



Повышение эффективности измельчения сахарной свеклы в центробежных свеклорезках

Ф. Я. Рудик¹, С. А. Богатырев^{1*}, А. П. Ковылин²,
М. С. Тулиева³

¹ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (г. Саратов, Российская Федерация)

²ООО «Анастасьинское» (с. Анастасьино, Российская Федерация)

³НАО «Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана» (г. Уральск, Республика Казахстан)

*tettet@inbox.ru

Введение. Измельчение сахарной свеклы должно осуществляться с минимальными потерями в центробежных свеклорезках ножами особой конструкции, обеспечивающими частое и постоянное хаотичное продольно-поперечное изрезание кольцевых проводящих сучков свеклы. Используемые ножи с ромбовидной режущей кромкой обладают низкими показателями безотказности и долговечности. Значительные динамические нагрузки, приходящиеся на режущие грани ножа от ударов измельчаемой свеклы, ведут к усталостным разрушениям граней и изнашиванию режущих кромок. Неудовлетворительные показатели безотказности ножей приводят к ухудшению на 28 % качественных составляющих стружки и к потерям сахарозы. Поломки и ежесменные перезаточки режущих кромок способствуют снижению прочностных характеристик ножей. Целью работы является повышение надежности ножей центробежных свеклорезок путем конструктивно-технологического укрепления в процессе их производства и восстановления.

Материалы и методы. Рациональные параметры измельчения оценивались двумя показателями: толщиной и длиной стружки. Состояние режущих кромок ножей определялось микрометражом износа и деформации граней. Физико-механические показатели анализировались на основании величин износостойкости, микротвердости, выносливости на изгиб.

Результаты исследования. В результате анализов дефектного состояния ножей центробежных свеклорезок и теоретических исследований процесса измельчения были сформулированы факторы, влияющие на проницаемость стружки и эффективность ее измельчения ножами специальной ромбовидной конструкции. Экспериментальные исследования позволили установить динамически обоснованные конструктивные параметры усовершенствованного ножа, изготовленного накаткой.

Обсуждение и заключение. Была проведена производственная проверка качества измельчения сахарной свеклы в зависимости от технического состояния ножей. Предложенные меры обеспечили повышение показателей долговечности ножей на 27–30 %, износостойкости режущих кромок на 20 %, предела выносливости режу-



щих граней на 25 % и посменное увеличение длины стружки на 18–20 % с повышением ее проницаемости на 16–18 %.

Ключевые слова: сахарная свекла, измельчение, стружка, режущая грань, режущая кромка, дефектное состояние, технология, восстановление, изготовление, износостойкость, выносливость на изгиб, безотказность, долговечность

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Повышение эффективности измельчения сахарной свеклы в центробежных свеклорезках / Ф. Я. Рудик, С. А. Богатырев, А. П. Ковылин, М. С. Тулиева. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202101.037-055](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.037-055) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 1. – С. 37–55.

Original article

Improving the Efficiency of Grinding Sugar Beet in Centrifugal Beet Cutters

F. Ya. Rudik^a, S. A. Bogatyrev^{a*}, A. P. Kovylin^b,
M. S. Tulieva^c

^aSaratov State Agrarian University (Saratov, Russian Federation)

^bAnastasinskoe LLC (Anastasino, Russian Federation)

^cZhangir Khan University (Uralsk, Republic of Kazakhstan)

*tettet@inbox.ru

Introduction. Grinding sugar beet should be carried out with minimal losses in centrifugal beet cutters with specially designed knives that provide frequent and constant chaotic longitudinal-lateral cutting of circular conductive beet knots. The objective of the work is to increase the reliability of the knives of centrifugal beet cutters by structural and technological strengthening in the process of their production and restoration.

Materials and Methods. The state of the cutting edges of the knives was determined by using the micrometric measurement of the wear and deformation of the edges. Physical and mechanical indicators were analyzed based on the values of wear resistance, microhardness, and bending endurance.

Results. The analyzes of the defective state of the knives of centrifugal beet cutters and theoretical studies of the grinding process have allowed formulating the factors affecting the permeability of the beet chips and the efficiency of their grinding with knives of a special diamond-shaped design. Experimental studies have made it possible to establish dynamically substantiated design parameters of an improved knurled knife.

Discussion and Conclusion. The proposed measures ensured an increase in the durability of knives by 27–30%, the relative wear resistance of cutting edges by 20%, the limit of endurance of cutting edges for bending by 25% and a shift increase in the length of chips by 18–20% with an increase in its permeability by 16–18%.

Keywords: sugar beet, grinding, chips, cutting edge, cutting hem, defective condition, technology, restoration, production, wear resistance, bending endurance, reliability, durability

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Rudik F.Ya., Bogatyrev S.A., Kovylin A.P., et al. Improving the Efficiency of Grinding Sugar Beet in Centrifugal Beet Cutters. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(1):37-55. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.037-055>

Введение

Сахар необходим для обогащения организма человека углеводами. Годовое потребление этого продукта питания в России составляет порядка 5,5 млн т [1; 2]. В стране в настоящее время действует около 100 сахарных заводов с различными производственными мощностями. При этом слабым технологическим звеном при производстве сахара является процесс измельчения сахарной свеклы в стружку, от которого зависит массоотдача глюкозы и фруктозы в диффузионном аппарате [3; 4]. Качество измельчения сахарной свеклы оценивается формой и размерами измельченных частиц в центробежной свеклорезке, а они, в свою очередь, обеспечиваются использованием ножей специальной конструкции. Значительные динамические нагрузки от ударных воздействий корнеплодов свеклы на ножи и их последующее инерционное измельчение ведут к поломкам и выкрашиванию режущих граней, что в итоге ведет к значительным потерям сахара, доходющим до 28–30 %.

Цель работы заключается в повышении показателей безотказности и долговечности ножей центробежных свеклорезок путем конструктивно-технологического упрочнения при их производстве и восстановлении.

Задачи исследования: теоретически и экспериментально установить особенности работы и причины дефектного состояния ножей центробежных свеклорезок во взаимосвязи с качественными показателями измельчаемой стружки; усовершенствовать конструкцию режущих граней ножа с повышенными показателями выносливости на изгиб и износостойкости; разработать технологию изготовления и восстановления ножей методами объемной пластической деформации и накатки; исследовать качественные показатели свекловичной стружки в зависимости от наработки ножей.

Обзор литературы

Перерабатывающие технологии продукции растениеводства и животноводства во многом зависят от операций ее измельчения. Причем процесс измельчения зависит от биологического строения, физико-механических свойств и иных составляющих продукта измельчения [5; 6]. Качество измельчения влияет на продуктивную ценность, ресурсосбережение, себестоимость и прочие показатели производства продуктов питания [7].

Необходимость изучения технологии измельчения сахарной свеклы обусловлена прежде всего ее биологическим строением. В корнеплоде природой заложены концентрические кольца проводящих пучков, а между ними имеется рыхлая паренхимная ткань, в которой и откладываются сахара. Эта особенность строения сахарной свеклы и вызывает затруднения в высвобождении свекловичного сока с растворенной в нем сахарозой [8; 9]. Отсюда и возникли особые требования к измельчающим свеклу ромбовидным режущим инструментам, совершающим частое продольно-поперечное перемещение. При этом установлены качественные показатели свекловичной стружки: длина 11–14 мм в 100 г навески измельченного продукта и площадь поперечного сечения, которая должна составлять от 1,5 до $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Соблюдение вышеуказанных параметров стружки позволяет получить ее максимальную проницаемость и, соответственно, выход сахара в диффузионной камере [10; 11]. Однако применяемые в настоящее время на сахарных заводах технологические операции измельчения свеклы в центробежных свеклорезках обладают нестабильными и низкими показателями выхода сахара [12]. Исследователями процесса измельчения корнеплодов установлены энергосиловые

взаимодействия сахарной свеклы с неподвижным цилиндром и с ножевыми рамами свеклорезок [13]. При этом установлены усилия, действующие на ножи, что дало возможность характеризовать процесс измельчения как динамически жесткий [14]. В последующих исследованиях были установлены режимные показатели измельчения корнеплодов (табл. 1) [15].

