свойство снижает его восприимчивость к воздействию магнитного поля [5, 6].

Известно, что формирование физико-механических свойств сталей, которые относятся к системе железо – углерод – хром, главным образом определяется содержанием хрома и углерода. Хромистые стали в зависимости от содержания углерода по структуре подразделяются на три класса: ферритный, мартенситный и мартенситно-ферритный. Эта структура нашла отражение в классификации хромистых коррозионностойких сталей по ГОСТ 5632-72. В табл. 1 представлены типы хромистых сталей с номинальным содержанием хрома 13,17 и 25–28 % [7].

Табл. 1

#### Состав основных химических элементов хромистых коррозионностойких сталей

Класс	Тип стали по содержанию хрома, %	Марка стали	Углерод, %	Хром, %
Ф	13	08X13	<0,08	12–14
М-Ф		12X13	0,09–0,15	
М		20X13	0,16–0,25	
М		30X13	0,26–0,35	
М		40X13	0,6–0,45	
Ф	17	12X17	≤0,12	16–18
Ф		08X17Т	≤0,08	
М		14X17H2*	0,11–0,17	
Ф	25/28	15X25Т	≤0,15	24–27
Ф		15X28	≤0,15	27–30

\*Содержит 1,5–2,5 % никеля

Известны промышленные рекомендации по выбору и назначению марок различных сталей для изготовления изделий в зависимости от содержания основного легирующего элемента, с учетом условий его эксплуатации. Стали, у которых хрома менее 12 %, не обладают высокой коррозионной стойкостью, эта сталь остается на уровне обыкновенных углеродистых. Однако при введении в сталь хрома свыше 12 % стойкость к коррозии в атмосфере и стойкость в других промышленных средах значительно возрастает. Стали с содержанием свыше 12 % хрома часто называют нержавеющими.

Стали с содержанием хрома 12–14 % являются нестабильными по свойствам и незначительные изменения в химическом составе приводят к переходу стали из одного класса в другой. Например, сталь 08X13 при максимальном содержании хрома и минимальном содержании углерода является ферритной, а при минимальном содержании хрома имеет гамма-альфа превращение. Стали с номинальным содержанием хрома 17, 25 и 28 % – 12X17, 15X25Т и 15X28, относятся к ферритному классу, структурой которых является феррит. Эти стали не имеют фазовых превращений.

Наиболее распространенными и дешевыми нержавеющими сталями являются стали мартенситного класса с 13 %-ным содержанием хрома: 20X13, 30X13, 40X13 и др. Эти стали имеют высокую твердость и повышенную прочность. Из них изготавливаются различные инструменты и детали, которые работают в активной коррозионной среде и обладают высокой коррозионной стойкостью, повышенной прочностью и износостойкостью (хирургический инструмент, детали пищевой промышленности, подшипники, пружины и другие детали).

Наиболее высокой коррозионной стойкостью обладают стали с 17 %-ным содержанием хрома ферритного класса: 12X17, 08X17Т и 14X17Н2. Благодаря высокому содержанию хрома, стали этого типа применяются как жаростойкие (окалиностойкие) при рабочих температурах до 900 °С [7]. Данные стали широко используются в пищевой промышленности как износостойкие, экологически безопасные и нетоксичные, сохраняющие необходимые параметры шероховатости поверхности в течение всего срока эксплуатации, что облегчает чистку и обслуживание.

При выполнении работ применяли следующие технические средства: магнитно-импульсная установка (МИУ) для осуществления МИО стальных образцов и опытной партии ножей из стали 40X13, микротвердомер ПМТ-3 для измерения микротвердости поверхностного слоя до и после МИО, металлографический комплекс МГК-1 на основе оптического микроскопа МКИ-2М. Приготовление шлифов, дюраметрические и металлографические исследования микроструктур образцов куттерных ножей производились по известным стандартным методикам.

