

УДК 661.43.065.004.12

## Применение новых режущих инструментов для измельчения мясного сырья

Д-р техн. наук В.Я.ГРУДАНОВ; канд. техн. наук А.А.БРЕНЧ; канд. техн. наук Л.Т.ТКАЧЕВА

Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

С.Н.ХОДАКОВА

Могилевский государственный университет продовольствия, Республика Беларусь

**Ключевые слова:** измельчение, нож, производительность, режущий инструмент, режущая способность, решетка, температура, удельная энергоёмкость.

**Keywords:** grinding, knife, performance, cutting instrument, cutting ability, lattice, temperature, specific energy consumption.

При производстве колбасных изделий широко применяются машины для первичного измельчения мясного сырья: мясорубки и промышленные волчки. При выпуске готовой продукции с измельчением связано около 70 % технологических операций, а процессы измельчения являются наиболее трудоемкими и энергоёмкими. Однако серийно выпускаемые мясорубки и волчки в ряде случаев не отвечают технологическим требованиям по своим технико-экономическим показателям и характеризуются крайне низкой эксплуатационной надежностью, которая, в свою очередь, обусловлена невысокой износостойкостью режущих инструментов: вращающихся ножей и неподвижных перфорированных решеток.

Срок службы режущего инструмента (волчка) составляет всего около 20 ч. Инструмент выдерживает 3–4 переточки, после этого режущий слой стачивается и многоэлементный инструмент подлежит замене. Наиболее остро эта проблема стоит на мясокомбинатах при выпуске вареных и копченых колбасных изделий, где процесс измельчения является определяющим фактором качества готовой продукции [1–3].

Из-за низкой износостойкости режущих инструментов для каждого волчка необходимо иметь в год в среднем 8–10 стандартных комплектов режущих механизмов, состоящих из трех ножевых решеток и двух вращающихся ножей, установленных между ними. Проблема усложняется также тем, что режущие инструменты в Республике Беларусь не производятся, а в основном закупаются на Украине, в Германии, Австрии, Финляндии и других странах.

Таким образом, высокий расход металла, низкое качество готовых мясных изделий, значительные затраты на приобретение режущего инструмента за рубежом — все это выливается в проблему, имеющую важное народно-хозяйственное значение.

Рабочие органы мясоперерабатывающих машин должны обладать высокой износостойкостью, в противном случае продукты их износа попадают в обрабатываемое сырье, что снижает его качество и пищевую ценность. Повышение износостойкости де-

талей рабочих органов волчков и мясорубок — один из существенных резервов увеличения долговечности и надежности мясоизмельчающих машин, снижения издержек при эксплуатации и производстве. Создание наукоемкой и конкурентоспособной конструкции режущего механизма для всего типоразмерного класса мясоизмельчающих машин обеспечит большой экономический эффект, уменьшит экономическую зависимость страны.

Разработке новых режущих инструментов предшествовали теоретические исследования, направленные на создание новой конструкции вращающихся ножей. Основное отличие новой конструкции состоит в том, что передние грани перьев ножа выполнены наклонными, причем угол наклона передних граней перьев второго ножа больше угла наклона передних граней первого ножа, а толщина ножей увеличена с 20 до 30 мм (для волчка типа К6-ФВЗП-200). Такая конструкция ножей позволяет выполнять одновременно и функцию винтов, проталкивающих продукт через отверстия ножевых решеток (ножи работают как витки шнека).

Существенной модернизации подверглась и конструкция выходной ножевой решетки. Традиционно в выходных ножевых решетках применяется ромбическое расположение отверстий (отверстия располагаются в вершинах треугольников), в результате этого при вращении ножа на рабочей поверхности решетки образуются «мертвые зоны» и площадь проходного сечения уменьшается. Данного эффекта можно избежать, если располагать отверстия по концентрическим окружностям.