Данные таблицы 1 указывают на доминирующие нагрузки, приходящиеся на нож.

Расчетно-опытным путем установлено, что нагрузки, приходящиеся на режущие грани и кромки свеклорезного ножа (рис. 1), ведут к образованию дефектов: невозстанавливаемым (деформациям и поломкам граней) и восстанавливаемым (износу режущих кромок). Износ устраняется перезаточкой режущих кромок, число которых, вследствие укорачивания длины режущих граней и изменения в связи

с этим характера резания, ограничено 4-5 заточками [16].

На этом основании предложено конструктивно-технологическое совершенствование ножей, заключающееся в изменении конструкции режущих граней с повышением их прочности на изгиб и износостойкости режущей кромки за счет внесения корректировок в технологию изготовления [17].

В работе В. Б. Морозова приводятся данные о низких показателях работоспособности ножей и о необходимости повышения их прочности [18]. Конструкция ножа с гребенчатыми режущими гранями предложена более века назад и подвергалась только незначительным совершенствованиям.

Конструкции ножа с клиновидными режущими элементами не получили широкого распространения по причинам низкого качества свекловичной стружки и сложности изготовления инструмента [19; 20].

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Показатели рабочего процесса измельчения сахарной свеклы в центробежной свеклорезке

Indicators of the working process of grinding sugar beet in centrifugal beet cutting

Показатель / Indicator	Обозначение / Designation	Единица измерения / Unit	Значение / Value
Угловая скорость улитки / Angular velocity	ω	рад/с / rad/s	9,42
Скорость резания / Cutting speed	V	м/с / m/s	6,59
Сменная производительность / Productivity	P	т/сут / t/d	388–423
Число ударных воздействий на 1 нож в сутки / The number of impacts on 1 knife per day	N	цикл/сут / cicle/d	35 255–53 887
Общее усилие резания / Cutting force	F	Н / N	1 836,36–3 096,79
Момент от резания свеклы / Cutting moment	M	Н·м / N·m	1 285,46–2 167,75
Усилие прижатия свеклы при скольжении по граням ножа / The force of pressing beet when sliding on the edges of the knife	F_n	Н / N	8 427,88–9 193,95
Удельное давление свеклы при инерционном движении по режущим кромкам / Specific pressure of beet during inertial movement along cutting edges	f	Н/м / N/m	16 594,38–18 102,96

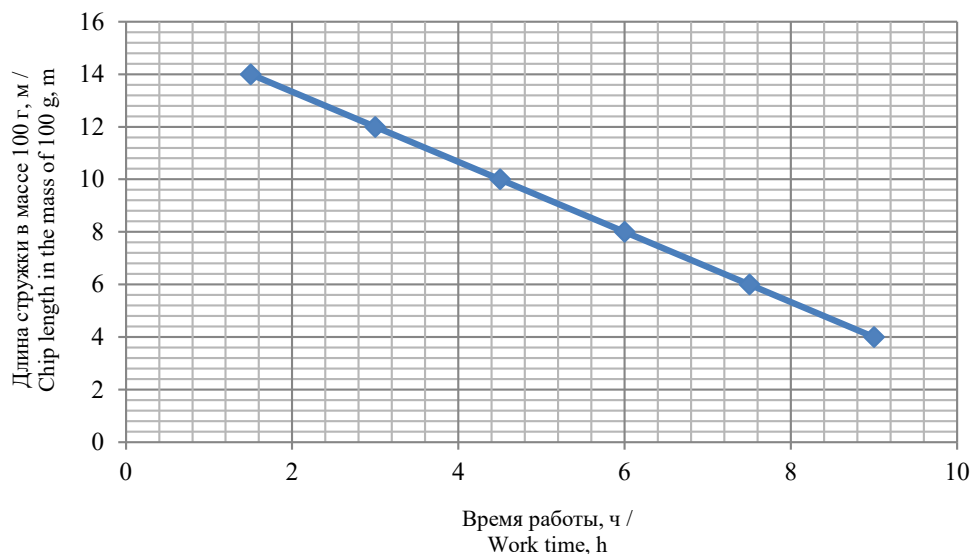


Р и с. 1. Нож свеклорезный 1011-В

F i g. 1. Beet cutter knife 1011-B

Экспериментально установлено, что только путем повышения показателей выносливости на изгиб и износостойкости можно повысить

параметры безотказности, обеспечивающие высокое качество измельчения свеклы в течение сменной работы (рис. 2).



Р и с. 2. Изменение длины свекловичной стружки в течение смены

F i g. 2. Change the length of beet chips during the shift

В соответствии с графиком, представленным на рисунке 2, резкое снижение качества стружки наблюдается уже после 5-6 часов наработки в смену, что приводит к потере 20–28 % сахарозы. Следовательно, отказы ножа по функциональным признакам, ведущим к изменению размеров и формы стружки, и по параметрическим, связанным с ухудшением проницаемости стружки, начинают проявляться уже в середине сменной наработки. В этой связи возникает необходимость продления наработки на отказ ножей до приемлемого срока, ограниченного временем окончания смены и устранения отказа, путем перезаточки ножей.

Увеличить ресурс ножей можно за счет повышения прочности режущих кромок на изгиб. Оригинальность и обоснованность применения метода пластической деформации для изготовления и восстановления режущего инструмента, используемого в перерабатывающих отраслях промышленности, приведены в изобретениях ученых ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» [21–24]. В ряде работ доказано, что режущий инструмент, используемый в пищевых производствах на предприятиях АПК и изготовленный методами горячей пластической деформации, обладает повышенной износостойкостью (на 15–20 %) и высокими показателями ресурсосбережения (коэффициент использования металла достигает 0,90–0,95) [25–27]. Перечисленные достоинства предлагаемой технологии подтверждают перспективность ее дальнейшего широкого использования.

Материалы и методы

Качество свекловичной стружки определялось уровнем проницаемости в процессе экстрагирования сахарозы, зависящей, в свою очередь, от длины стружки в 100 г навески, оптималь-

ная длина которой должна находиться в пределах от 8 до 14 мм, при этом количество брака не должно превышать 3 %.

Микрометражом определялись величины износов режущих граней по длине после каждой сменной наработки центробежной установки, а также после каждой перезаточки кромок ножей. Факты наличия короблений, выкрашиваний и усталостных поломок устанавливались визуально.

Процесс упрочнения режущих граней при их формировании методами горячей пластической деформации в штамповой оснастке и в накатном устройстве исследовался методом оценки микротвердости по глубине слоя режущих граней по срезам с интервалом 0,25 мм. Для оценки микротвердости образцов путем замера увеличенного отпечатка от алмазной пирамиды использовался прибор ПМТ-3.

Физические процессы упрочнения металла граней ножей оценивались показателями остаточных напряжений расширения или сжатия, а также плотностью дислокаций, образованных после воздействия пластической деформации. Для этих целей использовались методы рентгеноструктурных исследований.

Подсчет микронапряжений осуществлялся методом аппроксимации.