### **Постановка задачи**

Анализ литературных источников, а также потребность мясокомбинатов в износостойком режущем инструменте, позволил обосновать выбор объекта исследования – куттерные ножи, применяемые в мясной отрасли промышленности, изготовленные из стали мартенситного класса с 13 %-ным содержанием хрома 40X13. Выбор материала для изготовления этих ножей в основном зависит от условий резания, вида перерабатываемого сырья и формы заточки.

Куттерные ножи – применяются для измельчения мясного фарша при производстве мясных и колбасных изделий на всех предприятиях по переработке мяса. Они изготавливаются из износостойкой высоколегированной нержавеющей стали с твердостью на режущей кромке 52–54 HRC. Нож куттера состоит из лезвия 1 с режущей кромкой 2 и посадочной части 3, фиксирующей положение ножа в головке

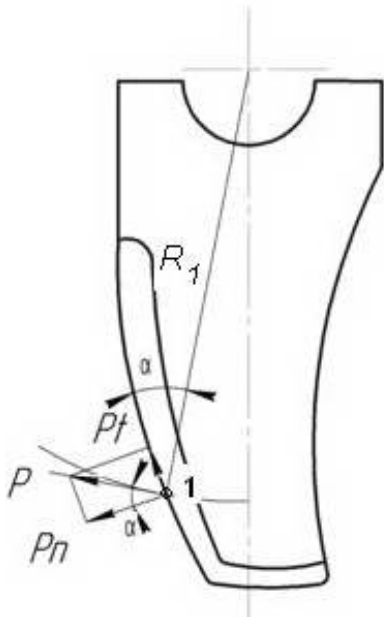


Рис. 2. Куттерный нож с линией лезвия в виде изогнутой линии

(рис. 2). Ножи для различных куттеров изготавливают различных типоразмеров с различной формой режущей кромки: «грань», «серп» или «парус» в зависимости от оборудования и размера чаши.

Во время работы любой куттерный нож сталкивается с мясным сырьем, и на него действует сила сопротивления  $P$ . На рис. 2 представлена схема влияния силы резания в точке 1, сила  $P$ , перпендикулярно направленная, соответственно с радиусом  $R_r$ . Сила раскладывается на нормальную ( $P_n$ ) и касательную (тангенциальную  $P_t$ ) [8, 9].

Величина этих сил будет меняться в зависимости от угла радиуса поворота ножа ( $\alpha$ ). В данном случае используют нож с углом наклона  $\alpha = 15\text{--}20^\circ$ .

Из рис. 2 видно, что при угле ( $\alpha$ )<sub>min</sub> сила  $P_t$  будет минимальной, а нормальная сила  $P_n$  – максимальной. Значение сил рассчитывают по формулам [9]:

$$P_n = P \cdot \cos(\alpha), \quad (1)$$

$$P_t = P \cdot \sin(\alpha). \quad (2)$$

Тангенциальная сила  $P_t$  позволяет обрабатывать соединительную ткань (хрящи, связки), которая намного плотнее и вязче мышечного волокна, с минимальными потерями энергии и меньшей нагрузкой на куттерный нож. Чем больше радиус куттерного ножа  $R_r$ , тем выше сила резания ( $P$ ) и линейная скорость. Кроме этого из-за центробежной силы, которая возникает при обороте чаши куттера, мясной фарш возле стенки чаши становится плотнее и гуще. Вследствие этого эффективность измельчения становится выше в крайней части ножа, но при этом сила сопротивления тоже возрастает. Технические параметры, конструкция и качество ножа должны соответствовать высоким требованиям испытываемых нагрузок [8].

Для качественного резания волокна сырья необходима линейная скорость ножа  $v = 110$  м/с. Этого можно добиться при оборотах ножа около  $n = 3000$  мин<sup>-1</sup> и радиусе чаши  $R = 350$  мм. Значение линейной скорости ножа рассчитывается по формуле:

$$v = 2\pi nR. \quad (3)$$

Вследствие этого в куттерах с меньшим литражом и меньшим радиусом чаши необходимо увеличить количество оборотов ножевой головки свыше  $n = 4000$  мин<sup>-1</sup>.

