

## Экспериментальные исследования процесса измельчения материалов в шнековом оборудовании

Д-р техн. наук **В.В. Пеленко**, pelenko1@rambler.ru

*Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна  
198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4*

Д-р техн. наук **Е.И. Верболоз**, elenaverboloz@mail.ru

канд. техн. наук **В.А. Демченко**, dem8484@gmail.com

**И.И. Усманов**, ilhomusmanov@mail.ru, **Н.К. Евона**, nk412@mail.ru

канд. техн. наук **М.А. Иванова**, mtomz85@mail.ru

*Университет ИТМО*

*191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

Оценивали степень влияния длины винтовой поверхности шнека измельчителя на давление обрабатываемого материала в зоне экструзии и определяли зависимость повышения температуры материала от интенсивности затяжки зажимной гайки режущей головки волчка. С позиций оценки эффективности функционирования шнековых измельчителей, закон распределения давления обрабатываемого сырья вдоль шнекового канала является наиболее ответственным и характеристически интегральным параметром, поскольку не только определяет номинальную величину требуемого давления продукта в зоне экструзии на выходе через отверстия измельчительной решетки, но и суммарные затраты механической энергии по перемещению, деформации, резанию и нежелательному обратному перетoku материала (явление «шлюзования»). Эффект «шлюзования» существенно снижает производительность оборудования, повышает температуру продукта, энергоемкость процесса и вызывает ухудшение качества выходного сырья из-за его интенсивного перетирания, раздавливания и отжима полезных компонентов. В связи с этим сформулирована, поставлена и решена задача определения реального закона распределения внутришнекового давления перерабатываемого сырья вдоль корпуса измельчителя. Получена зависимость температуры материала на выходе из волчка как функция момента затяжки центральной зажимной гайки и времени процесса измельчения. Задача оценки характера закона распределения давления и изменения температуры материала решена методами активного эксперимента. Номинальные величины и доверительные границы возможного разброса внутришнекового давления определены на основе строгого статистического анализа значительного количества экспериментов. Доказана осуществимость предложенного экспериментального моделирования закона распределения давления сырья и возможность оптимизации момента затяжки центральной зажимной гайки, обеспечивающего ограничение роста температуры измельчаемого материала и повышение энергоэффективности измельчителя и качества продукта. Выполненные эксперименты и полученные статистические данные хорошо коррелируются с имеющимися теоретическими материалами по исследованию подобных прессовых и экструзионных процессов, доказывая их соответствие. Представленная работа свидетельствует об адекватности натурного и математического моделирования и корректности полученных экспериментальных результатов.

**Ключевые слова:** экструзия; процесс измельчения; пищевое сырье; волчок; шнек; оптимизация оборудования.

DOI: 10.17586/2310-1164-2020-10-1-27-38

## Experimental studies of grinding process in auger equipment

D. Sc. **Valery V. Pelenko**, pelenko1@rambler.ru

*St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design  
4, Ivan Chernykh str., St. Petersburg, 198095, Russia*

D. Sc. **Elena I. Verbolo**, elenaverboloz@mail.ru

Ph. D. **Vera A. Demchenko**, dem8484@gmail.com

**Ilhom I. Usmanov**, ilhomusmanov@mail.ru, **Nikita K. Evona**, nk412@mail.ru

Ph. D. **Marina A. Ivanova**, mtomz85@mail.ru

*ITMO University*

*9, Lomonosov str., St. Petersburg, 191002, Russia*

The aim of this study is to assess the influence degree of the screw surface length of the shredder screw on the pressure of the processed material in the extrusion zone and to determine the dependence of the

increase in material temperature on the tightening intensity for the clamping nut of the top cutting head. In terms of evaluating the functioning efficiency of screw shredders, the law of the pressure distribution for the processed raw materials along the screw channel is the most responsible and characteristic integral parameter, since the features of this law determine not only the nominal value of the required product pressure in the extrusion zone at the outlet through the holes of the grinding grate, but also the total cost of mechanical energy for the movement, deformation, cutting, and undesirable reverse flow of material (the phenomenon of "w freeze"). It must be emphasized that the noted effect of "locking" significantly reduces the productivity of equipment, increases the temperature of the product, the energy intensity of the process, and causes deterioration in the quality of the output raw material due to its intensive grinding, crushing, and spinning of useful components. In this paper, the problem is formulated and solved to determine the real law of the distribution of the internal screw pressure for the processed raw materials along the grinder body. In addition, in the study, the dependence of the temperature of the material at the outlet of the top as a function of the tightening torque of the central clamping nut and the grinding process time was obtained. The task of assessing the nature of the law of pressure distribution and changes in the temperature of the material, posed in this study, is solved by the methods of an active experiment. Nominal values and confidence limits of a possible variation in internal screw pressure are determined on the basis of a rigorous statistical analysis for a significant number of experiments. The feasibility of the proposed experimental modeling the pressure distribution law for raw materials and the possibility of optimizing the tightening torque of the central clamping nut, which limits the increase in temperature of the crushed material and increase the energy efficiency of the grinder and product quality, are proved. The performed experiments and the obtained statistical data are in good agreement with the available theoretical materials for the study of such press and extrusion processes, proving their compliance. The presented work testifies to the adequacy of field and mathematical modeling and the correctness of the obtained experimental results.

**Keywords:** extrusion; shredding; food raw materials; spinning top; screw; equipment optimization.

---

### Введение

В настоящее время в отраслях промышленного производства существует проблема снижения энергоемкости процессов и оборудования для измельчения твердообразных сред [1, 2]. Анализ литературных источников указывает на отсутствие исчерпывающих материалов, корректно описывающих зависимость энергоемкости шнековых измельчителей от таких конструктивных и технологических характеристик, как распределение внутришнекового давления вдоль корпуса волчка [3, 4], угол наклона последнего витка шнека [5], величина зазора между гребнями (вершинами) витков шнека и внутренней поверхностью корпуса волчка [6], переменность шага винтовой линии [7], длина винтовой линии [8], величина момента затяжки центральной зажимной гайки корпуса [9]. Последние исследования [10, 11] показывают, что наиболее значимыми факторами, влияющими на энергетику процесса измельчения в шнековых измельчителях, является характер изменения давления материала по длине шнека, а также величина момента затяжки центральной зажимной гайки корпуса волчка.

