ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ВИНОГРАДНОГО СЫРЬЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЭНЕРГОЕМКОСТЬ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ

Ключевые слова: виноградные ягоды; сок; отжим; нож-рассекатель; измельчитель.

Введение. В настоящее время все чаще встает вопрос обеспечения всех слоев населения здоровым питанием. В то же время удельная нагрузка в биосферу постоянно возрастает и вынуждает непрерывно интенсифицировать производство пищевых продуктов, необходимых человеку для его здоровья и долголетия [7–8]. Решением этой проблемы была бы безотходная переработка животного и растительного сырья (биомассы), когда бы и потребляемый продукт, и отходы жизнедеятельности, и органические отходы возвращались обратно в биосферу. Большое количество вовремя переработанных овощей и фруктов превращается в непригодные отходы и ухудшают экологию. В связи с этим при-

менение передовых технологий и конструктивное совершенствование установок для переработки овощей и фруктов является одним из решений народнохозяйственных задач.

Цель исследования – установление аналитического выражения, описывающего энергопотребление при отжиме сока в зависимости от формы-ножа-рассекателя.

Задачи исследований: 1. Установить основные факторы, влияющие на энергопотребление; 2. Обосновать форму ножа-рассекателя.

Условия, материалы и методы исследования. В Самарском ГАУ разработана установка для отжима сока из различных видов фруктов и овощей, представленная на рисунке 1 [1, 2].

Рисунок 1

Установка для отжима сока из овощей и фруктов:

1 – загрузочный бункер; 2 – приводной вал; 3 – остроконечные пальцы; 4 – противорежущая пластина; 5 – цилиндр пресс-экструдера; 6, 7 – лотки для сбора сока; 8 – шнек; 9 – зерновая камера; 10 – электродвигатель

На данной установке отжим сока производится, в отличие от известных технологий [3–6], в два этапа: первичный (мягкий) отжим путем раздавливания исходного материала и завершающий (жесткий) отжим за счет экструзионной обработки квазитвердого остатка.

Способ отжима виноградного сока осуществляется следующим образом: гроздья винограда подаются в загрузочный бункер 1, где захватываются остроконечными пальцами 3, продавливаются через противорежущие пластины 4, происходит выдавливание сока, который самотеком через воронку 6 поступает в емкость

(на чертеже не показана). Далее твердая масса захватывается шнеком 8 и транспортируется внутри цилиндра 5 пресс-экструдера, где под действием сил внутреннего трения при вращении шнека 8 в экструдированной массе создается давление, за счет чего происходит вторичный отжим сока из твердой фракции, состоящей из измельченных гроздей, ягод и оболочки винограда, которые через щели зерновой камеры 9 стекают по лотку 7 в емкость.

Результаты исследований. В измельчителе для отжима сока из виноградного сырья работа по разрушению кожицы, мякоти и одревеснен-

ных веточек производится режущими рассекателями-ножами, после чего полуразрушенные ягоды попадают в зону нарастающего давления, где разделяются на квазипластичную массу и сок (рисунок 1).

Очевидно, что от конусности (угла заточки) будет прямым образом зависеть первоначальное разрушение ягод и их дальнейшее вовлечение в разрушающий процесс. Но тогда при рационально выбранном угле заточки при неоднократном контакте с содержимым измельчителя перерабатываемое сырье будет представлять собой более однородную массу и более соответствовать определению сплошной среды. Погрешность этого допущения можно учесть эмпирическим поправочным коэффициентом.

При вхождении режущей пластины (рассекателя) в зазор между противорежущими пластинами происходит преодоление сопротивле-

ния квазисплошной среды между их поверхностями. Следует заметить, что в стационарном режиме (как было отмечено ранее) рабочее пространство между противорежущими пластинами будет заполнено частично разрушенным материалом, который можно считать условно сплошной средой. В таком случае энергия разрушения будет в прямой связи с сопротивлением частично разрушенной среды проникновению рассекателей в пространство между пластинами [9, 10].