С целью снижения сопротивления при прохождении мясного сырья через отверстия предлагается уменьшить толщину перфорированной части выходной ножевой решетки. Расчеты показывают, что уменьшение толщины решетки с 14 до 8 мм снижает ее гидравлическое сопротивление почти вдвое за счет уменьшения линейных потерь [4, 5].

*Обобщенная характеристика режущего инструмента волчка.* Цель настоящих исследований — создание высокоэффективной режущей пары нож-решетка для измельчителей сырья животного происхождения на основе последних достижений науки в данной области. В связи с этим были проведены теоретические и экспериментальные исследования по усовершенствованию режущего инструмента мясоизмельчительного оборудования.

Детальное изучение влияния геометрических и конструктивных параметров режущего инструмента на качество измельчения и на энергетические характеристики мясорубок и волчков до настоящего времени не проводилось.

На основе системного анализа литературных данных для определения основных конструктивных параметров ножа была получена зависимость:

$$\Omega_{\text{ножа}} = f(l_n, \alpha, \beta),$$

где  $\Omega_{\text{ножа}}$  — режущая способность ножа;  $l_n$  — длина режущих кромок зуба ножа, м;  $\alpha$  — угол скольжения, град;  $\beta$  — угол наклона пера, град.

Для оценки конструкции ножевой решетки предложена следующая зависимость:

$$\Omega_{\text{реш}} = f(K, b),$$

где  $\Omega_{\text{реш}}$  — режущая способность ножевой решетки;  $K$  — коэффициент перфорации ножевой решетки;  $b$  — толщина ножевой решетки, м.

При этом отметим, что с увеличением длины  $l_n$  режущих кромок ножа эффективность его работы повышается. Наличие наклона передней поверхности зуба (пера) ножа  $\beta$  также способствует более интенсивному продвижению измельчаемого сырья через ножевую решетку, а скользящее резание обуславливает более качественное измельчение продукта при минимально возможных затратах энергии за счет угла скольжения  $\alpha$ . Коэффициент перфорации ножевой решетки  $K$  характеризует прежде всего ее пропускную способность: с увеличением  $K$  пропускная способность решетки возрастает. Толщина ножевой решетки  $b$  отрицательно влияет на работу режущей пары нож–решетка.

С учетом вышеизложенного в качестве критерия оценки режущей способности пары нож–решетка целесообразно предложить зависимость:

$$\Omega = K \frac{l_n}{b \cos \alpha \cos \beta}, \quad (1)$$

где  $K = \Sigma f_0 / F_n$  — отношение суммарной площади отверстий к общей площади ножевой решетки.

Из формулы (1) следует, что с увеличением  $K$ ,  $l_n$ ,  $\cos \alpha$  и  $\cos \beta$  и с уменьшением  $b$  критерий оценки возрастает. В разработанной (новой) конструкции режущей пары нож–решетка главные геометрические параметры  $K$ ,  $l_n$ ,  $\cos \alpha$  и  $\cos \beta$  выше, чем в серийной, а толщина новой решетки  $b$  меньше. Поэтому для новой конструкции режущей пары нож–решетка значение критерия  $\Omega$  будет больше.

Критерий оценки режущей способности пары нож–решетка ( $\Omega$ ) рассчитывается после измерения геометрических параметров серийных ножа и решетки и нового ножа и решетки (рис. 1).

Исходные данные:  $F_p$  — полезная площадь решетки, м<sup>2</sup> ( $F_p = 0,0036$  м<sup>2</sup>);  $d_{\text{отв}}$  — диаметр отверстий в решетке, м ( $d_{\text{отв}} = 0,003$  м);  $z$  — количество отверстий в решетке, ( $z_{\text{сер.реш}} = 217$ ,  $z_{\text{нов.реш}} = 233$ );  $l_n$  — длина режущей кромки зуба ножа, м ( $l_{\text{сер.н}} = 0,02$  м,  $l_{\text{нов.н}} = 0,003$  м);  $b$  — толщина ножевой решетки, м