Задача корректного описания закона изменения внутришнекового давления по длине решена в работах [4, 11]. Теоретическая зависимость производительности волчка от момента затяжки центральной зажимной гайки получена в работе [9].

Целью данного исследования является экспериментальное определение закона распределения давления сырья по длине корпуса шнека, зависимости изменения потребляемой волчком удельной мощности и температуры на выходе из волчка от момента затяжки центральной зажимной гайки, а также оценка адекватности теоретических результатов, полученных в работах [4, 11, 12].

Решение поставленного вопроса осуществляется методом активного эксперимента.

Изучение работы шнекового измельчительно-режущего оборудования с использованием технических средств измерения и регистрации позволяет определить реальные конструктивные и технологические параметры элементов исполнительных механизмов при измельчении разных видов сырья при реализации различных производственных операций и режимов [2, 3]. Использование компьютерной техники, цифровой регистрации параметров процесса измельчения продукта и оценки его качества, расширяют возможности исследователей при оптимизации этого оборудования. Экспериментальные исследования волчков и мясорубок являются необходимой составляющей процесса

их изучения и совершенствования, позволяющей оценить степень корректности аналитических моделей процесса измельчения [3, 11, 13].

Последние результаты разработки математических моделей функционирования узлов шнекового измельчительного оборудования и оптимизации их параметров, изложенных в публикациях [2, 4, 5], а также расчетов на прочность и жесткость, проведенных в работах [6, 8–10], ставят вопрос натуральных экспериментальных исследований этого вида оборудования в ряд актуальных.

### Объекты и методы исследования

Объектами исследования являются процессы формирования внутришнекового давления по длине волчка, а также изменения температуры измельчаемого материала на выходе в зависимости от момента затяжки центральной зажимной гайки и времени работы волчка.

В данной статье используется метод активного полного факторного эксперимента и статистической обработки полученных числовых материалов.

### Результаты и обсуждение

#### 1. Установка для исследования динамики процесса измельчения

Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1. Она содержит электродвигатель 2, установленный на станине 1. Изменение скорости вращения шнека 6, (7, 8) осуществляется с помощью преобразователя частоты LGSV 004k5. Вращение от приводного шкива 3 передается двумя клиновыми ремнями 4 на ведомый шкив 5, закрепленный на приводном валу 10 шнека 6 и ножа. Шнеки 6, (7, 8) сменные для проведения сравнительных испытаний. На пальце 10 приводного вала насажены ножи и решетки. Центральная гайка 9 зажимает блок ножей и решеток с регламентируемым в эксперименте моментом затяжки. Сырье из бункера 11 подается толкателем 12 на шнек в корпусе волчка. На бункере установлен датчик начальной температуры сырья 13. Включение привода и его реверс осуществляются пакетным переключателем 14.

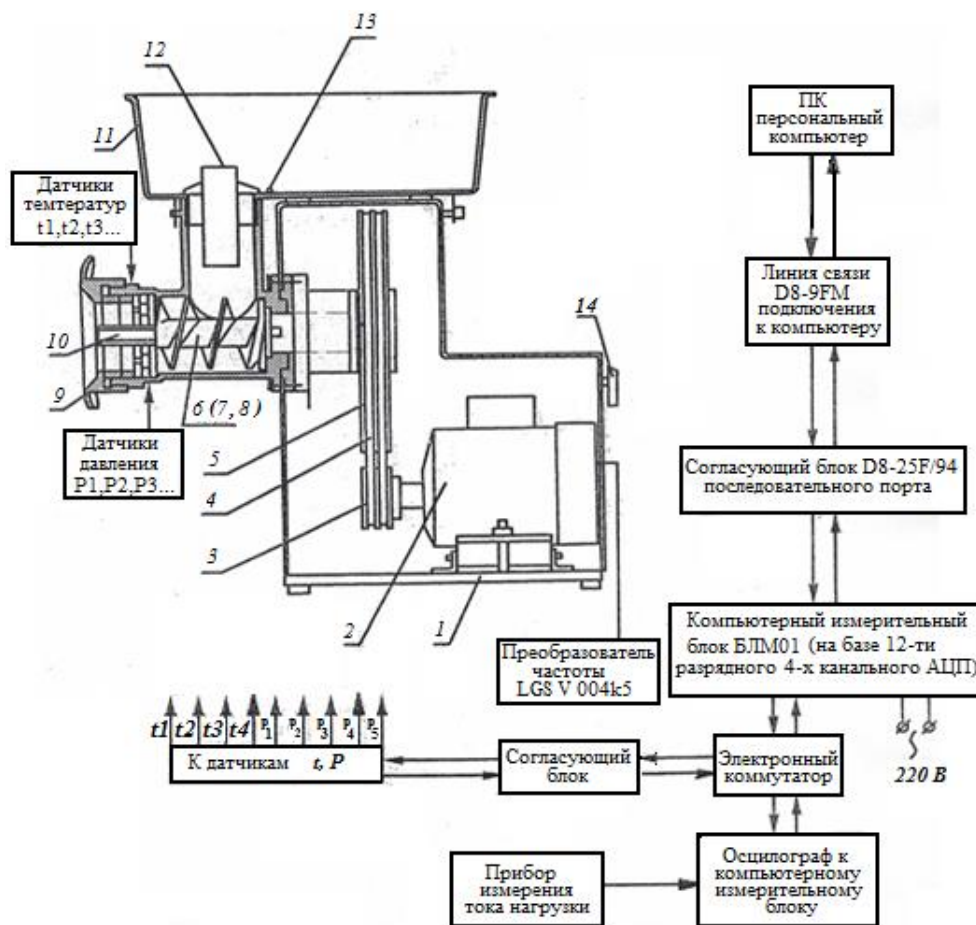


Рисунок 1– Принципиальная схема экспериментальной установки  
Figure 1. Experimental unit

Схема установки датчиков давления приведена на рисунке 2.