Для оценки необходимой мощности разрушения исходного сырья можно (с определенной погрешностью) использовать понятие динамического напора. Поскольку оптимальная форма режущей кромки рассекателя нуждается в особом исследовании, то для оценочных расчетов вполне корректно принять форму ножа в профильном виде трапеции (рисунок 2).

Рисунок 2
Нож-рассекатель и его геометрические параметры

Пусть в зазор между противорежущими пластинами, заполненный частично разрушенной смесью, входит нож-рассекатель пирамидальной формы, который разрушает встречную среду с нарастающим давлением. Дело в том, что по мере удаления от поверхности вала центробежная сила увеличивается, вследствие чего возрастает плотность материала. Рассекатель, перемещаясь между противорежущими пластинами, будет создавать дополнительное усилие в радиальном направлении [9].

Однако в связи с пирамидальной формой ножа пространство в области стенки камеры измельчителя по мере вхождения рассекателя будет изменяться, что непременно вызовет нарастание давления. В итоге распределение измельченного материала по физико-механическим параметрам будет происходить по случайному закону. С некоторой (незначительной) погрешностью плотность перерабатываемого материала можно принять постоянной ($\rho = \text{const}$), так как по мере измельчения материал становится все более однородным [11].

Сопротивление среды при движении ножа сквозь пластины выражается формулой

$$N = \int_{v_0}^v \bar{F} d\bar{v}, \quad (1)$$

где N — мощность, необходимая для преодоления среды при перемещении ножа между пластинами, Вт; $\bar{F}$ — результирующий вектор сил сопротивления в точке контакта боковой поверхности ножа с частицей смеси, Н; $d\bar{v}$ — элементарное изменение скорости частицы среды в точке контакта, м/с.

Поскольку нож-рассекатель находится во вращательном движении в плоскости перпендикулярной оси вала, то скорость любой точки ножа будет выражаться зависимостью

$$v = \omega \cdot r, \quad (2)$$

где v — скорость произвольной точки ножа, м/с; ω — угловая скорость вращения вала ($\omega = \text{const}$) рад/с; r — удаленность произвольной точки ножа от оси вала, м.

Знак вектора скорости опускается в связи с тем, что направление скорости известно: по касательной к траектории произвольной точки ножа.

Что касается сил сопротивления перемещению ножа между пластин, то лобовое сопротив-

ление создают те силы или их компоненты, которые перпендикулярны к площадке, расположенной нормально к вектору скорости в каждой конкретной точке, т. е. коллинеарны.

Для определения энергопотребления разрушения сырьевой среды значительную роль имеет форма ножа-рассекателя.

Без ущерба для качественной стороны технологического процесса принимается форма ножа-рассекателя в виде клиновидного тела (рисунок 2).

Из представленного рисунка 2 следует, что

$$\frac{e/2}{a'} = \sin \frac{\gamma'}{2} \Rightarrow \frac{e/2}{\sin \frac{\gamma'}{2}} = a', \quad (3)$$

где e – толщина ножа, м; a' – ширина лезвия по виду А, м; γ' – половина угла заточки по виду А, град.

Но a' отличается от a на множитель $\cos \psi$, то есть

$$a' \cdot \cos \psi = a, \quad (4)$$

где a – действительная ширина лезвия, м; ψ – угол наклона режущей кромки ножа, град.

Объединяя выражения 3 и 4, зависимость между геометрическими параметрами ножа представим следующим образом

$$\frac{e/2}{\sin \frac{\gamma'}{2}} \cdot \frac{R}{L} = a' \quad \text{или} \quad \frac{e/2}{\sin \frac{\gamma'}{2}} = 2 \cdot a \cdot L = A, \quad (5)$$

где A – общая площадь ножа, м²; L – длина режущей кромки, м.