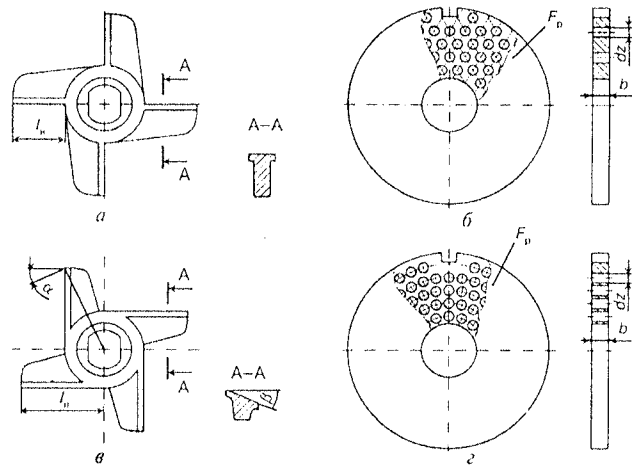


Рис. 1. Схемы режущих инструментов: а — серийный нож; б — серийная решетка; в — новый нож; г — новая решетка

( $b_{\text{сер.реш}} = 0,007$  м,  $b_{\text{нов.реш}} = 0,006$  м);  $\alpha$  — угол скольжения, град. ( $\alpha_{\text{сер}} = 0^\circ$ ,  $\alpha_{\text{нов}} = 35^\circ$ );  $\beta$  — угол наклона пера, град ( $\beta_{\text{сер}} = 0^\circ$ ,  $\beta_{\text{нов}} = 15^\circ$ ).

Расчет критериев оценки режущей способности пары нож–решетка. Коэффициент перфорации ножевой решетки ( $K$ ) определяется как отношение суммарной площади отверстий к полезной площади ножевой решетки по формуле  $K = \Sigma f_0 / F_n$ . Критерий оценки режущей способности пары нож–решетка ( $\Omega_1$ ) для серийных ножа и решетки с отверстиями, расположенными по ромбической сетке:

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= K \frac{l_n}{b \cos \alpha \cos \beta} = \frac{l_{\text{сер.реш}} l_{\text{сер}}}{b_{\text{сер.реш}} \cos \alpha_{\text{сер}} \cos \beta_{\text{сер}}} = \\ &= \frac{0,425 \cdot 0,02}{0,006 \cdot 1 \cdot 1} = 0,42. \end{aligned}$$

Критерий оценки режущей способности пары нож–решетка ( $\Omega_2$ ) для серийного ножа и новой решетки с отверстиями, расположенными по окружности:

$$\begin{aligned} \Omega_2 &= K \frac{l_n}{b \cos \alpha \cos \beta} = \frac{l_{\text{сер.реш}} l_{\text{сер}}}{b_{\text{нов.реш}} \cos \alpha_{\text{сер}} \cos \beta_{\text{сер}}} = \\ &= \frac{0,465 \cdot 0,02}{0,0045 \cdot 1 \cdot 1} = 2,03. \end{aligned}$$

Критерий оценки режущей способности пары нож–решетка ( $\Omega_3$ ) для нового ножа и серийной решетки с отверстиями, расположенными по ромбической сетке:

$$\begin{aligned} \Omega_3 &= K \frac{l_n}{b \cos \alpha \cos \beta} = \frac{l_{\text{сер.реш}} l_{\text{нов}}}{b_{\text{сер.реш}} \cos \alpha_{\text{нов}} \cos \beta_{\text{нов}}} = \\ &= \frac{0,425 \cdot 0,03}{0,006 \cdot 0,8 \cdot 0,9} = 2,95. \end{aligned}$$

Критерий оценки режущей способности пары нож–решетка ( $\Omega_4$ ) для нового ножа и решетки с отверстиями, расположенными по окружности:

$$\begin{aligned} \Omega_4 &= K \frac{l_n}{b \cos \alpha \cos \beta} = \frac{l_{\text{нов.реш}} l_{\text{нов}}}{b_{\text{нов.реш}} \cos \alpha_{\text{нов}} \cos \beta_{\text{нов}}} = \\ &= \frac{0,465 \cdot 0,03}{0,0045 \cdot 0,8 \cdot 0,9} = 4,22. \end{aligned}$$