Износостойкость граней ножей исследовалась по циклу ускоренных испытаний методом моделирования условий внешнего воздействия на машине трения.

При испытаниях на выносливость на изгиб режущие грани ножа подвергались вибрационным нагрузкам на установке ВУ 5 / 5 000 с режимными характеристиками, сходными с условиями измельчения сахарной свеклы: диапазон изменения частоты колебаний от 5 до 5 000 Гц, ускорение устойчивости на изгиб 20 Н/см², максимальная амплитуда ускорений 1,8 мм, масса испытуемых образцов до 5 кг.

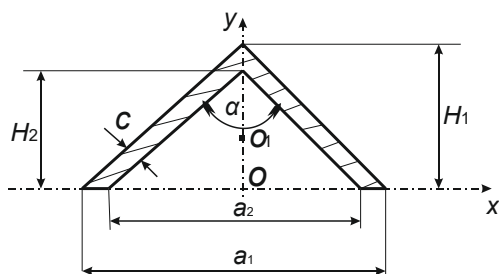
Результаты экспериментальных исследований обрабатывались с использованием стандартных прикладных программ Mathcad, Eureka, Excel.

Результаты исследования

При измельчении сахарной свеклы в центробежной свеклорезке возникают значительные инерционные силы трения свеклы о режущие кромки ножей. Измельчение сахарной свеклы представляет собой процесс резания с участием касательной силы с наличием скольжения при продольном перемещении. Процесс резания ужесточается за счет циклического ударного воздействия свеклы о режущие грани. В первом случае инерционное перемещение свеклы по граням ножа вызывает повышенный износ режущих граней, что после устранения следов износа и заточки режущих кромок вызывает уменьшение длины граней и, соответственно, ухудшение качества стружки. А во втором случае ударные нагрузки вызывают деформации граней и порождают знакопеременные колебания, ведущие к усталостным поломкам.

Дефектное состояние ножей ведет к недобору сахарозы по причине ухудшения качества стружки и необходимости частого устранения отказов.

С целью обоснования целесообразности повышения износостойкости и стойкости на изгиб исследовались динамические нагрузки, приходящиеся на режущие грани ножа (рис. 3).



Р и с. 3. Сечение режущей грани ножа

F i g. 3. Section of the cutting edge of the knife

Исходя из приведенной схемы, момент инерции при резании стружки определяется из выражения:

$$j_x = \frac{a_1 H_1^3}{12} - \frac{a_2 H_2^3}{12} - S, \quad (1)$$

где a_1 и a_2 – шаг грани и ширина полости грани соответственно, мм:

$$a_2 = a_1 - 2 \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (2)$$

H_1 и H_2 – высота грани и высота полости грани соответственно, мм; S – площадь сечения стружки, мм²:

$$S = \frac{C}{2} \left(a_1 \cos \frac{\alpha}{2} + 2H_1 \sin \frac{\alpha}{2} - 2C^2 \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right), \quad (3)$$

где C – толщина грани ножа, мм.

Момент инерции равен:

$$j_x = \frac{a_1 H_1^3}{12} - \frac{(a_1 - 2C^2 \sin \frac{\alpha}{2})(H_1 - 2C^2 \sin \frac{\alpha}{2})}{12} - \frac{H_1^2}{9} \cdot \frac{C}{2} \left(a_1 \sin \frac{\alpha}{2} + 2H_1 \sin \frac{\alpha}{2} - 2C^2 \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right). \quad (4)$$

Тогда напряжения, приходящиеся на грани ножа при инерционном резании, описываются выражением:

$$\sigma_{\text{гп}} = - \frac{P_y l}{3j} - \frac{P_x}{S}, \quad (5)$$

где P_y – усилие на грани ножа от прижатия свеклы, Н; P_x – усилие на

преодоление реакции свеклы на внедрение в нее граней ножа, H ; l – длина стружки, мм.

На режущие грани ножа действуют следующие нагрузки:

1. Сила реакции на внедрение свеклы в режущие грани:

$$N_x = \pi R[\sigma_{сж}] \frac{2H_1}{\cos \frac{\alpha}{2}}, \quad (6)$$

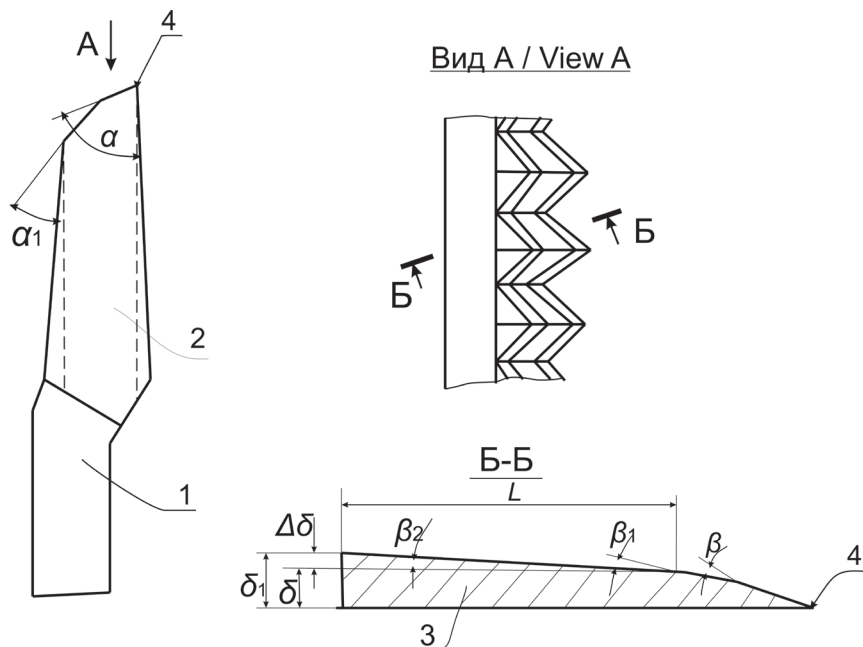
где R – условный радиус свеклы, мм; $[\sigma_{сж}]$ – напряжение сжатия свеклы, Н.

2. Сила преодоления режущей гранью изгиба стружки:

$$N_\beta = \frac{1}{2} [\sigma_{сж}] l \cdot a_2 = \frac{1}{2} [\sigma_{сж}] l (a_1 - 2 \sin \frac{\alpha}{2}). \quad (7)$$

Исходя из данных расчетов усилий, приходящихся на грани ножа при измельчении сахарной свеклы в центробежной свеклорезке, принято решение о повышении усталостной прочности путем конструктивного усовершенствования граней ножей (рис. 4) [28].

Упрочнение режущей грани ножа обеспечивается за счет создания переменного угла заострения от режущей кромки к основанию грани. Конструктивно грань ножа 3 подвергается утолщению путем приращения заострения от основного угла $\beta = 8-10^\circ$ с последующим утолщением стенки на углы β_1 , создающие дополнительное заострение на $4-5^\circ$ с вершиной 4 на расстоянии $1,5-2,0$ толщины сечения грани от начального состояния. Режущая кромка подвергается заострению основного α и дополнительного α_1 углов. Дополнительный угол заострения β_2 относи-



Р и с. 4. Конструкция ножа с упрочненными дном и вершиной грани: 1 – привалочная крепежная плоскость; 2 – кромка ножа; 3 – грань ножа; 4 – вершина

F i g. 4. Knife design with reinforced bottom and edge:

1 – mating plane; 2 – sharp edge; 3 – edge of knife; 4 – pointed top

тельно β и β_1 повышает толщину грани в опасном сечении на $\delta = 1,2-1,5$ мм, подвергаемом активному воздействию напряжений на изгиб граней по длине грани l . Данное утолщение режущих граней позволит повысить их выносливость на изгиб. Дополнительное упрочнение режущих граней и повышение их износостойкости обеспечивается за счет использования горячей пластической деформации заготовки в штамповой оснастке. Формообразование граней ножа осуществляется по схеме, представленной на рисунке 5.