Принимая во внимание, что произведение $e \cdot R$ есть не что иное, как площадь верхней грани ножа, можно получить важное заключение:

$$\frac{e \cdot R}{2 \cdot a \cdot L} = \sin \frac{\gamma'}{2}. \quad (6)$$

Иначе говоря, соотношение площадей верхней грани ножа и лезвия равно $\sin$ половинного квазиугла заточки лезвия. Квазиугол (рисунок 2) отличается на множитель $\cos \psi$ от действительного угла заточки.

В таком случае

$$\frac{\gamma'}{2} = \arcsin \frac{e \cdot R}{a \cdot L} \quad \text{или} \quad \gamma' = 2 \cdot \arcsin \frac{e \cdot R}{a \cdot L}. \quad (7)$$

С учетом вышесказанного,

$$\gamma \approx 2 \cdot \arcsin \frac{e \cdot R}{a \cdot L}. \quad (8)$$

Если учесть, что площадь верхней грани ножа (произведение толщины пластины на его длину), как правило, назначается из конструктивных соображений, то взаимосвязанными параметрами являются угол заточки и площадь лезвия. А это значит, что угол заточки прямым образом влияет на разделение рабочих зон ножа

для достижения оптимального конечного результата [10].

Итак, каждую из боковых поверхностей ножа-рассекателя можно разделить на три рабочие зоны (согласно их функциональной роли): режущая кромка (принимается прямолинейной) разрушает верхний слой ягод и веточек; лезвие ножа в связи с его углом заточки выполняет роль наклонной плоскости и создает нарастающее давление в зазоре между противорежущими пластинами; плоские грани ножа (рисунок 2) завершают процесс отжима жидкой фракции.

Для оценки работ разрушения виноградного сырья можно предположить (с высокой вероятностью), что работа по разрушению внешней оболочки ягод и веточек рационально заточенного ножа будет менее энергоемка, а основное энергопотребление придется на соковыделение путем создания адекватного давления во второй и третьей зонах. В этом случае основным фактором сопротивления будет работа сил трения. Пренебрегая работой ножей-рассекателей вне противорежущих пластин, можно утверждать, что основное энергопотребление приходится на их работу внутри пластин.

Итак, пусть нож-рассекатель входит в прорез между двумя противорежущими пластинами. При этом режущая кромка ножа, контактируя с цельным виноградным сырьем, разрушает поверхностный слой ягод и веточки и не требует значительного энергопотребления. Тогда основное энергопотребление приходится на работу по преодолению «лобового» сопротивления продвижению ножа и на совершение работы против сил трения, возникающих при обжатии сырья поверхностью ножа. Как говорилось ранее, работу деструкции можно разделить на две части: работу лезвия и работу плоских боковых граней. Работа лезвия, в свою очередь, делится на работу по преодолению сопротивления среды и работу против сил трения (рисунок 3).

Рисунок 3

К расчету работы динамического напора:
1 – нож-рассекатель; 2 – перерабатываемое сырье;
3 – противорежущая пластина

При определении работы ножа по преодолению лобового сопротивления ее можно принять практически без погрешности – нож, находясь во вращательном движении, при вхождении в прорезь движется поступательно. Следовательно, мощность необходимая для преодоления лобового сопротивления среды, определяется следующим образом

$$N = \int_S 2 \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot v \cdot dS = \int_S 2 \cdot \rho \cdot v^3 \cdot dS, \quad (9)$$

где v – окружная скорость произвольной точки ножа ($v = v(r)$), м/с; S – площадь пропущенного зазора между двумя противорежущими пластинами, м².

Принимая во внимание, что $S \approx e (r_k - r_e)$, можно записать полное выражение мощности:

$$N = \int_{r_e}^{r_k} \rho \cdot \omega^3 \cdot r^3 \cdot e \cdot dr, \quad (10)$$

где r_e – расстояние начало прорези от оси вала, м; r_k – расстояние конца прорези от оси вала, м.