Экспериментальные исследования процесса измельчения мясного сырья. Для проведения эксперименталь-

ных исследований разработан и изготовлен стенд, который позволяет определить влияние конструктивных параметров режущего инструмента на эффективность работы мясорубок, в частности на производительность, качество измельчения и удельную энергоёмкость процесса (рис. 2).

Были исследованы конструктивные параметры серийного и усовершенствованного режущего инструмента (ножи и решетки). Испытания проводили на экспериментальном стенде, который состоит из мясорубки типа МИМ-300, вспомогательных приспособлений, контрольно-измерительных приборов и приборов автоматики. Экспериментальная установка работает следующим образом: привод 1 машины, состоящий из электродвигателя и цепной передачи, приводит во вращение шнек 4, который стыкуется с ним через хвостовик 5, частота вращения которого измеряется тахометром 16. Сырье, масса которого измеряется с помощью весов 8 марки ВР-03МС, загружается в емкость питателя 12 и поршнем 13 подается к шнеку. Шнек захватывает сырье и транспортирует вдоль камеры к режущему инструменту. Температура продукта в корпусе машины измеряется с помощью хромель-алюмелевых термопар, подключенных к милливольтметру. Холодный спай термопар находится в сосуде Дюара. Контроль температуры выходного сырья осуществляется термометром 23. Продолжительность процесса измельчения измеряется секундомером 17.

В качестве независимых управляемых переменных, характеризующих работу мясорубки, приняты: критерий оценки режущей способности инструмента ( $\Omega$ ); частота вращения ножа ( $n$ ,  $\text{с}^{-1}$ ); сила давления на продукт ( $F_{\text{пр}}$ , Н); усилие затяжки режущего инструмента ( $P_{\text{зат}}$ , Н). Критерий оценки режущей способности па-

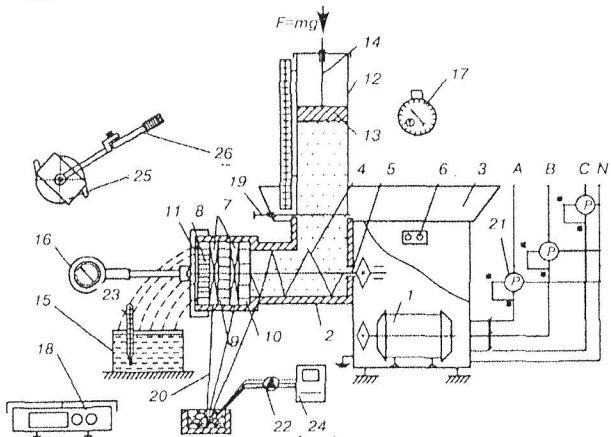


Рис. 2. Экспериментальный стенд для определения влияния конструктивных параметров режущего механизма на эффективность работы: 1 — привод мясорубки; 2 — рабочая головка (корпус); 3 — загрузочная чаша; 4 — шнек; 5 — хвостовик; 6 — пускатель; 7 — вращающиеся ножи; 8 — выходная ножесвая решетка; 9 — перфорированная решетка; 10 — подрезная решетка; 11 — вкладыш; 12 — корпус питателя; 13 — поршень; 14 — шток; 15 — приемный сосуд; 16 — тахометр; 17 — секундомер; 18 — весы ВР-03МС; 19 — запирающая заслонка; 20 — термопары ТХА; 21 — ваттметр Д5004; 22 — переключатель; 23 — ртутный термометр ТТ; 24 — милливольтметр М1200; 25 — накидное устройство; 26 — динамометрический ключ