Нагретая до $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ пластина заготовки 1 фиксируется штифтами 2 в полости зубчатой матрицы 3 . Пуансон штампа с зубьями, выполненными зеркально зубьям матрицы 4 , при срабатывании траверсы прессы формирует режущие грани ножа. Финишная обработка граней ножа осуществляется многофрезерной оснасткой в два прохода по каждой стороне ножа.

В разработанной оснастке, наряду со штамповкой профиля ножа при их изготовлении, возможно восстановление деформированных при работе режущих граней за счет использования дополнительных сменных формообразующих элементов матрицы и пуансона штампа.

Формообразование режущих граней и привалочной плоскости ножа обеспечивается прилагаемым к пуансону уси-

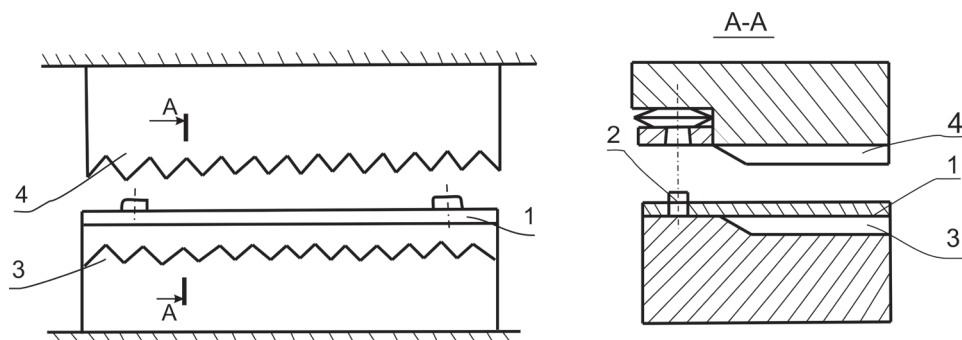
лием деформации. С учетом особенностей конструкции ножа усилие деформации рассчитывается выражением (8):

$$P = 2,87\sigma_s \sin \frac{\alpha}{2} S \cdot n, \quad (8)$$

где σ_s – напряжение текучести материала заготовки, зависящее от температуры ее нагрева (рекомендуемая температура $950-1\ 000\ ^\circ\text{C}$), МПа; α – угол режущей грани ножа, град; S – площадь поперечного сечения одного сектора режущей грани, м^2 ; n – количество режущих граней ножа, шт.

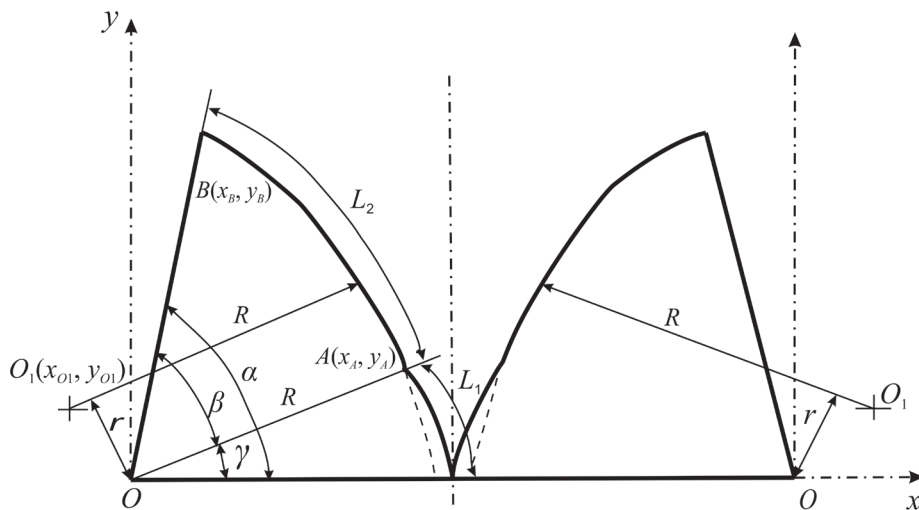
Для формообразования режущей части упрочненной конструкции ножа с переменным углом по длине грани предложена схема прокатки заготовки, полученной штамповкой, в установке со смещенными геометрическими осями валцов (рис. 6).

Математически обоснованное смещение геометрических осей валцов по предложенной схеме позволяет формировать постепенное с нарастающей по длине грани приращение ее толщины. Смещение геометрических осей валцов от точки O в точку O_1 обеспечивает получение лекальной деформирующей кривой на накатной установке с начальным радиусом от оси O с постепенным приращением радиуса кривизны на расстоянии L_1 с координатами $A(x_A, y_A)$,



Р и с. 5. Схема формообразования ножей в штампе

F i g. 5. The scheme of forming knives in the stamp



Р и с. 6. Расчетная схема смещения осей валцов и деформируемых поверхностей
 Fig. 6. Scheme for shifting the axes of the rollers and deformable surfaces

формирующим угол β на рисунке 4. Перемещение оси O в точку O_1 сохраняет неизменным радиус R , передвигая при этом деформирующую кривую на угол β_1 , что в последующем от координаты $B(x_B, y_B)$ обеспечивает приращение стенок граней на участке L_2 , соответствующее конструктивному углу β_2 на рисунке 4.

Исходя из схемы, приведенной на рисунке 6, размеры граней формируются за счет нового деформирующего профиля накатной поверхности, образуемого на расстоянии r , равном размеру смещения центра O в точку O_1 , и появляющихся при этом углов α, β и γ . Координата точки $O_1(x_{O1}, y_{O1})$ описывается уравнением окружности:

$$\begin{cases} (x_A + x_{O1})^2 + (y_A + y_{O1})^2 \\ (x_B + x_{O1})^2 + (y_B + y_{O1})^2 \end{cases} \quad (9)$$

Отсюда с учетом размера радиуса R координата y_{O1} определяется выражением:

$$y_{O1} = y_A \pm \sqrt{R^2 - (x_A - x_{O1})^2} \quad (10)$$

Координаты точек A и B определяются выражениями:

$$\begin{aligned} x_A &= R \sin \gamma; y_A = R \cos \gamma; \\ x_B &= -R(R + r) \sin \beta; \\ y_B &= (R + r) \cos \beta. \end{aligned} \quad (11)$$

Тогда длины дуг L_1 и L_2 по рисунку 6 равны:

$$L_1 = \frac{\pi R \alpha}{180^\circ}; L_2 = \frac{\pi(R + r) \beta}{180^\circ} \quad (12)$$

А углы α, β и γ принимают зависимости:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{(L_1 + L_2)180^\circ}{\pi R}; \gamma = \frac{L_1 180^\circ}{\pi R}; \\ \beta &= \frac{L_2 180^\circ}{\pi(R + r)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Построение деформирующей кривой накатных валцов по предложенной методике позволяет осуществлять прокатку режущих граней ножа за один проход. При этом для установки заго-

товки в вальцы в устройстве предусмотрены их отвод в замкнутом состоянии и сведение при деформации.

В соответствии с поставленными целью и задачами в работе исследовались физико-механические и структурные характеристики свеклорезных ножей с конструктивно упрочненными режущими гранями. Основные показатели, обуславливающие процесс упрочнения и повышение безотказности и долговечности, представлены в таблице 2.

