

ТИММО АЛЕКСАНДРОВИЧ ГАВРИЛОВ

аспирант кафедры механизации сельскохозяйственного производства агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
gavrilov@psu.karelia.ru

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МЯСНОГО СЫРЬЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ РЕЗАНИЯ\*

Исследуется влияние скорости резания материалов животного происхождения на работу измельчения. Измельчение по своей роли в технологическом процессе и энергопотреблении является основной операцией приготовления кормов для сельскохозяйственных животных, вследствие чего исследование факторов, оказывающих наибольшее влияние на работу измельчения, становится актуальным. Одним из таких факторов и является скорость резания. Состояние исследований в этой области в настоящее время недостаточное для эффективной работы. Мы опираемся на данные, полученные в результате экспериментального исследования. Исследуемый материал, субпродукты говяжьи (физико-механические свойства: влажность 72,1–72,9%, плотность 1160–1180 кг/м<sup>3</sup>, температура 270–272 К), помещался на экспериментальную установку и перерезался при различных скоростях, от 5 до 40 м/с, шаг 5 м/с. По результатам были получены данные о влиянии скорости резания на работу измельчения. Установлено, что с увеличением скорости резания работа измельчения снижается. Кроме того, по результатам экспериментального исследования получена функциональная зависимость работы измельчения от скорости резания.

Ключевые слова: измельчение, работа, скорость, говядина

### ВВЕДЕНИЕ

Основными факторами, от которых зависит производительность оборудования для измельчения, энергоёмкость процесса и качество измельчения материалов, являются: скорость резания, угол заточки ножа, зазор в режущей паре, угол скольжения, параметры ножа и противорежущей пластины, параметры питателя [2].

Влияние скорости резания на энергоёмкость процесса – одна из основных закономерностей процесса измельчения кормов, причем под скоростью резания подразумевается скорость кромки лезвия ножа в данной точке в направлении резания. Поэтому связь энергоёмкости со скоростью резания является определяющей для технико-экономической оценки процесса измельчения. Почти во всех отраслях промышленности, где резание используется как процесс обработки материала, его скорость явилась предметом многосторонних экспериментальных и теоретических исследований [6].

По вопросу влияния этого фактора на процесс измельчения кормов до настоящего времени нет единого мнения. Результаты исследований, приведенные в различных источниках [2], [3], [4], [5], [6], [8], [10], очень противоречивы и часто не совпадают по своим значениям.

Так, Н. Е. Резник при рассмотрении измельчения листостебельной массы, Н. Ахметов – измельчения рисовой соломы, Н. А. Барсов – измельчения кости с/х животных экспериментально доказывают, что с увеличе-

нием скорости резания удельная работа резания снижается. А. Н. Познышев установил, что наряду со снижением усилия резания мясных продуктов при росте скорости улучшается и качество среза. Вместе с тем А. И. Пелеев отмечает возможность повышения температуры в зоне резания с увеличением скорости и, как следствие, денатурации содержащихся в мясе белков. А. А. Ивашко в результате многочисленных опытов по измельчению мяса с различной скоростью получил зависимости, отличающиеся наличием таких скоростей, при которых удельная работа резания резко возрастает, а затем снова падает.

Ряд авторов придерживаются противоположной точки зрения и считают, что при увеличении скорости резания удельная работа резания увеличивается и при скорости резания 27–28 м/с достигает максимума, а затем снижается. В. И. Курдюмов при измельчении корнеплодов, Б. В. Гарбарец при анализе измельчения минтая и китового мяса выявили увеличение удельной работы резания с возрастанием скорости. В. В. Кузьмин при измельчении мясного сырья обнаружил увеличение удельной работы резания в 2 раза. Аналогичные результаты при резании конины получены Ш. Н. Нуртаевым.