В процессе эксплуатации режущего инструмента основными дефектами являются изменение формы лезвия ножа и его абразивное изнашивание. Затупление ножа происходит при действии одновременно протекающих различных видов изнашивания и пластического формоизменения. Поэтому для обеспечения высокого качества куттерования, прежде всего, необходимо соблюдать правила хранения, транспортировки и заточки куттерных ножей. Очень важно придерживаться принципа холодной заточки. Недостаточное охлаждение водой, то есть сухое затачивание с замедленным охлаждением лезвия, ведет к образованию отжига режущей кромки (наблюдаются случаи понижения твердости до HRC 40).

Кроме трудоемкого процесса заточки куттерных ножей, их установка в куттер также является сложным процессом, который заключается в балансировке и выставлении необходимого зазора между ножами и чашей. На куттер могут устанавливаться до 8 куттерных ножей, которые по парам крепятся на планшайбах, как показано на рис. 3, и для того чтобы произвести замену одного ножа, т.к. изнашивание происходит неравномерно, необходимо произвести разборку всей конструкции.



Рис. 3. Конструкция установленных куттерных ножей

В этой связи особую актуальность приобретает проблема повышения износостойкости и долговечности режущих рабочих органов куттеров, которые подвергаются наиболее сильному изнашиванию. Увеличение периода работоспособности ножей способствует снижению количества заточек и демонтажа, что существенно повысит производительность оборудования, тем самым сократив затраты на покупку нового комплекта ножей.

### Результаты исследований и испытаний

По результатам проведенных исследований образцов, вырезанных из куттерных ножей из стали 40X13: их химического состава, указанного в табл. 1, измерений микротвердости и металлографического анализа структур до и после МИО, определены оптимальные технологические режимы упрочняющей обработки. На рис. 4 представлены микроструктуры образцов, вырезанных из куттерных ножей до и после МИО.

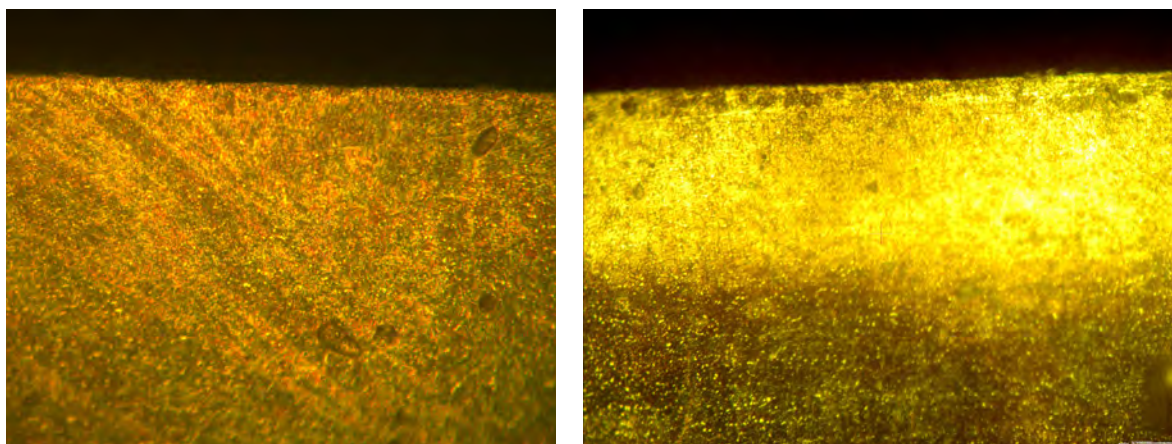


Рис. 4. Микроструктура образцов стали 40X13 из куттерных ножей до и после МИО:  
а – до обработки, б – после обработки

Металлографический анализ микроструктур образцов, вырезанных из куттерного ножа до и после МИО по оптимальному режиму, показал образование уплотненного слоя с мелкодисперсной структурой в поверхностном слое на глубину 20–40 мкм.