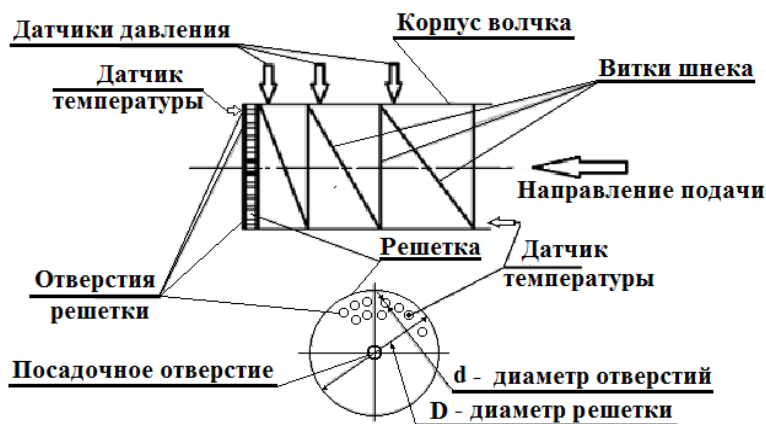


Рисунок 2 – Схема установки датчиков давления и температуры  
 Figure 2. Installation diagram of pressure and temperature sensors

### 1.1. Описание экспериментального стенда

Для проведения экспериментов, в соответствии с основными элементами принципиальной схемы (рисунок 1) и схемы размещения (рисунок 2) датчиков давления и температуры, была спроектирована установка, показанная на рисунке 3. Стенд изготовлен на базе аналога мясорубки 8ММ производства ОАО «Ленполиграфмаш». Эта мясорубка (волчок) является типичным представителем машин, применяемых на малых и средних предприятиях по мясопереработке. В ряде экспериментов, связанных с определением степени измельчения пищевого сырья, использовалась мясорубка марки BOSCH ProfiMixx 46.

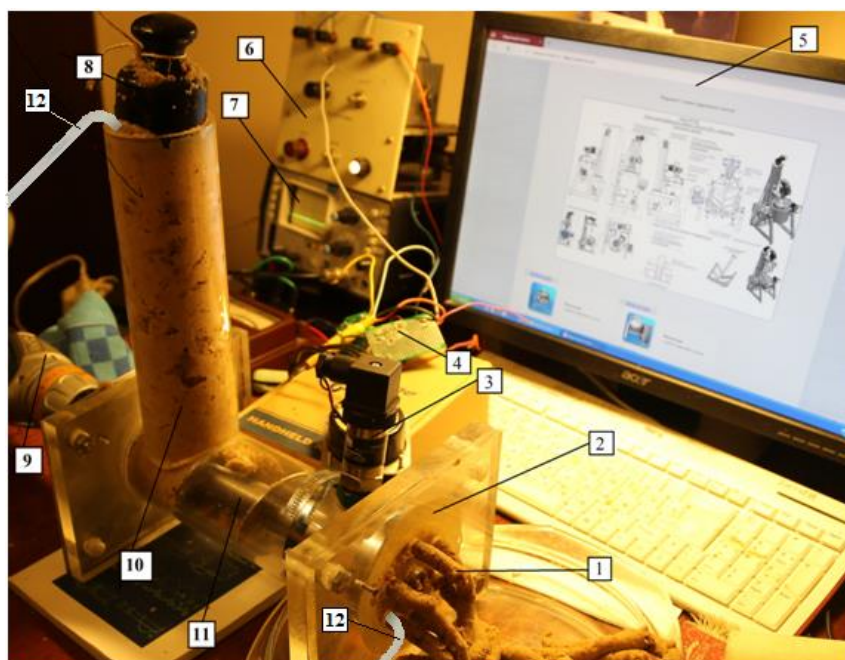


Рисунок 3 – Фотография экспериментального стенда  
 Figure 3. Test bench

Экспериментальная установка оснащена электродвигателем 9 мощностью 1 кВт с преобразователем частоты LGSY 0041c5. Производительность серийной мясорубки 8ММ по мясу с применением решетки диаметром 82 мм и отверстиями диаметром 5 мм – 300 кг/час. Установка оснащена персональным компьютером 5, на котором через компьютерный измерительный блок 4 и 7 в процессе измельчения регистрируются показания датчиков давления 3 и температуры 12. Сырье 1 из бункера 10 подается толкателем 8 в корпус волчка и винтовой канал шнека 11. На корпусе 11 по ходу продукта закреплены датчики давления 3 и температуры 12. Включение привода и его реверс осуществляется переключателем 6.

## 1.2. Оснащение экспериментальной установки

### Датчики давления

В экспериментальной установке применены датчики давления P401 (аналог – Danfoss MBS 1700), которые используются для измерения относительного давления в корпусе шнека.

Фотография датчика давления приведена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Фотография датчика давления P401

Figure 4. P401 pressure sensor

### Датчики температуры

Для измерения температуры сырья в зоне загрузки, в корпусе шнека и выходе применен датчик температуры T101. Датчик, изображенный на рисунке 5, работает в комплекте с измерительным блоком и персональным компьютером.



Рисунок 5 – Фотография датчика температуры T101

Figure 5. T101 temperature sensor

Для измерения температуры сырья на входе в корпусе шнека и выходе могут применяться хромель-алюмелевые термопары P3400 THERMOCOUPLE в комплекте с мультиметром MS8222H (позиции 7, 9, 10 рисунка 7).