Одной из существенных причин разноречивости представленных в литературе результатов исследований влияния скорости резания на энергоёмкость процесса измельчения является техническая и моральная отсталость применя-

емого экспериментального оборудования. Большинство исследований, описываемых в литературе, осуществлялись на таких установках, как маятниковые и ротационные копры, характеризующиеся ограниченностью диапазона варьирования, скоростями резания, низкой точностью и высокой погрешностью измерений.

Отсутствие единого мнения на вопрос влияния скорости резания на процесс измельчения кормов является существенной преградой для повышения эффективности работы оборудования для измельчения, а значит, и важной проблемой, требующей решения.

Целью исследования, результаты которого отражены в статье, является решение данной проблемы. Эта цель достигается путем исследования процесса резания мясного сырья на различных скоростях. В соответствии с поставленной целью и с учетом теоретических предположений были определены следующие задачи:

- 1) разработать и изготовить установку для исследования параметров процесса резания;
- 2) провести экспериментальные исследования влияния скорости резания на удельную работу;
- 3) произвести анализ полученных данных и предложить рекомендации по выбору скорости резания материалов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исследуемого материала использовали субпродукты говяжьей, вследствие того что они являются одними из основных и наиболее распространенных компонентов кормовых рационов пушных зверей [1], [9]. Исследуемый материал имел следующие параметры: влажность 72,1–72,9%, плотность 1160–1180 кг/м<sup>3</sup>, температура 270–272 К.

В ходе данной работы автором были проанализированы недостатки существующих исследовательских установок и на основе этого разработана и изготовлена альтернативная (рис. 1 а, б). На установку получен патент на полезную модель № 131163 «Стенд для исследования параметров процесса резания лезвием», авторы Т. А. Гаврилов, В. Ф. Кондрашов, Е. А. Тихонов.

Исследования на установке выполняли следующим образом. В зажим электромагнитного устройства закрепляли исследуемый материал. Нажатием кнопки пуска осуществляли запуск электродвигателя; с помощью дисплея персонального компьютера, который посредством DAQ-контроллера получения и обработки экспериментальных данных и электрического провода соединен с датчиком частоты вращения, установленным напротив конца вала электродвигателя и обеспечивающим измерение частоты вращения электродвигателя, контролировали значение частоты вращения. Посредством преобразователя частоты вращения производили точную установку и поддержание частоты вращения (соответственно и скорости резания, при частоте 1000 мин<sup>-1</sup> скорость резания составляла 22 м/с), скорость резания варьировали в пределах от 5 до 40 м/с (максимальное и минимальное значения скорости резания были ограничены конструктивными возможностями стенда), с шагом 5 м/с. По длине режущего элемента скорость резания меняется, поэтому для поддержания ее постоянной в каждом опыте исследуемый материал подавался в область, соответствующую середине лезвия режущего элемента. Нажатием кнопки пуска осуществляли подачу тока в электромагнитное устройство, и его сердечник выдвигался вместе с зажимом и исследуемым материалом в плоскость вращения режущего элемента, где материал перерезался. Результаты изменения частоты вращения фиксировали на персональном компьютере и обрабатывали. Повторность опытов пятикратная.

Располагая данными о частоте вращения  $n_1$  до среза образца исследуемого материала и  $n_2$  после среза, определяли удельную работу  $A_{уд}$  резания по формуле

$$A_{уд} = \frac{k \times (n_1^2 - n_2^2)}{F}, \text{ кДж/м}^2, \quad (1)$$

где  $F$  – площадь сечения перерезаемого образца, м<sup>2</sup>;  $k$  – коэффициент, зависящий от полярного момента инерции всех вращающихся частей маховика и ротора:

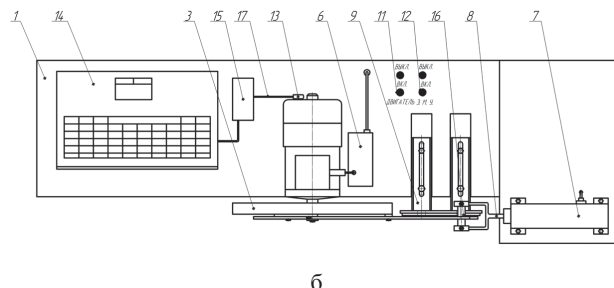
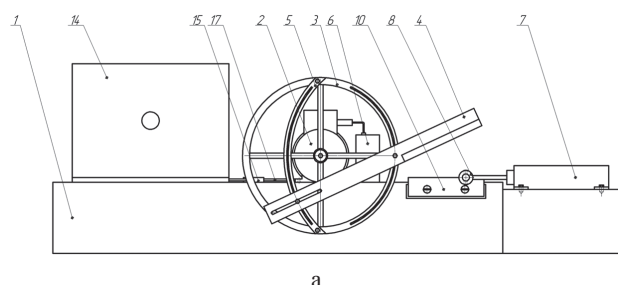


Рис. 1. Конструкция альтернативной установки: а – главный вид, б – вид сверху; 1 – рама, 2 – электродвигатель, 3 – маховик, 4 – нож, 5 – устройство для регулирования ножа, 6 – преобразователь частоты вращения, 7 – эл.-магн. устройство, 8 – зажим, 9 – устройство для регулирования контрножа, 10 – контрнож, 11 – кнопки вкл. и выкл. электродвигателя, 12 – кнопки вкл. и выкл. эл.-магн. устройства, 13 – датчик частоты вращения, 14 – персональный компьютер, 15 – DAQ-контроллер, 16 – измельчаемый материал, 17 – электрический провод

Значения удельной работы резания при различных скоростях, кДж/м<sup>2</sup>

Параметры	Скорость резания, м/с							
	5	10	15	20	25	30	35	40
Среднее арифметическое	5,08	2,75	1,82	1,34	1,15	0,98	0,87	0,77
Дисперсия	0,09	0,16	0,10	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
Среднее квадратическое отклонение	0,31	0,40	0,32	0,10	0,09	0,13	0,08	0,11
Коэффициент вариации, %	6,02	14,38	17,34	7,46	7,37	12,80	8,75	14,29
Ошибка среднего арифметического	0,18	0,23	0,18	0,06	0,05	0,07	0,04	0,06
Точность определения средней арифметической, %	3,48	8,30	10,01	4,31	4,26	7,39	5,05	8,25
Доверительный интервал	0,52	0,67	0,53	0,17	0,14	0,21	0,13	0,19

$$k = 2 \times \pi^2 \times (J_{\text{рот}} + J'_0),$$

где  $J_{\text{рот}}$  и  $J'_0$  – полярные моменты инерции соответственно ротора и маховика с ножом в кДж×с<sup>2</sup>.

Формула (1) получена Н. Е. Резником [6] при исследовании на ротационном копре РК-1 ВИС-ХОМа процесса измельчения листостебельной массы и до сих пор является актуальной при исследовании процесса измельчения различных материалов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам проведенных исследований была получена выборка данных удельных работ резания субпродуктов говяжьих при различных скоростях резания. Для полученных данных произведена статистическая обработка общепринятыми методами математической статистики [7] для доверительной вероятности 0,9, результаты представлены в таблице.

По данным таблицы построен график изменения удельной работы резания субпродуктов говяжьих в зависимости от скорости (рис. 2).

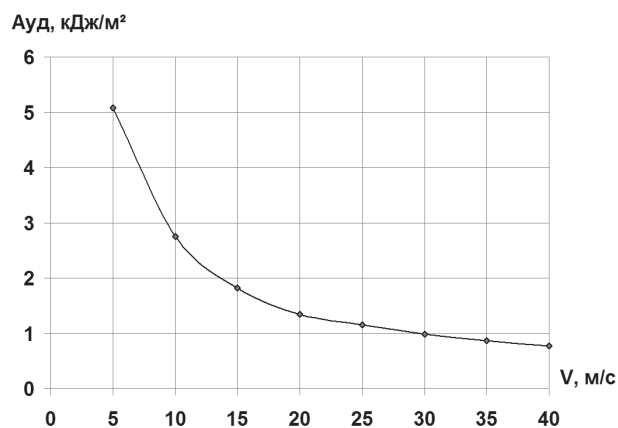


Рис. 2. График изменения удельной работы резания от скорости:  $A_{\text{уд}}$  – удельная работа резания (кДж/м<sup>2</sup>),  $V$  – скорость резания (м/с)