В соответствии с представленными в таблице 2 данными упрочнение режущих граней ножей обеспечивается не за счет конструктивного утолщения их дна и высоты, а за счет приложения направленных усилий деформации с образованием тангенциальных линий скольжения при штамповке и накатке и, соответственно, сдвигов и двойникования структуры металла. Наряду с этим дендритное состояние макроструктуры металла при деформации превращается в мелкозернистое строение, непрерывное по всему профилю грани. Показатели плотности дислокации подтверждают факт сдвига и двойникования с искажением кристаллической решетки. Все это свидетельствует о повышении износостойкости и выносливости на изгиб режущих граней.

При проведении производственных испытаний на предмет исследования процессов изнашивания и разрушения граней ножа использовался регламент работ сахарных заводов, когда заточка и замена разрушенных ножей осуществлялись после сменной наработки центробежной свеклорезки. Данные испытаний сведены в график, представленный на рисунке 7.

Из данного графика следует, что за счет эффекта упрочнения и повышения износостойкости режущих кромок граней экспериментального ножа величина износа уменьшается на 0,1 мм

и при этом из-за отсутствия выкрашивания кромки на отдельных гранях эта величина относительно постоянна. По этой причине для выравнивания граней необходимо снять 0,3 мм металла по длине режущей грани. В то же время неравномерность износа по длине традиционного ножа ведет к необходимости съема 0,5 мм, интенсивности износа и, соответственно, укорачивания длин режущих граней после наработки для различных смен непостоянна. Низкая износостойкость ведет к тому, что после 56 часов наработки ресурс ножей по параметру длины граней исчерпан полностью. При этом за тот же период наработки наблюдалось разрушение граней от воздействия напряжений на изгиб у 3 ножей.

Предельного состояния экспериментальные ножи достигают после наработки 80 часов, что говорит о повышении показателя их долговечности на 27–30 %, причем за этот период разрушению подвергся 1 нож.

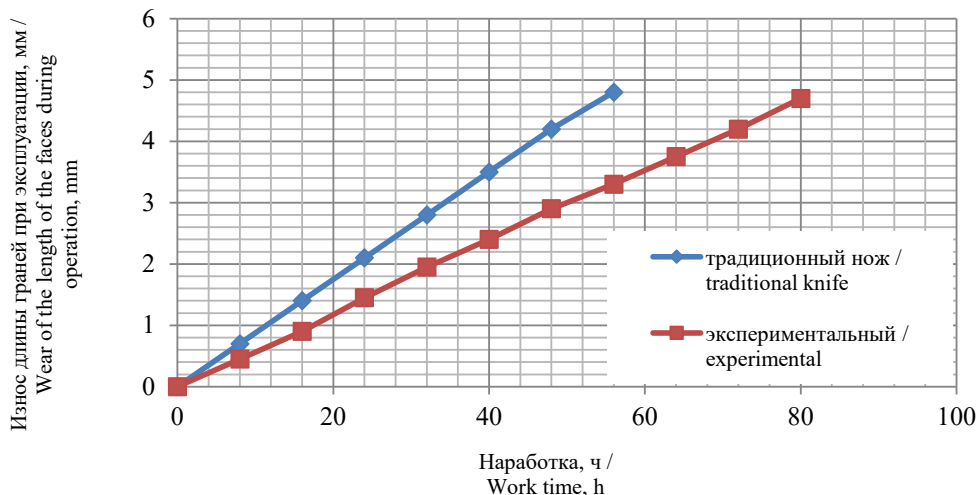
Качество измельчения стружки, являющееся основным показателем работы центробежной свеклорезки, должно обеспечивать наибольшую проницаемость и выход сахарозы в диффузионном аппарате. Продолжительность наработки режущих рамок с традиционными и экспериментальными ножами представлена на рисунках 8, 9.

Данные результатов исследования, сведенные в графики на рисунках 8 и 9, свидетельствуют о том, что усовершенствованная конструкция режущих граней ножа и принятая технология их формирования пластической деформацией ведут к повышению износостойкости режущих кромок и выносливости на изгиб граней. После ежесменной заточки наблюдается уменьшение припуска на заточку изношенной режущей кромки экспериментального ножа, после чего в следующую смену показатель длины стружки увеличивается.

Таблица 2
 Table 2

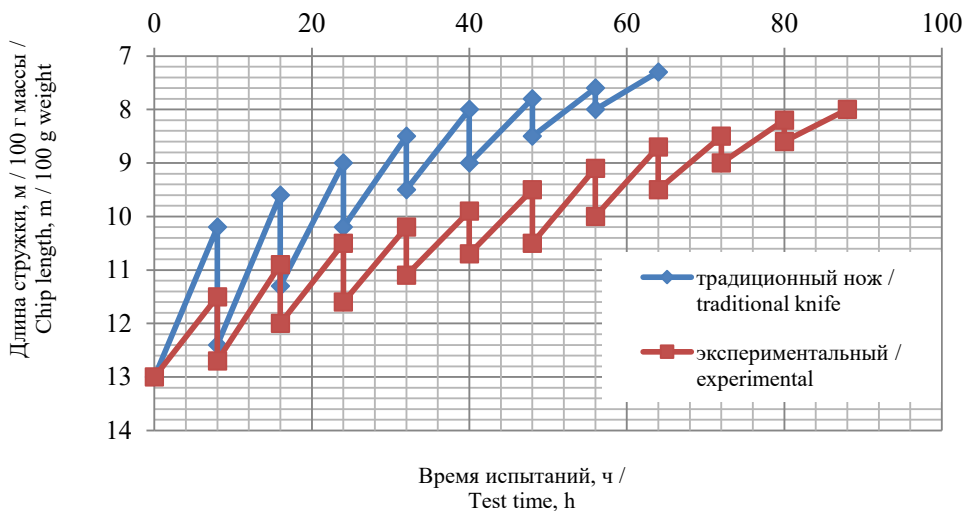
Физико-механические и структурные показатели режущих граней свеклорезных ножей
Physico-mechanical and structural indicators of the cutting edges of beet cutters

№ п/п / No. i/o	Наименование исследуемого параметра / The name of the studied parameter	Исследуемые параметры / Indicators						Структурное состояние материала режущих граней / The structural state of the material of the cutting faces			
		Микротвер- дость, МПа / Microhardness, MPa	Выносливость на изгиб, циклы нагрузки / Bending endurance, load cycles	Остаточные напряжения, МПа / Residual stresses, MPa	Плотность дислокаций, 10 ¹¹ см ⁻² / Dislocation density, 10 ¹¹ cm ⁻²						
1	Традиционная технология / Traditional technology	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	Грубодислокационный мартенсит / Coarse needle martensite
		500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	
2	Экспериментальная технология / Experimental technology	570,0	550,0	570,0	570,0	550,1	57,2	9,6	8,7	9,6	Скрытокристалли- ческий мартенсит с карбидами хрома / Crystalline martensite with chromium carbides
		72,0	144,0	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	