### Динамометрическая моментная отвертка с трещеткой

Для установки необходимого момента затяжки центральной зажимной гайки волчка используется динамометрические отвертки PROXXON MicroClick MC 5, MC 10 с пределами измерения 7 Н·м и 12,5 Н·м и ограничительной трещеткой.

Фотография динамометрической отвертки PROXXON MicroClick MC 5 приведена на рисунке 7, позиция 11.

## 1.3. Работа на экспериментальной установке

Получение данных и вывод их на экран осуществляет компьютерная программа. Перед началом проведения эксперимента измерительный блок подключается к персональному компьютеру. Для этого используется кабель, который соединяется с разъемом, расположенным на стенке блока и одним из портов компьютера. При подключении кабеля к компьютеру используется переходник с 9-ти на 25-ти контактный разъем. Затем подключается компьютерный измерительный блок к сети 220 В и подключаются датчики давления и температуры к входным разъемам компьютерного измерительного блока. При проведении экспериментов используется как имитатор, так и натуральное сырье.

1.4. Результаты экспериментальных исследований и оценка адекватности математической модели определения закона распределения давления по длине винтовой линии шнека

На экспериментальной установке замеры показаний датчиков давления осуществлялись в точках с координатами  $L_1 = 0,065$  м;  $L_2 = 0,16$  м;  $L_3 = 0,24$  м по длине корпуса, считая от вертикальной оси загрузочной горловины. Результаты статистической обработки данных, полученных с десятикратной повторностью, приведены в таблице 1.

Определены доверительные границы для оценки математического ожидания  $M$  результата измерения с уровнем надежности  $\gamma = 0,95$  (95%), зная выборочную среднюю  $X_{cp}$  объема « $n$ » выборки и дисперсию  $D = \frac{\sum_1^n (X_{cp} - X_i)^2}{n}$  (в соответствии с таблицей 1:  $D_1 = 0,0074$ ;  $D_2 = 0,0338$ ;  $D_3 = 0,1974$ ).

Таблица 1. Результаты замеров давления по длине корпуса, Па·10<sup>5</sup>

Table 1. Pressure sensing along the length of the body, Pa 10<sup>5</sup>

№ п/п, $n$	$L_1 = 0,065$ м			$L_2 = 0,16$ м			$L_3 = 0,24$ м		
	$X_i$	$\frac{X_{cp} - X_i}{X_i}$	$D_i = (X_{cp} - X_i)^2$	$X_i$	$X_{cp} - X_i$	$D_i = (X_{cp} - X_i)^2$	$X_i$	$X_{cp} - X_i$	$D_i = (X_{cp} - X_i)^2$
1	2,18	-0,02	0,0004	6,05	0,02	0,0004	14,72	-0,02	0,0004
2	2,07	0,09	0,0081	5,84	0,23	0,0529	15,34	-0,64	0,4096
3	2,19	-0,03	0,0009	6,41	-0,34	0,1156	14,11	0,59	0,3481
4	2,31	-0,15	0,0225	6,24	-0,17	0,0289	14,95	-0,25	0,0625
5	2,04	0,12	0,0144	6,02	0,05	0,0025	14,73	-0,03	0,0009
6	2,11	0,05	0,0025	5,95	0,12	0,0144	14,08	0,62	0,3844
7	2,23	-0,07	0,0049	6,11	-0,04	0,0016	15,12	-0,42	0,1746
8	2,17	-0,01	0,0001	5,87	0,20	0,0400	15,03	-0,33	0,1089
9	2,05	0,11	0,0121	6,32	-0,25	0,0625	14,89	-0,19	0,0361
10	2,25	-0,09	0,0081	5,93	0,14	0,0196	14,03	0,67	0,4489
Среднее	$X_{cp} = 2,16$	-	$D = 0,0074$	$X_{cp} = 6,07$	-	$D = 0,0338$	$X_{cp} = 14,7$	-	$D = 0,1974$

$X_i$  – текущее значение измеренного давления;  $X_{cp}$  – среднее выборочное (оценка математического ожидания);  $(X_{cp} - X_i)$  – абсолютная погрешность измерения;  $D_i = (X_{cp} - X_i)^2$  – дисперсия  $i$ -го результата;

$n$  – количество и номер измерений;  $D = \frac{\sum_1^n (X_{cp} - X_i)^2}{n}$  – среднее значение дисперсии;  $\sigma = \sqrt{D}$  – среднее квадратическое отклонение.

Определены средние квадратические отклонения случайной величины результата измерения как корень квадратный из дисперсии

$$\sigma_{сл} = \sqrt{D}.$$

$$\sigma_{сл1} = 0,086; \sigma_{сл2} = 0,1838; \sigma_{сл3} = 0,443.$$

Среднее выборочное определялось по формуле

$$X_{cp} = \frac{\sum_1^n X_i}{n}.$$

$$X_{cp1} = 2,16 \cdot 10^5 \text{ Па для } L_1 = 0,065 \text{ м; } X_{cp2} = 6,07 \cdot 10^5 \text{ Па для } L_2 = 0,16 \text{ м;}$$

$$X_{cp3} = 14,7 \cdot 10^5 \text{ Па для } L_3 = 0,24 \text{ м.}$$

Условие уровня надежности результата измерения  $\gamma = 0,95$  записывается в виде уравнения

$$P(|X_{cp} - M| < d) = \gamma,$$

где  $d$  – половина длины доверительного интервала.