Анализируя данные таблицы и рис. 2, можно отметить, что при измельчении субпродуктов говяжьих в рассмотренном диапазоне скоростей 5–40 м/с удельная работа резания снижается с увеличением скорости. Причем в пределах изменения скорости от 5 до 20 м/с она заметно снижается, после чего изменяется незначительно.

Наиболее близко описывает полученную кривую уравнение

$$A_{\text{уд}} = (-1,99) \times \ln(V) + 7,69, \text{ кДж/м}^2,$$

где  $(-1,99)$  и  $7,69$  – эмпирические коэффициенты.

Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными измельчения листостебельной массы Н. Е. Резника [6] и кости сельскохозяйственных животных Н. А. Барсова [2], что говорит об общности закономерностей процесса измельчения кормов растительного и животного происхождения.

Снижение удельной работы резания с повышением скорости можно объяснить следующими причинами: с увеличением скорости резания происходят локализация и концентрация разрушающей энергии у кромки лезвия, снижение работы предварительного сжатия материала лезвием, увеличение инерционного подпора прослойками материала, снижение коэффициента трения.

## ВЫВОДЫ

1. Данные проведенного исследования свидетельствуют о том, что при измельчении субпродуктов говяжьих с увеличением скорости резания в диапазоне от 5 до 40 м/с удельная работа резания существенно снижается, с 5,08 до 0,77 кДж/м<sup>2</sup>, практически в 5 раз.

2. Проведенные исследования указывают на то, что наименьшие затраты энергии при измельчении субпродуктов говяжьих наблюдаются при скоростях резания 15–25 м/с.

3. Выявленная зависимость удельной работы резания от скорости резания изменяется согласно уравнению:  $A_{\text{уд}} = (-1,99) \times \ln(V) + 7,69$ .

\* Работа выполнена в рамках реализации комплекса мероприятий Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 гг. и проекта «Создание Центра ЕС в Баренц-регионе России».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипова Л. В., Глотова И. А., Рогов И. А. Методы исследования мяса и мясных продуктов // Современные проблемы науки и образования. 2009. № 1. С. 22.
2. Барсов Н. А. Ресурсосберегающие технологические процессы и технические средства переработки мясокостных кормов в звероводстве: Дис. ... д-ра техн. наук. СПб.: Пушкин, 1992. 607 с.
3. Булгаков В., Головач И. Уточненная теория ротационного режущего аппарата // *Agricultural Engineering. Research papers*. 2011. № 43. С. 43–57.
4. Кузьмин В. В. Совершенствование процесса резания мясного сырья на основе математического моделирования формы режущих инструментов: Дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2009. 272 с.
5. Курдюмов В. И., Аюгин П. Н., Аюгин Н. П. Снижение энергоемкости измельчения // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2008. № 5. С. 50–53.
6. Резник Н. Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов. М.: Машиностроение, 1975. 311 с.
7. Сидняев Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: Учебное пособие. М.: Юрайт, 2011. 399 с.
8. Handbook of meat processing / Edited by F. Toldrá. USA, Blackwell Publ., 2010. 561 p.
9. Hollander C. J., Vanholder T. New feeding strategy: individual total mixed ration based on metabolic state // The first North American conference on precision dairy management 2010. Available at: <http://www.precisiondairy2010.com/proceedings/sl1vanholder2.pdf>
10. Nezhlukchenko T. I., Solyanyk M. B. Technology of making homogeneous feed suspensions and efficiency of their use while feeding pigs // *Visnyk Ahrarnoyi Nauky*. 2007. № 3. С. 52–53.