### Результаты экспериментальных исследований режущих инструментов

№ опыта	$\Omega$	$n_{\text{пр}}, \text{с}^{-1}$	$F_{\text{пр}}, \text{Н}$	$P_{\text{зат}}, \text{Н}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$Q, \text{кг/ч}$	$N_{\text{уд}}, \text{Вт}\cdot\text{ч/кг}$
1	1,42	3,6	100	5,7	12,5	284	2,25
2	2,03	3,6	150	11,4	13,2	287	2,42
3	2,95	3,6	200	14,3	12,1	293	2,5
4	4,22	3,6	250	8,6	11,1	300	2,21
5	1,42	4	250	14,3	15,2	288	2,79
6	2,03	4	200	8,6	11,6	294	2,41
7	2,95	4	150	5,7	9,7	300	2,24
8	4,22	4	100	11,4	10,3	297	2,3
9	1,42	4,3	150	8,6	11,9	300	2,46
10	2,03	4,3	100	14,3	11,0	298	2,58
11	2,95	4,3	250	11,4	12,1	313	2,38
12	4,22	4,3	200	5,7	8,2	316	2,18
13	1,42	4,6	200	11,4	11,9	308	2,59
14	2,03	4,6	250	5,7	9,6	307	2,36
15	2,95	4,6	100	8,6	8,6	310	2,3
16	4,22	4,6	150	14,3	9,8	313	2,47

ра нож-решетка ( $\Omega$ ) варьировал в пределах от 1,42 до 4,22, причем верхний уровень фактора 4,22; нижний — 1,42; средний — 2,03 и 2,95. Частота вращения ножа ( $n$ ) изменяли в диапазоне от 3,6 до 4,6  $\text{с}^{-1}$  ( $n_1 = 3,6 \text{ с}^{-1}$ ,  $n_2 = 4 \text{ с}^{-1}$ ,  $n_3 = 4,3 \text{ с}^{-1}$ ,  $n_4 = 4,6 \text{ с}^{-1}$ ), где верхний уровень фактора — 4,6, нижний — 3,6, средний — 4 и 4,3. Силу давления на продукт ( $F_{\text{пр}}$ ) изменяли в диапазоне от 100 до 250 Н ( $F_{\text{пр}1} = 100 \text{ Н}$ ,  $F_{\text{пр}2} = 150 \text{ Н}$ ,  $F_{\text{пр}3} = 200 \text{ Н}$ ,  $F_{\text{пр}4} = 250 \text{ Н}$ ), где верхний уровень фактора — 250, нижний — 100, средний — 150 и 200. Усилие затяжки режущего механизма ( $P_{\text{зат}}$ ) изменяли в диапазоне от 5,7 Н до 14,3 Н ( $P_{\text{зат}1} = 5,7 \text{ Н}$ ,  $P_{\text{зат}2} = 8,6 \text{ Н}$ ,  $P_{\text{зат}3} = 11,4 \text{ Н}$ ,  $P_{\text{зат}4} = 14,3 \text{ Н}$ ), где верхний уровень фактора — 14,3, нижний — 5,7, средний — 8,6 и 11,4.

В качестве выходных искомым параметров определяются: изменение температуры сырья в процессе измельчения  $\Delta t$ ,  $^\circ\text{C}$ ; производительность мясорубки  $Q$ ,  $\text{кг/ч}$ ; удельная энергоёмкость мясорубки  $N_{\text{уд}}$ ,  $\text{Вт}\cdot\text{ч/кг}$ . В таблице представлены результаты исследований эффективности работы режущего инструмента, соответствующие многофакторному плану эксперимента греко-латинского квадрата  $4 \times 4$ .

После обработки результатов эксперимента получена графическая зависимость изменения температуры от управляемых переменных: критерия оценки режущей способности инструмента ( $\Omega$ ), частоты вращения ножей ( $n_{\text{пр}}$ ); силы давления на продукт ( $F_{\text{пр}}$ ), усилия затяжки режущего инструмента ( $P_{\text{зат}}$ ) (рис. 3).