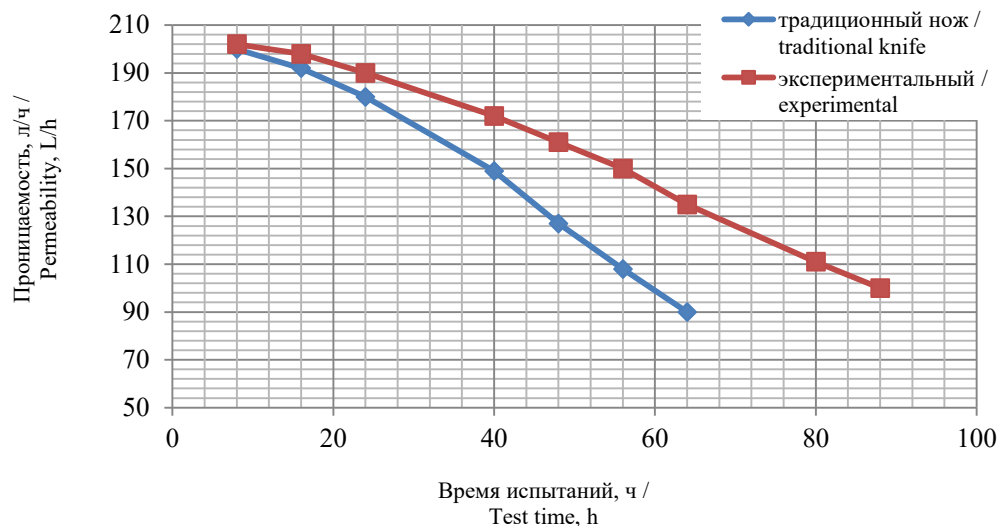
Р и с. 7. Графики влияния износного состояния длины граней на показатели безотказности в эксплуатационных условиях для традиционного и экспериментального ножей

F i g. 7. Graphs of the influence of the wear state of the length of the faces on the reliability indicators in operating conditions for traditional and experimental knives



Р и с. 8. Изменение длины свекловичной стружки от воздействия традиционного и экспериментального ножей

F i g. 8. Changing the length of beet chips from traditional and experimental knives



Р и с. 9. Изменение проницаемости свекловичной стружки от воздействия традиционного и экспериментального ножей

Fig. 9. The change in the permeability of beet chips from traditional and experimental knives

Идентичные показатели традиционного ножа значительно ниже. Установлено, что повышение износостойкости режущих кромок и выносливости на изгиб граней достигает 30–35 %. Данное обстоятельство обеспечивает повышение показателя проницаемости, полученного от измельчения свеклы экспериментальным ножом, и, соответственно, выход сахарозы в диффузионном аппарате.

Обсуждение и заключение

В результате теоретических исследований установлены конструктивно-технологические направления повышения износостойкости режущих кромок и выносливости на изгиб граней ножей к центробежным свеклорезкам. При этом доказана гипотеза возможности повышения выхода сахарозы из свекловичной стружки за счет повышения

качества измельчения свеклы путем увеличения параметров работоспособности при устранении отказов.

Экспериментальные исследования позволили обосновать конструкции оснастки для штамповки заготовок ножей и накатки режущих граней. Проведены их производственные испытания, показавшие высокие технологические и ресурсосберегающие возможности предлагаемого метода упрочнения режущих граней свеклорезных ножей. Физико-механическими и структурными исследованиями установлено, что за счет повышения износостойкости и прочности на изгиб режущих граней повышается долговечность ножей на 27–30 %, что позволяет значительно повысить качественные показатели свекловичной стружки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Долматова, И. А. Физиологические эффекты пищевых веществ / И. А. Долматова, Т. Н. Зайцева, В. Ф. Рябова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2019. –

Т. 10, № 1. – С. 139–142. – URL: <https://magtu.ru/servisy-sajta/fajlovyj-arkhiv/send/393-aktualnye-problemy-sovremennoj-nauki-tekhniki-i-obrazovaniya/9924-1-2019.html> (дата обращения: 28.01.2021).

2. **Кульнева, Н. Г.** Ресурсосберегающая технология переработки сахарной свеклы / Н. Г. Кульнева, Л. Н. Путилина, Н. А. Лазутина. – DOI 10.25802/SB.2019.28.41.006 // Сахарная свекла. – 2019. – № 10. – С. 32–36. – URL: http://sugarbeet.ru/archive/article/_183/RESURSOSBEREGAYUSHAYA-TEKNOLOGIYA-PERERABOTKI-SAHARNOJ/ (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

3. Потери сахарозы в свеклосахарном производстве и пути их снижения / Н. Г. Кульнева, В. А. Голибин, А. М. Мантулин [и др.] // Сахар. – 2011. – № 2. – С. 42–46. – URL: http://saharmag.com/fix/magazine/archive/archive_11.html (дата обращения: 28.01.2021).

4. Пути повышения энергоэффективности сахарного производства / В. А. Голыбин, В. А. Федорук, М. А. Лавренова, Е. А. Денисова // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2014. – № 1 (59). – С. 185–188. – URL: <https://www.vestnik-vsuet.ru/vguit/article/view/734> (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

5. **Сяпук, Е. Е.** Ростовые процессы и динамика сахаронакопления в корнеплодах сахарной свеклы / Е. Е. Сяпук, В. И. Костин, В. А. Исайчев. – DOI 10.18286/1816-4501-2017-1-66-71 // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 1 (37). – С. 66–71. – URL: <https://vestnik.ulsau.ru/contentse/1-17-syapukov.pdf> (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

6. **Кульнева, Н. Г.** Контроль показателей сахарной свеклы различного качества при хранении / Н. Г. Кульнева, И. Г. Селезнева, И. Ю. Свешников, С. Ю. Казакевич // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2017. – № 4. – С. 32–34. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29204156> (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

7. **Кульнева, Н. Г.** К вопросу о формировании качества сахара-песка / Н. Г. Кульнева, А. А. Швецов, А. И. Шматова // Товаровед продовольственных товаров. – 2016. – № 6. – С. 48–51. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27208695> (дата обращения: 28.01.2021).

8. Пути обеспечения качества отечественного сырья для производства сахара / Н. Г. Кульнева, И. Г. Селезнева, И. Ю. Свешников, С. Ю. Казакевич // Экономика. Инновации. Управление качеством. – 2016. – № 4 (17). – С. 46–47. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28807421> (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

9. **Кульнева, Н. Г.** Альтернативный способ сенсорного анализа сахаров в сахарном производстве / Н. Г. Кульнева, Т. А. Кучменко // Сахар. – 2019. – № 4. – С. 60–65. – URL: http://saharmag.com/fix/magazine/jotnal_148.html (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

10. **Сапронов, А. Р.** Производство и использование сахара / А. Р. Сапронов, Я. И. Альвад, Б. Г. Кривовоз // Сахар. – 2006. – № 8. – С. 44–45. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9293647> (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

11. Оптимальная переработка сахара-сырца / А. Р. Сапронов, Г. А. Вовк, Б. Г. Кривовоз, Я. И. Эльвад // Сахар. – 2006. – № 9. – С. 48–52. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9309988> (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

12. **Антипов, С. Т.** Опережающее инженерное образование и инженерия техники пищевых технологий / С. Т. Антипов, А. В. Никифоров, В. А. Панфилов. – DOI 10.29141/2500-1922-2019-4-2-7 // Индустрия питания. – 2019. – Т. 4, № 2. – С. 51–57. – URL: <http://foodindustry.usue.ru/images/11/7.pdf> (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

13. Свекловичная стружка треугольного сечения – получение и преимущества / А. Н. Люлька, В. Г. Мирончук, О. В. Адаменко, А. П. Адаменко // Сахар. – 2014. – № 1. – С. 40–43. – URL: http://saharmag.com/fix/magazine/jotnal_70.html (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

14. **Panfilov, V. A.** Engineering of Complex Technological Systems in the Agroindustrial Complex / V. A. Panfilov, S. P. Andreev. – DOI 10.21603/2308-4057-2018-1-23-29 // Foods and Raw Materials. – 2018. – Vol. 6, Issue 1. – Pp. 23–29. – URL: <http://jfrm.ru/issues/702/709/> (дата обращения: 28.01.2021).

