

К теории вопроса очистки фильтрационной поверхности от накопленных загрязнений при обработке нерафинированных растительных масел вибрационными и ультразвуковыми колебательными движениями

Евгений Александрович Сундуков, Феликс Яковлевич Рудик, Наталья Львовна Моргунова, Омар Магомедович Буттаев
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова», г. Саратов, Россия
e-mail: buttaevom@yandex.ru

Аннотация. В статье представлены результаты теоретического анализа вопроса очистки фильтрационной поверхности от осадка загрязнений, препятствующих прохождению очищаемого масла сквозь адсорбционный слой в установке для очистки масла от продуктов окисления. На основе классической теории колебательного движения рассмотрены условия, необходимые для всплытия и перемешивания частиц осадка путем снижения их сидементационной устойчивости.

Ключевые слова: очистка фильтрационной поверхности; продукты окисления; сидементационная устойчивость; ультразвуковые колебательные движения.

Для цитирования: Сундуков Е. А., Рудик Ф. Я., Моргунова Н. Л., Буттаев О. М. К теории вопроса очистки фильтрационной поверхности от накопленных загрязнений при обработке нерафинированных растительных масел вибрационными и ультразвуковыми колебательными движениями // Аграрный научный журнал. 2022. № 11. С. 105–110. <http://10.28983/asj.y2022i11pp105-110>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

On the theory of the issue of cleaning the filtration surface from accumulated contaminants during the processing of unrefined vegetable oils by vibration and ultrasonic oscillatory movements

Evgeny A. Sundukov, Felix Ya. Rudik, Natalya L. Morgunova, Omar M. Buttaev
Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia
e-mail: buttaevom@yandex.ru

Abstract. The article presents the results of a theoretical analysis of the issue of cleaning the filtration surface from the sediment of contaminants that prevent the passage of the cleaned oil through the adsorption layer in the installation for cleaning oil from oxidation products. Based on the classical theory of oscillatory motion, the conditions necessary for the floating and mixing of sediment particles by reducing their sidementation stability are considered.

Keywords: cleaning of the filtration surface; oxidation products; sidementation stability; ultrasonic vibrations.

For citation: Sundukov E. A., Rudik F. Ya., Morgunova N. L., Buttaev O. M. On the theory of the issue of cleaning the filtration surface from accumulated contaminants during the processing of unrefined vegetable oils by vibration and ultrasonic oscillatory movements // Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal. 2022;(11):105–110. (In Russ.). <http://10.28983/asj.y2022i11pp105-110>.

Введение. Содержание масла в семенах зависит от видовых и сортовых особенностей масличных культур, места и условия выращивания, применения удобрений, сроков созревания и уборки.

Несомненно, что все содержащиеся в семенах подсолнечника, как и у всего сырья растительного происхождения, полезные составляющие, необходимые в конечном продукте и вредные, представляющие своего рода загрязнители и кислоты, ведущие к инициированию свободных радикальных реакций и порче масла, попадают в масла [1–4].

Масла могут производиться холодным или горячим прессованием и экстракцией. Самый древний способ – это холодное прессование. Масло, полученное таким способом, имеет уникальные, заложенные природой свойства, так как его вкус, запах, пищевые достоинства не испорчены, но срок хранения таких масел крайне низкий по причине наличия первичных и вторичных продуктов окисления. На крупных маслоперерабатывающих предприятиях все это удаляется, но что характерно, при обработке способами фильтрации, экстракции, отбеливания и прочими способами удаляются все полезные составляющие, определяющие питательную ценность масла. Эти масла относятся к рафинированным и дезодорированным [5].

Нерафинированное подсолнечное масло – это масло растительное, очищенное от мелкой и крупной взвеси, но не прошедшее очистку по полному или частичному циклу стадий рафинирования. На малых производствах нерафинированные масла производят по значительно упрощенной системе, используя минимум технологического оборудования, что за собой влечет низкое их качество и короткий срок его хранения.

Для увеличения сроков хранения нерафинированных масел, произведенных холодным или горячим прессованием, необходимо уделять особое внимание тщательной очистке масличных семян и после производства окончательной фильтрации масла на центробежных установках с последующим отстаиванием, чтобы исключить попадание механических примесей и нежелательных органических компонентов, также провоцирующих инициирование окислительных процессов в масле.

Исходя из проведенных исследований установлено, что этих технологических воздействий явно недостаточно, сроки хранения масел все равно значительно ниже, чем у рафинированных. Это обусловлено тем, что на практи-





ке процесс повышения кислотности никак не приостанавливается и несомненно, что для повышения качества и длительности использования нерафинированных растительных масел совершенно недостаточно использование трех традиционных методов очистки – отстаивание, центрифугирование и фильтрация.

Цель исследования – теоретически исследовать и установить возможность седиментационной устойчивости осадка загрязнений при адсорбционной очистке масла для их всплытия и продвижения в отстойник.

Методика исследований. Для проведения теоретических исследований за основу была принята классическая теория механических колебательных движений, обуславливающая создание технических условий для использования фактора нарушения положения равновесия материальной точки, ее подъема от поверхности и удержания во всплытом состоянии.