Выражая это уравнение через функцию Лапласа, получаем

$$P(|X_{cp} - M| < d) = P(M - d < X_{cp} < M + d) = \Phi \left[ \frac{(M+d)-M}{\sigma_{сл}} \right] - \Phi \left[ \frac{(M-d)-M}{\sigma_{сл}} \right] = 2\Phi \left[ \frac{d}{\sigma_{сл}} \right] = \gamma.$$

Таким образом,  $\Phi \left[ \frac{d}{\sigma_{сл}} \right] = \frac{\gamma}{2}.$

При  $\frac{\gamma}{2} = 0,475$  для функции Лапласа, находим ее аргумент  $\frac{d}{\sigma_{сл}} = 1,96$  или  $d = 1,96\sigma_{сл}.$

По исходным данным таблицы 1 и значениям  $\sigma_{сл}$ , для  $L_1 = 0,065$  м;  $L_2 = 0,16$  м;  $L_3 = 0,24$  м, определяем доверительные интервалы  $d_1, d_2, d_3$ :  $d_1 = 0,17$ ;  $d_2 = 0,36$ ;  $d_3 = 0,87.$

Таким образом, доверительные границы для оценки математического ожидания  $M$  результатов измерения давления (в Па·10<sup>-5</sup>) с надежностью 0,95 составят величины

$$1,99 < X_1 < 2,33; 5,71 < X_2 < 6,43; 13,83 < X_3 < 15,57.$$

Графики теоретической и экспериментальной зависимостей распределения давления в пищевом сырье по длине шнека, с указанием доверительных границ, приведены на рисунке 6. Расчеты одного из возможных теоретических значений давления продукта при длине шнека 0,075 м, диаметре шнека 0,048 м, длине винтовой линии  $L = 0,63$  м, при угле ее наклона 0,77 рад. (~45°), по теоретическому соотношению, полученному в работе [4] дают значение

$$P = 199 - 811796(L + 0,3314) + (P_0 + 269585)e^{3,01754L} = 1,693 \text{ МПа}.$$

При этом значении расчетного давления относительная погрешность результата составит

$$\varepsilon = \frac{(P - X_{\text{срз}})}{X_{\text{срз}}} \cdot 100\% = \frac{1,693 - 1,470}{1,470} \cdot 100\% = 15,2\%.$$

Таким образом, статистическая обработка результатов экспериментов десятикратной повторности показывает, что с доверительной вероятностью 95% разброс экспериментальных данных около математического ожидания составит около 8%. Отклонение опытных данных от расчетных составляет  $\varepsilon = 15,2\%$ , что для подобного рода исследований можно считать хорошим результатом.

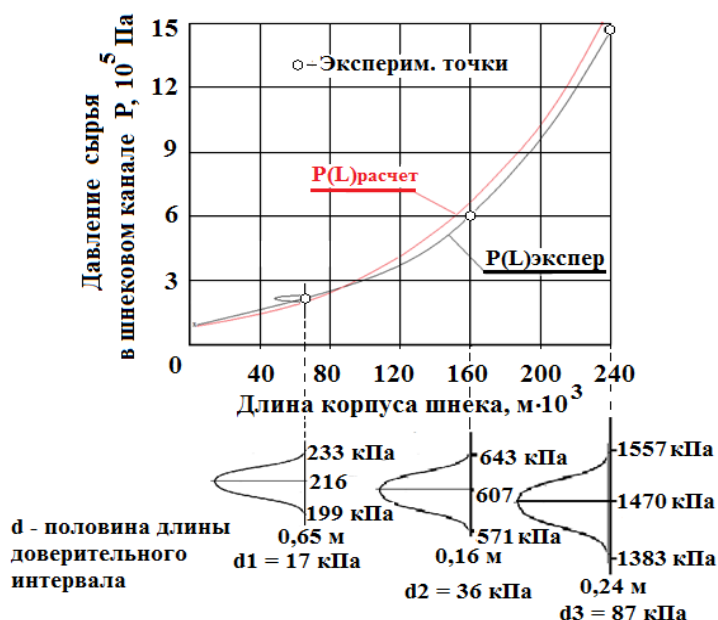


Рисунок 6 – Теоретическая и экспериментальная статистическая кривые распределения давления пищевого материала по длине шнека

Figure 6. Theoretical and experimental statistical curves for the distribution of food raw materials' pressure along the screw length

## 2. Оценка роста температуры сырья и затрат мощности на преодоление момента затяжки пары нож–решетка

Величина момента затяжки центральной гайки существенно влияет на температурные, энергетические и качественные характеристики процесса измельчения, поэтому были проведены натурные эксперименты по количественной оценке этого воздействия. На рисунке 7 приведена установка для определения влияния момента затяжки на энергетические и температурные параметры процесса. Экспериментальный стенд содержит волчок-мясорубку с загрузочной горловиной 2 и зажимной центральной гайкой 1. Для обеспечения необходимого момента затяжки гайки используется переходник 12 с шестигранным торцевым установочным элементом 3 для установки динамометрической отвертки 4, имеющей мерный лимб 11. Для фиксации температурных и энергетических показателей процесса служит цифровой мультиметр MS8222H7 с переключателем измеряемых параметров 5 и электронным табло 6. Величина мощности снимается с амперметра и вольтметра цифрового мультиметра посредством штекерных разъемов 8, а температура посредством хромель-алюмелевой термопары P3400 THERMOCOUPLE 10 через вилку 9.

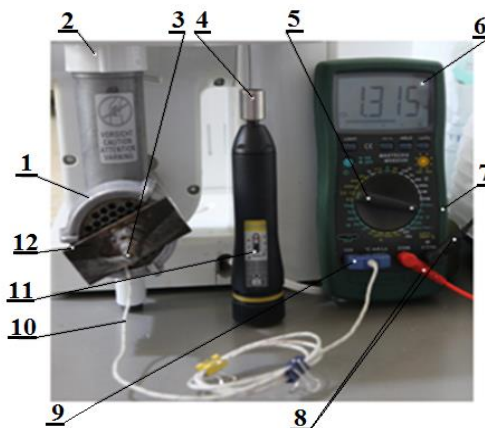


Рисунок 7 – Экспериментальная установка для определения энергетических параметров волчка  
 Figure 7. Experimental unit for estimating energetic parameters of the top

В таблице 2 приведены числовые результаты исследования прироста температуры  $\Delta T$  на выходе продукта из волчка в зависимости от момента затяжки центральной зажимной гайки  $M_{зат}$  и времени измельчения.