15. **Рудик, Ф. Я.** Анализ условий работы и износного состояния ножей центробежных свеклорезок / Ф. Я. Рудик, С. А. Богатырев. – DOI 10.28983/asj.v0i3.341 // Аграрный научный журнал. – 2018. – № 3. – С. 47–50. – URL: <https://agrojr.ru/index.php/asj/article/view/341> (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

16. Рудик, Ф. Я. Дефектное состояние ножей к центробежным свеклорезным установкам и повышение их усталостной прочности / Ф. Я. Рудик, Л. Ю. Скрябина, А. П. Ковылин // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2014. – № 8. – С. 22–26 – URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2064 (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

17. Рудик, Ф. Я. Обеспечение показателей надежности ножей для измельчения сахарной свеклы / Ф. Я. Рудик, Л. Ю. Скрябина, А. П. Ковылин // Научное обозрение. – 2012. – № 6. – С. 160–163. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18736866> (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

18. Морозов, В. Б. Анализ технологической операции измельчения в свеклосахарном производстве / В. Б. Морозов // Известия ТулГАУ. Технические науки. – 2013. – Вып. 6, Ч. 1. – 7 с. – URL: <https://clck.ru/SzjZv> (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

19. Патент № 2053302 Российская Федерация, МПК C13C1/08. Свеклорезный нож : № 94007840 : заявл. 01.03.1994 : опубл. 27.01.1996 / Даишев М. И [и др.] ; патентообладатели Даишев М. И., Даишева Л. М. – 7 с. – URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2053302C1_19960127.pdf (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

20. Патент № 2156303 Российская Федерация, МПК C13C1/06. Дисковая свеклорезка : № 99120580/13 : заявл. 28.09.1999 : опубл. 20.09.2000 / Спичак В. В. [и др.] ; патентообладатель Российский научно-исследовательский институт сахарной промышленности. – 4 с. – URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2156303> (дата обращения: 28.01.2021).

21. Патент № 2087238 Российская Федерация, МПК B21H7/10. Способ изготовления режущих инструментов : № 95121387 : заявл. 18.12.1995 : опубл. 20.07.1997 / Андреев П. А. [и др.] ; патентообладатель Научно-производственный центр «Волгоагротехника». – 6 с. – URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2087238C1_19970820 (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

22. Патент № 2096120 Российская Федерация, МПК B21D 53/00. Способ изготовления свеклорезных ножей : № 96110426 : заявл. 27.05.1996 : опубл. 20.11.1997 / Богатырев С. А. [и др.] ; патентообладатель Научно-производственный центр «Волгоагротехника». – 5 с. – URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2096120C1_19971120 (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

23. Патент № 2136471 Российская Федерация, МПК B23P 6/00, B21J13/02. Штамп для восстановления крестовых ножей : № 98106326/02 : заявл. 06.04.1998 : опубл. 10.09.1999 / Богатырев С. А. [и др.]. – 6 с. – URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2136471C1_19990910 (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

24. Патент № 2533236 Российская Федерация, МПК B23P 6/00, B23P 15/28. Способ восстановления изношенного крестового ножа : № 2013138261/02 : заявл. 15.08.2013 : опубл. 20.11.2014 / Рудик Ф. Я. [и др.] ; патентообладатель Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова. – 4 с. – URL: http://www.freepatent.ru/images/img_patents/2/2533/2533236/patent-2533236.pdf (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

25. Патент № 2157734 Российская Федерация, МПК B02C 18/20. Нож куттера : № 99204382/13 : заявл. 05.03.1999 : опубл. 20.10.2000 / Рудик Ф. Я. [и др.]. – 5 с. – URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2157734C1_20001020 (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

26. Патент № 2174056 Российская Федерация, МПК B21H 7/16. Устройство для прокатки изделий с переменным профилем : № 991204201/02 : заявл. 29.09.1999 : опубл. 27.09.2001 / Рудик Ф. Я. [и др.]. – 6 с. – URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2174056C2_20010927 (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

27. Патент № 150113 Российская Федерация, МПК B21H 7/10. Устройство для изготовления режущих инструментов : № 2014116686/02 : заявл. 24.04.2014 : опубл. 27.01.2015 / Рудик Ф. Я. [и др.] ; патентообладатель Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова. – 8 с. – URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU150113U1_20150127 (дата обращения: 28.01.2021).

28. Патент № 130542 Российская Федерация, МПК B26D 1/00. Свеклорезный нож : № 2013105418/02 : заявл. 08.02.2013 : опубл. 27.07.2013 / Рудик Ф. Я. [и др.] ; патентообладатель Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова. – 6 с. – URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU130542U1_20130727 (дата обращения: 28.01.2021).

Поступила 12.08.2020; одобрена после рецензирования 21.09.2020; принята к публикации 05.10.2020

Об авторах:

Рудик Феликс Яковлевич, профессор кафедры технологий продуктов питания ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (410012, Российская Федерация, г. Саратов, Театральная пл., д. 1), доктор технических наук, Researcher ID: E-8546-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0115>, k-papsgau@rambler.ru

Богатырев Сергей Аркадьевич, профессор кафедры проектного менеджмента и внешнеэкономической деятельности в АПК ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (410012, Российская Федерация, г. Саратов, Театральная пл., д. 1), доктор технических наук, Researcher ID: B-3273-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7538-2937>, tettet@inbox.ru

Ковылин Анатолий Петрович, инженер ООО «Анастасьинское» (412468, Российская Федерация, с. Анастасьино, ул. Центральная, д. 6), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8657-5240>, kaf-papp@sgau.ru

Тулиева Мадина Суенчкалиевна, исполняющий обязанности доцента кафедры технологии переработки пищевой продукции НАО «Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана» (090009, Республика Казахстан, г. Уральск, ул. Жангир Хана, д. 51), доктор философии, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6552-6527>, madina81@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Ф. Я. Рудик – научное руководство, постановка задач исследований, систематизация материалов, полученных в результате проведения литературного обзора и информационного поиска, работа с литературой.

С. А. Богатырев – статистическая обработка результатов замеров износов и выявление причин возникновения дефектов ножей центробежных свеклорезок, поиск патентов, оформление статьи.

А. П. Ковылин – определение микротвердости и остаточных напряжений.

М. С. Тулиева – проведение сравнительных эксплуатационных испытаний традиционного и экспериментального ножей.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Dolmatova I.A., Zaytseva T.N., Ryabova V.F. [Physiological Effects of Food Substances]. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* = Current Problems of Modern Science, Technology and Education. 2019; 10(1):139-142. Available at: <https://magtu.ru/servisy-sajta/fajlovyj-arkhiv/send/393-aktualnye-problemy-sovremennoj-nauki-tekhniki-i-obrazovaniya/9924-1-2019.html> (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
2. Kulneva N.G., Putilina L.N., Lazutina N.A. Resource-Saving Technology of Sugar Beet Processing. *Sakharnaya svekla* = Sugar Beet. 2019; (10):32-36. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25802/SB.2019.28.41.006>
3. Kulneva N.G., Golibin V.A., Mantulin A.M., et al. [Sucrose Losses in Sugar Beet Production and Ways to Reduce Them]. *Sakhar* = Sugar. 2011; (2):42-46. Available at: http://saharmag.com/fix/magazine/archive/archive_11.html (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
4. Golybin V.A., Fedoruk V.A., Lavrenova M.A., et al. Ways to Improve Energy Efficiency of Sugar Production. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy* = Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2014; (1):185-188. Available at: <https://www.vestnik-vsuet.ru/vguit/article/view/734> (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
5. Syapukov E.E., Kostin V.I., Isaichev V.A. Growth Processes and Dynamics of Sugar Accumulation in Sugar Beet Roots. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Vestnik of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2017; (1):66-71. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2017-1-66-71>