Полученный график позволяет оценить степень влияния режимно-конструктивных параметров мясорубки на прирост температуры обрабатываемого сырья в процессе измельчения. Для прогнозирования и расчетов основных технологических характеристик обрабатываемого сырья после обработки экспериментальных данных получено уравнение, позволяющее определять изменение (прирост) температуры во время измельчения:

$$\Delta t = 16,3\Omega^{-0,24}n_{\text{пр}}^{-0,87}F_{\text{пр}}^{0,11}P_{\text{зат}}^{0,22}, \quad (2)$$

где  $\Omega$  — критерий оценки режущей способности инструмента;  $n_{\text{пр}}$  — частота вращения ножей,  $\text{с}^{-1}$ ;  $F_{\text{пр}}$  — сила давления на продукт, Н;  $P_{\text{зат}}$  — усилие

затяжки режущего инструмента, Н. Как видим, наибольшее влияние на изменение температуры в процессе измельчения оказывает частота вращения ножей. Также достаточно сильно влияет комплектация режущего инструмента, т.е. режущая способность пары нож–решетка. Математические расчеты показали, что зависимость изменения температуры носит обратно пропорциональный характер от критерия оценки режущей способности, что, в свою очередь, подтверждает положительный эффект при использовании в процессе измельчения нового режущего инструмента.

Для графического отражения влияния конструктивных параметров режущего инструмента на эффективность работы мясорубки была построена зависимость производительности мясорубки ( $Q$ , кг/ч) от управляемых переменных  $\Omega$ ,  $n_{пр}$ ,  $F_{пр}$ ,  $P_{зат}$  (рис. 4).

Производительность мясорубки  $Q$  — основная ее техническая характеристика, так как имеет определяющее значение для процесса измельчения.

При обработке полученных экспериментальных данных получена эмпирическая зависимость производительности мясорубки от конструктивных параметров режущего инструмента:

$$Q = 172,7\Omega^{0,04}n_{пр}^{0,31}F_{пр}^{0,02}P_{зат}^{-0,02}. \quad (3)$$

Комплексные исследования влияния режимно-конструктивных параметров режущего инструмента на эффективность работы мясорубки позволили научно обоснованно подойти к расчету, осуществлению и прогнозированию процесса первичного измельчения мясного сырья.

Проанализировав полученную эмпирическую зависимость, можно сделать вывод о значительном влиянии частоты вращения и критерия оценки режущей способности на производительность волчка. Влияние этих входных управляемых параметров на процесс измельчения носит прямо пропорциональный характер. С ростом частоты вращения и увеличением значения критерия оценки режущей способности возрастает и производительность волчка.

На рис. 5 представлена зависимость удельной энергоемкости мясорубки ( $N_{уд}$ , Вт·ч/кг), выбранная основным энергетическим параметром, характери-

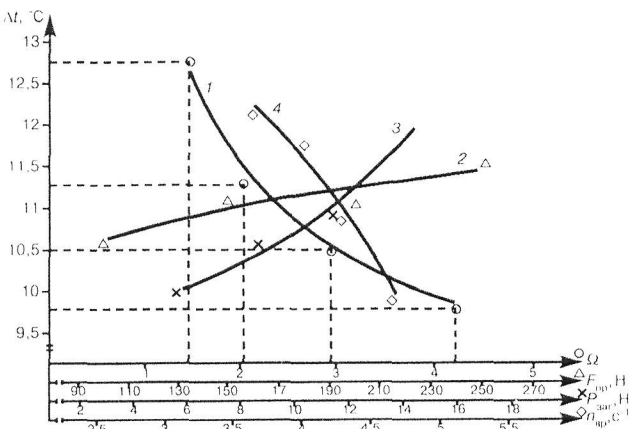


Рис. 3. Зависимость изменения температуры от управляемых переменных: 1 —  $\Omega$ ; 2 —  $F_{пр}$ ; 3 —  $P_{зат}$ ; 4 —  $n_{пр}$