Gavrilov T. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

## EXPERIMENTAL STUDY OF RAW MEAT GRINDING PROCESS AT DIFFERENT CUTTING SPEED

This article studies the influence of raw meat products' cutting speed on the shredding work effectiveness. Shredding, by its technological process and power consumption, is the main operation in the fodder preparation process for agricultural animals. Therefore, a research of the factors influencing effectiveness of the shredding work is of great importance. The cutting speed is one of these factors. At present, the problem is not researched enough to provide for effective operation of the fodder preparation process. In this article, the author makes conclusions based on the data obtained from a conducted experimental research. The studied material and beef by-products (physical and mechanical properties: humidity 72,1–72,9 %, density 1160–1180 kg/m<sup>3</sup>, temperature 270–272 K) were alternately placed into the experimental apparatus and cut with the cutting speed from 5 to 40 m/h, with a step of 5 m/h. As a result of the experiment, the data pertaining the influence of the cutting speed on the effectiveness of the shredding work were obtained. Analyzing these data the author showed that with the increase of the cutting speed the shredding work decreases. During experimental research, the author also obtained data reflecting functional dependences between the shredding work effectiveness and the cutting speed.

Key words: grinding, work, speed, beef

## REFERENCES

1. Antipova L. V., Glotova I. A., Rogov I. A. Methods of study of meat and meat products [Metody issledovaniya myasa i myasnykh produktov]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2009. № 1. P. 22.
2. Barsov N. A. *Resursosberegayushchie tekhnologicheskie protsessy i tekhnicheskie sredstva pererabotki myasokostnykh kormov v zverovodstve. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Resource-saving processes and hardware for processing meat and bone feed in fur farming. Dr. tech. sci. diss.]. St. Petersburg, Pushkin Publ., 1992. 607 p.
3. Bulgakov V., Golovach I. Revised theory of rotary cutting apparatus [Utochnennaya teoriya rotatsionnogo rezhushchego apparata]. *Agricultural Engineering. Research papers*. 2011. № 43. P. 43–57.
4. Kuz'min V. V. *Sovershenstvovanie protsessa rezaniya myasnogo syr'ya na osnove matematicheskogo modelirovaniya formy rezhushchikh instrumentov. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Improving the process of cutting raw meat on the basis of mathematical modeling of shape cutting tools. Dr. tech. sci. diss.]. St. Petersburg, 2009. 272 p.
5. Kurdyumov V. I., Ayugin P. N., Ayugin N. P. Reduction of energy grinding [Snizhenie energoemkosti izmel'cheniya]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Vestnik of the Altai State Agrarian University]. 2008. № 5. P. 50–53.
6. Reznik N. E. *Teoriya rezaniya lezviem i osnovy rascheta rezhushchikh apparatov* [The theory of the cutting blade and the basis of calculation of cutting machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 311 p.
7. Sidnyaev N. I. *Teoriya planirovaniya eksperimenta i analiz statisticheskikh dannykh* [The theory of experimental design and statistical analysis of the data: a training manual]. Moscow, Yurayt Publ., 2011. 399 p.
8. Handbook of meat processing / Edited by F. Toldrá. USA, Blackwell Publ., 2010. 561 p.
9. Hollander C. J., Vanholder T. New feeding strategy: individual total mixed ration based on metabolic state // The first North American conference on precision dairy management 2010. Available at: <http://www.precisiondairy2010.com/proceedings/sl1vanholder2.pdf>
10. Nezhlukchenko T. I., Solyanyk M. B. Technology of making homogeneous feed suspensions and efficiency of their use while feeding pigs // *Visnyk Ahrarnoyi Nauky*. 2007. № 3. P. 52–53.

Поступила в редакцию 17.07.2013