Итак, для преодоления ножом-рассекателем «лобового» сопротивления среды потребляемая мощность равна

$$N = \frac{1}{4} e \cdot \rho \cdot \omega^3 (r_k^4 - r_e^4) \quad (11)$$

Вывод. В процессе измельчения исходного материала основное энергопотребление приходится на преодоление сопротивления продвижению ножа и на совершение работы против сил трения, возникающих при обжатии сырья поверхностью ножа.

Библиографический список

1. Пат. 2700111 Российская Федерация. Способ отжима виноградного сока и устройство для его осуществления [Текст] / В.В. Новиков, А.С. Грецов, С.В. Зотеев, Е.А. Борисов, З.З. Гиунашвили. № 2019101055; заявл. 10.01.2019; опубл. 12.09.2019, бюл. № 26.
2. Гиунашвили, З.З. Конструктивные решения задач повышения выхода сока из виноградного сырья в отжимных устройствах [Текст] / З.З. Гиунашвили, Е.А. Борисов, В.В. Новиков // Вклад молодых ученых в аграрную науку. Материалы Международной научно-практической конференции: сб. научных трудов. Кинель, 2019. С. 415–417.
3. Пат. 2350230 Российская Федерация. Устройство для прессования сока из цельных плодов и овощей [Текст] / А.Н. Семин, В.С. Нагорских, С.Б. Зырянов, В.В. Швецова, В.А. Нецветаев, Ю.А. Кирсанов. Заявл. 13.06.2007; опубл. 27.03.2009.
4. Пат. № 44959 РФ, В30В9/20. Пресс для отжима сока из растительного сырья [Текст] / А.Д. Чистяков, А.А. Носов, Г.И. Прощенко. Заявл. 23.12.2004; опубл. 10.04.2005.
5. Пат. 388019 Российская Федерация. Пресс для отжима сока из плодово-ягодной мезги [Текст] / В.П. Чернышев, А.А. Каплан. № 1683927/28-13; заявл. 23.07.1971; опубл. 22.06.1973, бюл. № 28.
6. Панкин, М.И. Производство виноградных соков прямого отжима из новых сортов винограда [Текст] / М.И. Панкин, И.В. Оселедцева, Т.И. Гугучина, О.И. Преснякова // Виноделие и виноградарство. 2009. № 2. С. 28–31.
7. Гугучина, Т.И. Экспериментальное обоснование целесообразности производства виноградных соков прямого отжима из новых сортов винограда. Виноделие и виноградарство [Текст] / Т.И. Гугучина, М.И. Панкин, Е.А. Сосюра, Б.В. Бурцев // Разработки, формирующие современный уровень развития виноделия. Краснодар: ГНУ Северо-Кавказский зональный НИИ садоводства и виноградарства Россельхозакадемии, 2011. С. 38–48.
8. Сосюра, Е.А. Современные тенденции на рынке функциональных напитков [Текст] / Е.А. Сосюра, А.Ф. Нуднова // Современные ресурсосберегающие инновационные технологии возделывания сельскохозяйственных культур в Северо-Кавказском федеральном округе: материалы 81-ой науч.-практ. конф., приуроченной к 85-летию д-ра с.-х. н., проф. В.И. Тюльпанова. Ставрополь: СтГАУ, 2016. С. 147–149.
9. Antonov N.M., Lebed' N.I., Makarov A.M. 2014 Influence of a Zigzagging Location of the Knives in the Cutting Unit on the Energy Consumption During the Cutting Process of Horticultural Produce. J. of Food Process Eng. 3 262–270, doi: 10.1111/jfpe.12162.
10. Antonov N.M., Lebed' N.I., Makarov A.M. 2016 Energetic Calculation of an Apple Slicer with Zigzagging Knife Location in the Cutting Unit. J. of Food Process Eng., doi: 10.1111/jfpe.12352.
11. Alvarez M.D., Canet W., Lopez M.E. 2002 Influence of deformation rate and of compression on textural parameters of potato and apple tissues in texture profile analysis. European food research and Technology. 1 13–20, doi: 10.1007/s00217-002-0515-0.