С целью повышения износостойкости проведена МИО опытной партии ножей куттерных (рис. 5) для рубки мяса (производство БОСК ПЛЮС, Россия) для ОАО «Агрокомбинат Дзержинский» (г. Фаниполь). Комплект куттерных ножей в количестве 6 штук из коррозионностойкой стали 40X13 обработали на установке МИУ-2 на плоском индукторе при энергии воздействия 8 кДж. После МИО ножей геометрические параметры, микротвердость поверхности, которая составляла 51,5 кг/мм<sup>2</sup> и шероховатость поверхности  $R_a = 0,2$  – не изменились.



Рис. 5. Нож куттерный для рубки мяса в куттере:  
1 – лезвие, 2 – режущая кромка, 3 – посадочная часть ножа

Испытания комплекта ножей после упрочнения МИО проводили на производстве ОАО «Агрокомбинат Дзержинский» в колбасном цеху на куттере LASKA KT 200 2V, который представлен на рис. 6.

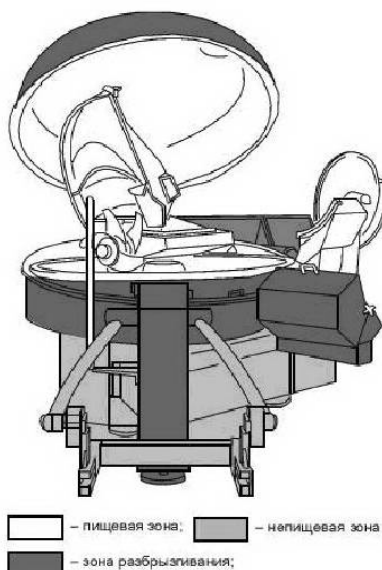


Рис. 6. Куттер LASKA KT 200 2V

Обычно демонтаж и первая переточка куттерных ножей без МИО проводится 1 раз в неделю. Опытная партия ножей после МИО проработала без переточки 2 недели, т.е. период работоспособности упрочненного МИО ножа увеличился в 2 раза.

### Заключение

Методом МИО была упрочнена опытная партия ножей куттерных для рубки мяса из коррозионностойкой стали 40X13 (производство БОСК ПЛЮС, Россия) без изменения их геометрических параметров и дополнительной механической обработки.

Металлографический анализ микроструктур до и после МИО показал образование поверхностного уплотненного слоя с мелкодисперсной структурой глубиной 20–40 мкм. Установлено увеличение периода работоспособности куттерных ножей после

МИО в среднем в 2 раза до первой переточки, что подтверждает целесообразность использования технологии упрочнения МИО.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аскинази, Б.М. Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой / Б.М. Аскинази. – Л.: Машиностроение, 1977. – 229 с.
2. Степанов, В.Г. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов / В.Г. Степанов, И.А. Шавров. – Л.: Машиностроение, 1975. – 278 с.
3. Алифанов, А.В. Физика процесса магнитно-импульсного упрочнения стальных изделий, расчет индукторов и параметров процесса / А.В. Алифанов, Д.А. Ционенко, А.М. Милюкова // Перспективные материалы и технологии / под общ. ред. В.В. Клубовича – Витебск: УО «ВГТУ», 2017. – Гл. 2. – С. 31–52.
4. Алифанов, А.В. Технология изготовления и упрочнения высоконагруженных деталей машиностроения / А.В. Алифанов, А.М. Милюкова, В.А. Томило. – Минск: Беларуская навука, 2014. – 321 с.
5. Материаловедение: учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов [и др.]; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – 8-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 648 с.
6. Полехина, Н.А. Закономерности фазовых превращений и изменения механических свойств в различных условиях обработки 12%-ных хромистых ферритно-мартенситных сталей: дис. канд. физико-математических наук: 01.04.07 / Н.А. Полехина. – Томск, 2015. – 132 л.
7. ГОСТ 5632-2014. Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки [Текст]. – Взамен ГОСТ 5632-72; введ. 01.04.2017 – Минск: Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь с 1 апреля 2017 г. – 56 с.
8. Груданов, В.Я. Моделирование и оптимизация процессов переработки сельскохозяйственной продукции / В.Я. Груданов, А.А. Бренч. – Минск: БГАТУ, 2017. – 280 с.
9. Акуленко, С. В. Влияние режимов куттерования мяса кур механической обвалки на его водосвязывающую способность / С. В. Акуленко, А. Л. Желудков // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2014. – Вип. 14, т. 1. – с. 73–80.