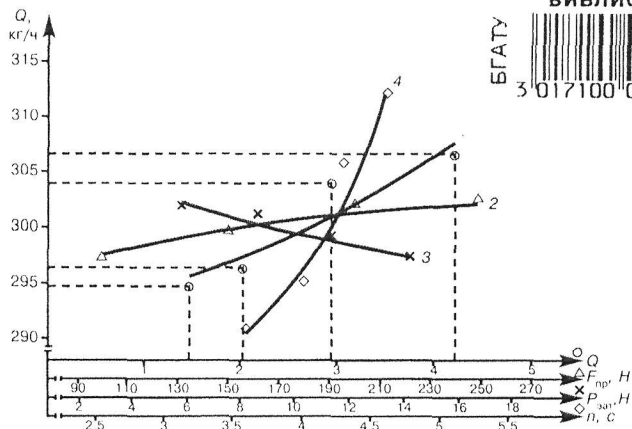


Рис. 4. Зависимость производительности мясорубки от управляемых переменных: 1 —  $\Omega$ ; 2 —  $F_{пр}$ ; 3 —  $P_{зат}$ ; 4 —  $n_{пр}$

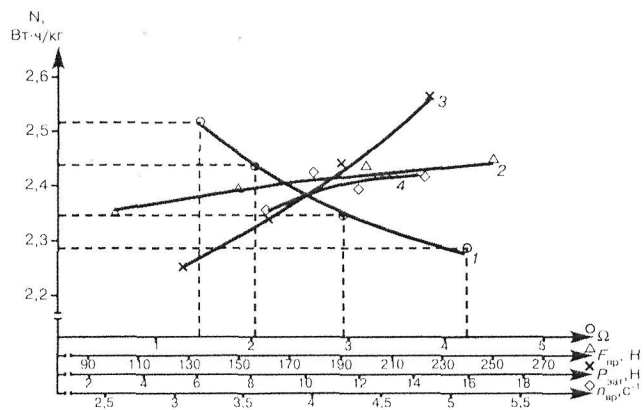


Рис. 5. Зависимость удельной энергоемкости волчка от управляемых переменных: 1 —  $\Omega$ ; 2 —  $F_{пр}$ ; 3 —  $P_{зат}$ ; 4 —  $n_{пр}$

зующим работу мясорубок и волчков, от  $\Omega$ ,  $n_{пр}$ ,  $F_{пр}$ ,  $P_{зат}$ . Уравнение для определения удельной энергоемкости процесса мелкого измельчения имеет вид:

$$N_{уд} = 1,36\Omega^{-0,08}n_{пр}^{0,12}F_{пр}^{0,03}P_{зат}^{0,14}. \quad (4)$$

Как видно из уравнения (4), зависимость удельной энергоемкости от критерия оценки режущей способности носит обратно пропорциональный характер, т.е. с увеличением режущей способности наблюдается снижение энергоемкости процесса измельчения. Полученные зависимости изменения температуры сырья, производительности и удельной энергоемкости от режимных и конструктивных особенностей режущего механизма мясорубок и волчков говорят о целесообразности применения усовершенствованных конструкций ножей и решеток.

#### Л и т е р а т у р а

1. Тимошук, И.И. Общая технология мяса и мясopодуктов / И.И.Тимошук [и др.]. — М., 1989.
2. Косой, В.Д. Совершенствование процесса производства вареных колбас / В.Д.Косой. — М., 1983.
3. Пелеев, А.И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности / А.И.Пелеев. — М., 1971.
4. Груданов, В.Я. Золотая пропорция в инженерных задачах / В.Я.Груданов. — Могилев, 2006.
5. Патент № 2047368 РФ. В02С 18/36. Решетка к измельчителю мясокостного сырья / В.Я.Груданов, А.П.Манько, В.И.Иванцов; заявл. 16.11.92., опубли. 10.11.95. Б.И. № 31.