6. Kulneva N.G., Selezneva I.G., Sveshnikov I.Yu. Control of Sugar Beet Indicators of Different Quality during Storage. *Khranenie i pererabotka selkhozsiyrya* = Storage and Processing of Farm Products. 2017; (4):32-34. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29204156> (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
7. Kulneva N.G., Shvetsov A.A., Shmatova A.I. [On the Formation of the Quality of Granulated Sugar]. *Tovaroved prodovolstvennykh tovarov* = Food Merchandiser. 2016; (6):48-51. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27208695> (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
8. Kulneva N.G., Selezneva I.G., Sveshnikov I.Yu., et al. Ways to Ensure the Quality of Domestic Raw Materials for the Production of Sugar. *Ekonomika. Innovatsii. Upravlenie kachestvom* = Economics. Innovation. Quality Management. 2016; (4):46-47. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28807421> (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
9. Kulneva N.G., Kuchmenko T.A. [An Alternative Method for Sensory Analysis of Sugars in Sugar Production]. *Sakhar* = Sugar. 2019; (4):60-65. Available at: http://saharmag.com/fix/magazine/jotnal_148.html (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
10. Sapronov A.R., Alavad Y.I., Krivovoz B.G. Production and Using of Sugar. *Sakhar* = Sugar. 2006; (8):44-45. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9293647> (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
11. Sapronov A.R., Vovk G.A., Krivovoz B.G., et al. Optimum Treatment of Raw Sugar. *Sakhar* = Sugar. 2006; (9):48-52. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9309988> (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
12. Antipov S.T., Nikiforov A.V., Panfilov V.A. Advanced Engineering Education and Food Technology Engineering. *Industriya pitaniya* = Food Industry. 2019; 4(2):51-57. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2019-4-2-7>
13. Lyulka A.N., Mironchuk V.G., Adamenko O.V., et al. [Beet Chips of Triangular Cross-Section: Obtaining and Advantages]. *Sakhar* = Sugar. 2014; (1):40-43. Available at: http://saharmag.com/fix/magazine/jotnal_70.html (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
14. Panfilov V.A., Andreev S.P. Engineering of Complex Technological Systems in the Agroindustrial Complex. *Foods and Raw Materials*. 2018; 6(1):23-29. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-23-29>
15. Rudik F.Ya., Bogatyrev S.A. Analysis of Working and Worn Conditions of Centrifuged Sticker Knives. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = Agrarian Scientific Journal. 2018; (3):47-50 (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.v0i3.341>
16. Rudik F.Ya., Skryabina L.Yu., Kovylin A.P. Defect State of Knives for Centrifugal Beet Cutters and Increase in Their Fatigue Resistance. *Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya* = Repair, Reconditioning, Modernization. 2014; (8):22-26. Available at: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2064 (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
17. Rudik Ph.Ya., Skryabina L.Yu., Kovylin A.P. Reliability Indexes of Knives for Crushing Sugar Beet. *Nauchnoe obozrenie* = Scientific Review. 2012; (6):160-163. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18736866> (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
18. Morozov V.B. The Analysis of Technological Operation of Crushing in Sugar Production from a Beet. *Izvestiya TulGAU. Tekhnicheskie nauki* = Proceedings of the Tula State Agrarian Academy. Technical Sciences. 2013; 6(1). 7 p. Available at: <https://clck.ru/SzjZv> (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
19. Beet-Root Cutter: Patent 2053302 Russian Federation. No. 94007840; appl. 01.03.1994; publ. 27.01.1996. 7 p. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU2053302C1_19960127.pdf (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
20. [Disc Beet Cutter]: Patent 2156303 Russian Federation. No. 99120580/13; appl. 28.09.1999; publ. 20.09.2000. 4 p. Available at: <http://www.freepatent.ru/patents/2156303> (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
21. Method of Making Cutting Tools: Patent 2087238 Russian Federation. No. 95121387; appl. 18.12.1995; publ. 20.07.1997. 6 p. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2087238C1_19970820 (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
22. Method of Making Beet Cutting Knives: Patent 2096120 Russian Federation. No. 96110426; appl. 27.05.1996; publ. 20.11.1997. 5 p. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2096120C1_19971120 (accessed 28.01.2021). (In Russ.)

23. Stamp for Restoration of Cross-Shaped Knives: Patent 2136471 Russian Federation. No. 98106326/02; appl. 06.04.1998; publ. 10.09.1999. 6 p. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2136471C1_19990910 (accessed 28.01.2021). (In Russ.)

24. Method to Restore Worn-Out Four-Wing Knife: Patent 2533236 Russian Federation. No. 2013138261/02; appl. 15.08.2013; publ. 20.11.2014. 4 p. Available at: http://www.freepatent.ru/images/img_patents/2/2533/2533236/patent-2533236.pdf (accessed 28.01.2021). (In Russ.)

25. Chopper Knife: Patent 2157734 Russian Federation. No. 99204382/13; appl. 05.03.1999; publ. 20.10.2000. 5 p. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2157734C1_20001020 (accessed 28.01.2021). (In Russ.)

26. Apparatus for Rolling Variable-Profile Products: Patent 2174056 Russian Federation. No. 991204201/02; appl. 29.09.1999; publ. 27.09.2001. 6 p. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2174056C2_20010927 (accessed 28.01.2021). (In Russ.)

27. [Device for the Production of Cutting Tools]: Patent 150113 Russian Federation. No. 2014116686/02; appl. 24.04.2014; publ. 27.01.2015. 8 p. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU150113U1_20150127 (accessed 28.01.2021). (In Russ.)

28. [Beet Cutter Knife]: Patent 130542 Russian Federation. No. 2013105418/02; appl. 08.02.2013; publ. 27.07.2013. 6 p. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU130542U1_20130727 (accessed 28.01.2021). (In Russ.)

Submitted 12.08.2020; approved after reviewing 21.09.2020; accepted for publication 05.10.2020

About the authors:

Feliks Ya. Rudik, Professor of the Chair of Technologies of Food Products, Saratov State Agrarian University (1 Theatre Sq., Saratov 410012, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: E-8546-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0115>, k-pappsgau@rambler.ru

Sergey A. Bogatyrev, Professor of the Chair of Project Management and Foreign Economic Activity in the Agroindustrial Complex, Saratov State Agrarian University (1 Theatre Sq., Saratov 410012, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: B-3273-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7538-2937>, tettet@inbox.ru

Anatoliy P. Kovylin, Engineer of the Anastasinskoe LLC (6 Tsentralnaya St., Anastasino 412468, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8657-5240>, kaf-papp@sgau.ru

Madina S. Tulieva, Associate Professor of the Chair of Food Processing Technology, Zhangir Khan University (51 Zhangir Khan St., Uralsk 090009, Republic of Kazakhstan), Ph.D., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6552-6527>, madina81@mail.ru

Contribution of the authors:

F. Ya. Rudik – scientific guidance, setting research objectives, systematization of materials obtained as a result of conducting a literature review and information search, work with the literature.

S. A. Bogatyrev – statistical processing of wear measurement results and identifying the causes of defects in beet cutter knives, patent search, writing the draft.

A. P. Kovylin – determination of microhardness and residual stresses.

M. S. Tulieva – conducting comparative operational tests of traditional and experimental knives.

All authors have read and approved the final manuscript.