Таблица 2 – Зависимость изменения температуры продукта от момента затяжки центральной зажимной гайки и времени измельчения  
 Table 2. Dependence of product temperature changes on moment of tightening and the time of grinding

$M_{зат},$ Н·м	1	2	3	4	5	6,5	8	10
10	0,3	0,3	0,7	1,3	2,3	2,7	3,1	4,0
20	0,7	1,0	1,8	2,3	3,65	4,0	4,7	6,0
30	1,2	2,3	2,8	3,6	4,5	5,7	6,0	7,5
40	1,5	2,45	3,85	4,8	5,8	6,3	7,2	9,05
50	1,65	2,40	4,15	5,2	5,5	7,2	8,2	10,3
60	1,7	2,45	4,15	5,6	6,9	7,8	9,0	11,0

На основании данных таблицы 2, на рисунке 8 представлены результаты экспериментального исследования прироста температуры  $\Delta T$  на входе продукта из волчка в зависимости от момента затяжки центральной зажимной гайки  $M_{зат}$  и времени работы  $t$ . Из графика видно, что с увеличением момента затяжки гайки от 1,0 до 10 Н·м за 60 секунд работы волчка прирост температуры режущего узла увеличивается от 1,7 до 11°C. Для различных значений момента затяжки стабилизация температуры наблюдается на разных ее уровнях из-за установления термодинамического равновесия.

Результаты экспериментальных исследований зависимости потребляемой мощности от момента затяжки центральной зажимной гайки волчка приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Зависимость потребляемой мощности  $N$  и приведенной мощности  $N_{пр}$  от момента затяжки  
 Table 3. Dependence of power consumption  $N$  and normalized power  $N_{пр}$  on the tightening moment

$M_{зат},$ Н·м	$N,$ Вт	$N_{пр},$ Вт	$S,$ мм <sup>2</sup>	$S/S_{стаб}$
1,4	132	297	9	2,25
2	139	236	6,6	1,65
3	149	205	5,5	1,37
4	152	175	4,6	1,15
5	154	154	4,2	1,05
6,5	157	157	4	1
8	165	165	4	1
10	174	174	4	1
12	193	193	4	1

$$N_{пр} = N \cdot \frac{S}{S_{стаб}} = K; S_{стаб} = 4 \text{ мм}^2$$



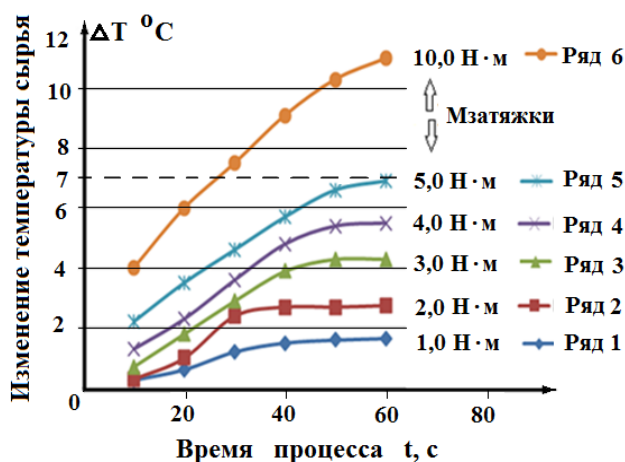


Рисунок 8 – Зависимость изменения температуры продукта в зоне резания от момента затяжки зажимной гайки и времени работы волчка

Figure 8. Dependence of product temperature changes in cutting zone on the clamping nut moment of tightening and the time of grinding

На рисунке 9 приведены экспериментальные данные по увеличению потребляемой мощности, связанному с преодолением сил трения в паре нож–решетка при различной степени затяжки гайки. Влияние момента трения в паре нож–решетка, как следует из полученного графика, при различных усилиях затяжки гайки может достигать 14–26% затрат энергии на процесс измельчения. В настоящее время технология затяжки центральной зажимной гайки волчка сводится только лишь к качественному действию – «затянуть гайку до предела, после чего отвернуть обратно на четверть оборота» [14, 15], то нормирование момента затяжки в условиях существенного влияния на потребляемую мощность и температуру продукта приобретает особенно важное значение.

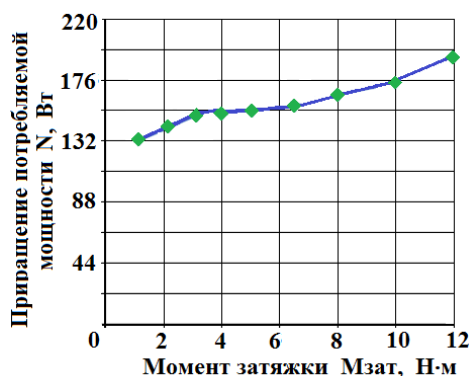


Рисунок 9 – График зависимости мощности от момента  $N = f(M_{зат})$

Figure 9. Dependence of power consumption on  $N = f(M_{зат})$  moment

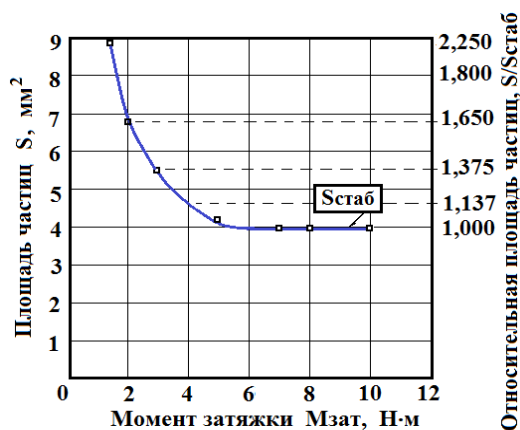


Рисунок 10 – Зависимость степени измельчения сырья от момента затяжки

Figure 10. Dependence of raw material grinding degree on the moment of tightening

Учитывая, что при различных моментах затяжки центральной зажимной гайки волчка изменяется степень измельчения сырья, то есть качество продукта, была определена эта зависимость, которая иллюстрируется графиком на рисунке 10 и фотографиями на рисунке 11. За абсолютную степень измельчения принята площадь частицы. Вычисляя относительную площадь как отношение текущего значения к минимальному стабилизированному значению, получаем график, изображенный на рисунке 10. Качество процесса измельчения определяется не только степенью измельчения, но и энергоемкостью процесса.