#### REFERENCES

1. Askinazi B.M. Uprochnenie i vosstanovlenie detalej ehlektromekhanicheskoy obrabotkoj [Hardening and restoration of parts by electromechanical processing]. Leningrad, Mechanical Engineering, 1977. 229 p. (in Russian)
2. Stepanov V.G, Shavrov I.A. Vysokoehnergeticheskie impul'snye metody obrabotki metallov [High-energy impulse methods of metal processing]. Leningrad, Mechanical Engineering, 1975. 278 p. (in Russian)
3. Alifanov A.V., Tsionenko D.A., Milyukova A.M. Fizika processa magnitno-impul'snogo uprochneniya stal'nyh izdelij, raschet induktorov i parametrov processa [Physics of the process of magnetic-pulse hardening of steel products, calculation of inductors and process parameters]. Perspective materials and technologies / under obshch. Ed. V.V. Klubovich - Vitebsk: «VSTU», 2017. Ch. 2. p. 31–52. (in Russian)
4. Alifanov A.V., Milyukova A.M., Tomilo V.A. Tekhnologiya izgotovleniya i uprochneniya vysokonagruzhennykh detalej mashinostroeniya [The technology of manufacturing and hardening of high-loaded engineering parts]. Minsk: Belaruskaya Navuka, 2014. 321 p. (in Russian)
5. Arzamasov B.N., Makrova V.I., Mukhin G.G. [et al.] Materialovedenie [Material Science]: A Textbook for Universities; Under the Society. Ed. B.N. Arzamasova, G.G. Mukhina. 8 th ed., A stereotype. Moscow: MSTU them. N.E. Bauman, 2008. 648 p. (in Russian)
6. Polokhina N.A. Zakonomernosti fazovykh prevrashchenij i izmeneniya mekhanicheskikh svojstv v razlichnykh usloviyah obrabotki 12%-nyh hromistyh ferritno-martensitnykh stalej [Regularities of phase transformations and changes in mechanical properties under different conditions of processing of 12 %-chromium ferritic-martensitic steels]: dis. Cand. physico-mathematical sciences: 01.04.07 / Tomsk, 2015. - 132 p. (in Russian)
7. GOST 5632-2014. Legirovannyye nerzhaveyushchie stali i splavy korrozionno-stojkie, zharostojkie i zharoprochnyye. Marki [Alloyed stainless steels and alloys are corrosion-resistant, heat-resistant and heat-resistant. Stamps]. - In exchange for GOST 5632-72; Enter. 01.04.2017, Minsk: State Committee for Standardization of the Republic of Belarus from April 1, 2017 - 56 p. (in Russian)
8. Grudanov V.Ya., Brench A.A. Modelirovanie i optimizatsiya processov pererabotki sel'skohozyajstvennoj produkcii [Modeling and optimization of processing of agricultural products]. Minsk: BSTU, 2017. 280 p. (in Russian)
9. Akulenko S. V., Zheludkov A. L. Vliyaniye rezhimov kutterovaniya myasa kur mekhanicheskoy obvalki na ego vodosvyazyvayushchuyu sposobnost' [Influence of regimes of cutting meat of mechanical debon chicken on its water-binding capacity]. Pratsi Tauriyskogo state agrotechnological university. - 2014. - Vip. 14, Vol. 1. - p. 73-80. (in Russian)

*Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 25.04.18*