1. **Новиков Владимир Васильевич**, кандидат технических наук, профессор кафедры сельскохозяйственных машин и механизации животноводства, ФГБОУ ВО Самарский ГАУ, 446442, Самарская область, п. г. т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2, e-mail: e-ltv@mail.ru.

2. **Литвинов Евгений Владимирович**, аспирант кафедры сельскохозяйственных машин и механизации животноводства, ФГБОУ ВО Самарский ГАУ, 446442, Самарская область, п. г. т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2, e-mail: e-ltv@mail.ru.

3. **Морозов Николай Владимирович**, аспирант кафедры сельскохозяйственных машин и механизации животноводства, ФГБОУ ВО Самарский ГАУ, 446442, Самарская область, п. г. т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2, e-mail: morskay6363@mail.ru.

4. **Борисов Егор Алексеевич**, студент инженерного факультета, ФГБОУ ВО Самарский ГАУ, 446442, Самарская область, п. г. т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2, e-mail: morskay6363@mail.ru.

5. **Грецов Алексей Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры сельскохозяйственных машин и механизации животноводства, ФГБОУ ВО Самарский ГАУ, 446442, Самарская область, п. г. т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2, e-mail: grecov_as@mail.ru.

Цель исследования – установление аналитического выражения, описывающего энергопотребление при отжиме сока в зависимости от формы ножа-рассекателя. В статье представлена конструкция для отжима сока из различных видов фруктов и овощей. Дана динамическая

характеристика процесса измельчения исходного материала (на примере ягод винограда). Аналитически обосновано и представлено выражение для определения мощности, затрачиваемой на измельчение исходного материала.

V. Novikov, E. Litvinov, N. Morozov, E. Borisov, A. Grecov

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE PROCESS OF GRINDING GRAPE RAW MATERIALS AND THEIR IMPACT ON THE ENERGY INTENSITY AND PERFORMANCE OF THE GRINDER

Key words: grapes; juice; spin; knife-divider; grinder.

Authors' personal details

1. **Novikov Vladimir**, Candidate of Technical Sciences, professor of the department of agricultural machines and mechanization of livestock breeding, Samara State Agrarian University, 446442, Samara region, settlement Ust'-Kinskly, Uchebnaya st., 2, e-mail: e-ltv@mail.ru.

2. **Litvinov Evgeny**, Post-graduate student of the department of agricultural machines and mechanization of livestock breeding, Samara State Agrarian University, 446442, Samara region, settlement Ust'-Kinskly, Uchebnaya st., 2, e-mail: e-ltv@mail.ru.

3. **Morozov Nikolay**, Post-graduate student of the department of agricultural machines and mechanization of livestock breeding, Samara State Agrarian University, 446442, Samara region, settlement Ust'-Kinskly, Uchebnaya st., 2, e-mail: morskay6363@mail.ru.

4. **Borisov Egor**, engineering student, Samara State Agrarian University, 446442, Samara region, settlement Ust'-Kinskly, Uchebnaya st., 2, e-mail: morskay6363@mail.ru.

5. **Grecov Aleksey**, Candidate of Technical Sciences, professor of the department of agricultural machines and mechanization of livestock breeding, Samara State Agrarian University, 446442, Samara region, settlement Ust'-Kinskly, Uchebnaya st., 2, e-mail: grecov_as@mail.ru.

The purpose of the study is to establish an analytical expression describing the energy consumption during juicing depending on the shape of the knife – divider. The article presents a design for juicing different types of fruits and vegetables. The

dynamic characteristic of the process of grinding the starting material (for example, grapes) is given. An expression for determining the power spent on grinding the starting material is analytically substantiated and presented.