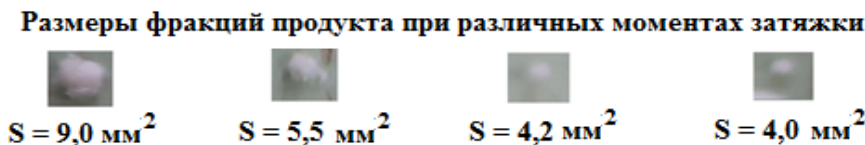


Рисунок 11 – Фотографии частиц измельченного продукта  
Figure 11. Grinded product particles

Введя комплексный показатель качества процесса измельчения, учитывающий и степень измельчения, и энергоемкость процесса,  $K = N_{\text{пр}} = N \cdot \frac{S}{S_{\text{стаб}}}$ , получаем соответствующий график, приведенный на рисунке 12.

Анализ приведенных на рисунке 12 данных позволяет сделать вывод о наличии оптимального момента затяжки в области (4,5–6,2) Н·м, где величина удельной потребляемой мощности достигает минимума.

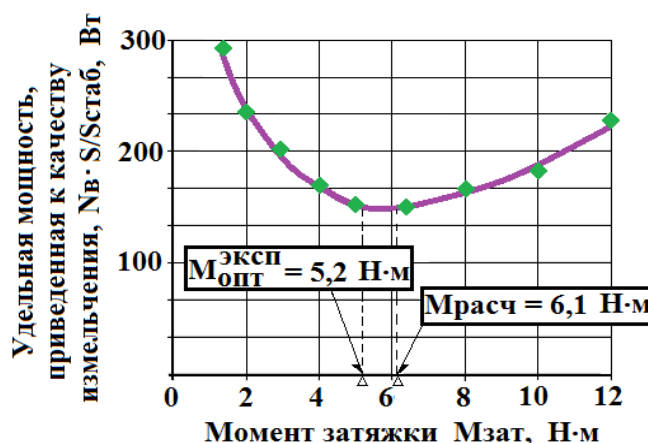


Рисунок 12 – Зависимость удельной мощности процесса от момента затяжки  
Figure 12. Depending of the process specific capacity on moment of tightening

Рассматривая зависимость роста температуры продукта на выходе из волчка от момента затяжки центральной зажимной гайки, изображенную на рисунке 13, можно констатировать, что изменение скорости ее нарастания происходит при значении  $M_{\text{зат}} = 5,2 \text{ Н·м}$ . Эту величину момента затяжки следует принять за оптимальную, так как при меньших значениях качество фарша недостаточное из-за разрывов и смятия волокон продукта, попадающих в стык нож–решетка, что ведет к увеличению расхода энергии, а при больших значениях трение в стыке меняет характер трения ножа о решетку с жидкостного на сухое, что приводит к повышенному энергопотреблению и нежелательному росту температуры сырья.

На основе полученных экспериментальных данных имеется возможность нормирования момента затяжки центральной зажимной гайки волчка, как значимого фактора, определяющего температуру сырья и энергетику процесса измельчения.

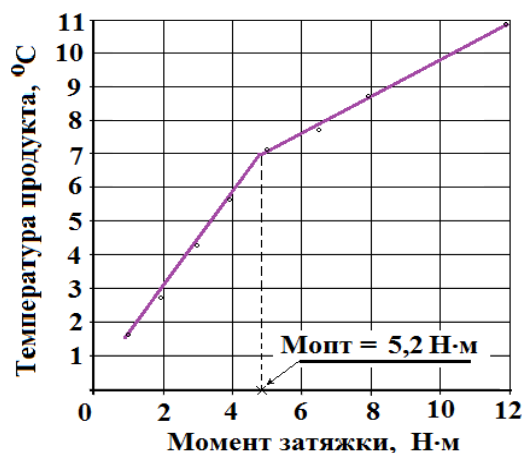


Рисунок 13 – Зависимость температуры продукта на выходе из волчка от момента затяжки центральной гайки

Figure 13. Depending of the output product temperature on the central nut moment of tightening

### Выводы

1. Результаты экспериментального определения закона изменения давления пищевого сырья вдоль винтовой линии шнека подтвердили его экспоненциальную форму.
2. Рассогласование теоретических и экспериментальных данных составили в частном случае около 15%.
3. Экспериментально определена зависимость изменения температуры пищевого сырья от времени измельчения для различных значений момента затяжки центральной зажимной гайки волчка.
4. Количественно оценено изменение потребляемой волчком удельной мощности в зависимости от увеличения момента затяжки центральной зажимной гайки и определена область минимума и предпочтительных значений 4,5–6,2 Н·м. Снижение потребляемой мощности составляет при этом 14,2–25,9%.
5. Экспериментально получена зависимость изменения температуры пищевого сырья от момента затяжки центральной зажимной гайки. Наличие точки излома с ординатой 7°С позволяет оценить значение  $M_{\text{зат}} = 5,2$  Н·м как оптимальное.

### Литература

1. Горяев В.В. Совершенствование конструкций и методики расчета режущего механизма волчков: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1989.
2. Пеленко В.В., Малякко Д.П., Усманов И.И., Екимов В.Г., Крысин А.Г. Оптимизация процесса измельчения пищевых материалов в волчках. Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2016. № 2. С. 32–39.
3. Некоз О.І., Осипенко В.І., Філімонова Н.В., Батраченко О.В. Гідравлічний опір різального вузла вовчків // Вісник Хмельницького національного університету. 2015. № 6. С. 13–19.
4. Шахов С.В., Пеленко В.В., Верболоз Е.И., Груздов П.В. Теоретическое описание закона распределения давления пищевого материала по длине винтового канала шнека в зависимости от сил трения в условиях стесненного сжатия. ФЭС: Финансы. Экономика. 2018. Т. 15. № 9. С. 61–69.
5. Пеленко В.В., Иваненко В.П., Верболоз Е.И., Усманов И.И. Оценка влияния наклона винтовой поверхности последнего витка шнека волчка на давление сырья в зоне резания. Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2018. № 3. С. 26–34.
6. Груздев И.Э. Обработка пищевых масс в шнековых устройствах: дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1985. 348 с.
7. Пеленко В.В., Похольченко В.А., Усманов И.И., Сомов А.А., Смирнов А.А. Математическое моделирование и расчет конструктивных параметров измельчителей с переменным шагом винтовой линии шнека // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2017. Т. 20. № 3. С. 556–562.
8. Фатыхов Ю., Канопка Л. Экструзионные технологии пищевых производств. Вильнюс: Техника. 2007. 88 с.
9. Пеленко В.В., Иваненко В.П., Усманов И.И. Моделирование момента затяжки центральной зажимной гайки волчка // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2018. Т. 7. № 3(43). С. 105–108.
10. Pelenko V., Ivanenko V., Verboloz E., Demchenko V. Usmanov I. Formation of the correct mathematical model of grinding raw meat in meat mincer. Biological Resources Development and Environmental Management. KnE Life Sciences, 2020, pp. 12–26.
11. Усманов И.И., Пеленко В.В. Элементы теории расчета волчков: монография. СПб.: Ношир, 2018. 87 с.

12. Пеленко В.В., Зуев Н.А., Ольшевский Р.Г., Иваненко В.П., Крысин А.Г. Оценка зависимости производительности измельчителей мяса от их конструкции и физико-механических свойств сырья // Вестник Международной академии холода. 2015. № 1. С. 9–15.
13. Кубланов М.С. Математическое моделирование. Методология и методы разработки математических моделей механических систем и процессов. Часть 1. М.: МГТУ ГА, 2013. 108 с.
14. Ивашов В.И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности. Часть 2. Оборудование для переработки мяса. СПб.: ГИОРД, 2007. 464 с.
15. Даурский А.Н., Мачихин Ю.А. Резание пищевых материалов. М.: Пищевая промышленность, 1980. 240 с.

### **References**

1. Goryaev V.V. Improving the designs and methods of calculating the cutting mechanism of tops. *Candidate's thesis*. Moscow, 1989 (In Russian).
2. Pelenko V.V., Malyavko D.P., Usmanov I.I., Ekimov V.G., Krysin A.G. Optimization of the process of grinding food materials in tops. *Processes and Food Production Equipment*. 2016, no. 2, pp. 32–39 (In Russian).
3. Nekoz O.I., Osipenko V.I., Filimonova N.V., Batrachenko O.V. Hydraulic resistance of the cutting unit of the tops. *Herald of Khmelnytsky National University*. 2015, no. 6, pp. 13–19 (In Ukrainian).
4. Shakhov S.V., Pelenko V.V., Verboloz E.I., Gruzdev P.V. Theoretical description of the law of distribution of food material pressure along the length of the screw channel of the auger depending on the friction forces in conditions of constrained compression. *FES: Finance. Economy*. 2018, V. 15, no. 9, pp. 61–69 (In Russian).
5. Pelenko V.V., Ivanenko V.P., Verboloz E.I., Usmanov I.I. Evaluation of the influence of the tilt of the screw surface of the last turn of the top screw on the pressure of raw materials in the cutting zone. *Processes and Food Production Equipment*. 2018, no. 3, pp. 26–34 (In Russian).
6. Gruzdev I. E. Processing of food masses in screw devices. *Candidate's thesis*. Leningrad, 1985. 348 p. (In Russian).
7. Pelenko V.V., Pohlchenko V.A., Usmanov I.I., Somov A.A., Smirnov A.A. Mathematical modeling and calculation of design parameters of shredders with variable pitch of the screw line of the screw. *Herald of the Murmansk State Technical University*. 2017, V. 20, no. 3, pp. 556–562 (In Russian).
8. Fatykhov Yu., Kanopka L. *Extrusion technologies of food production*. Vilnius: Technique, 2007. 88 p. (In Russian).
9. Pelenko V.V., Ivanenko V.P., Usmanov I.I. Modeling of torque for central locking nuts of the top. *XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present plus*. 2018, V. 7, no. 3(43), pp. 105–108.
10. Pelenko V., Ivanenko V., Verboloz E., Demchenko V., Usmanov I. Formation of the correct mathematical model of grinding raw meat in meat mincer. *Biological Resources Development and Environmental Management. KnE Life Sciences*, 2020, pp. 12–26 (In Russian).
11. Usmanov I.I., Pelenko V.V. *Elements of the theory of calculation of tops*. St. Petersburg, Noshir. 2018. 88 p. (In Russian).
12. Pelenko V.V., Zuev N.A., Olshevsky R.G., Ivanenko V.P., Krysin A.G. Evaluation of the dependence of the performance of meat grinders on their design and physical and mechanical properties of raw materials. *Journal International Academy of Refrigerator*. 2015, no. 1, pp. 9–15 (In Russian).
13. Kublanov M.S. *Mathematical modeling. Methodology and methods for developing mathematical models of mechanical systems and processes*. Part 1. Moscow, Moscow State Technical University of Civil Aviation Publ., 2013. 108 p. (In Russian).
14. Ivashov V.I. *Technological equipment of enterprises of the meat industry*. Part 2. The equipment for processing of meat. St. Petersburg, GIORД Publ., 2007. 464 p. (In Russian).
15. Daursky A.N., Machikhin Yu.A. *Cutting food materials*. Moscow, Food industry Publ., 1980. 240 p. (In Russian).

*Статья поступила в редакцию 05.02.2020*