Результаты исследований. Для случая очистки фильтрационной поверхности от осадка загрязнений, препятствующих продвижению очищаемого масла в адсорбент, решающее значение приобретает величина максимального смещения материальной точки x , в которой находится осадок загрязнения [6–8]. Оно создает условия для отрыва и подъема от фильтрационной поверхности слоя осадка (рис 1).

Сдвиг и смещение материальной точки с позиции использования механических колебательных движений описаны в [9–14]. Величина смещения материальной точки характеризуется уравнением:

$$X(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

где: A – амплитуда колебательных движений, продвигающая материальную точку на требуемую высоту от фильтрационной поверхности и поддерживающая ее в равновесии в плавающем состоянии, м; ω_0 – циклическая частота колебательных движений за 2π секунд; $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$, кГц; k – коэффициент сопротивления среды; φ_0 – фаза колебаний.

Исходя из выражения (1), особую значимость для интенсификации процесса приобретают амплитуды скорости и ускорения:

$$\begin{aligned} V_x &= \frac{dx}{dt} = -\omega_0 A \sin(\omega_0 t + \varphi), & \omega_0 A &= V_m; \\ a_x &= \frac{dv_x}{dt} = -\omega_0^2 A \cos(\omega_0 t + \varphi), & \omega_0 A &= A_m. \end{aligned} \quad (2)$$

Учитывая также тот факт, что полная механическая энергия гармонически колеблющегося тела пропорциональна квадрату амплитуды колебания $E=1/2KA^2$, следует, что циклическая частота колебательного движения по выражению (2), полученная на основании дифференциальной интерпретации второго закона Ньютона для затухающих прямолинейных колебательных движений вдоль оси x , имеет вид:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{r}{2m} \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} x = 0. \quad (3)$$

Обозначив $\frac{r}{2m} = \beta$ и $\frac{k}{m} = \omega_0^2$ и после решения уравнения, появляются возможности анализировать частоту колебательных движений ω :

$$X = A e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi). \quad (4)$$

При $\beta \leq \omega_0$ частота колебаний равна: $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta}$.

Отсюда и период затухающих колебаний описывается выражением

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta}}. \quad (5)$$

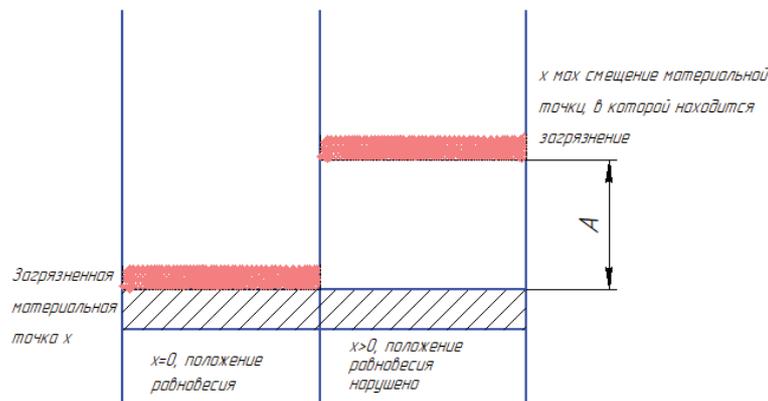


Рис. 1. Нарушение положения равновесия материальной точки колебательными движениями

В соответствии с законом Ньютона силы сдвига между слоями жидкости пропорциональны переменному градиенту скорости вдоль заданного направления и площади соприкосновения смежных слоев жидкости:

$$\text{grad}V = \frac{dV_x}{dx}, \quad F_{\text{тр}} = -\eta \frac{dV_x}{dx}. \quad (6)$$

И тогда, когда сумма силы трения и силы Архимеда совпадают, движение частиц осадка в новую точку равновесия « x_{max} » прекращается и она должна выпасть вновь в осадок или, при соответствующей частоте и периоде колебаний, поддерживаться во взвешенном состоянии. Приложение дополнительной силы, создаваемой акустическими микротечениями, позволит передвигаться частице в отстойник.

Исходя из рис. 1 следует, что под действием вибрации в колебательной системе возникают сосредоточенные по площади фильтрационной поверхности возмущающие силы $P = P(t)$, действующие на расстоянии Z , которые, в соответствии с законом выпрямляемой синусоиды, принимают равными $P = P_0 \sin \omega t$, где P_0 – возмущающая сила в точке приложения колебательных движений к фильтрационной поверхности, Н.

Они вызывают колебания фильтрационной поверхности, описываемые дифференциальным уравнением, учитывающим кинематические параметры продольно направленных вибрационных колебаний:

$$\frac{EG}{m} \frac{\delta^4 A_{kc}(xt)}{dx^4} + \frac{\delta^2 A_{kc}(xt)}{dt^2} = 0, \quad (7)$$

где $A_{kc}(xt)$ – амплитуда колебательного движения, характеризующая прогиб текущей точки фильтрационной поверхности в функции координатных « x » и временных « t » показателей; EG – изгибная жесткость точки фильтрационной поверхности; E – модуль упругости нормальный, Па; G – модуль упругости при сдвиге кручением, Па; m – масса единицы длины фильтрационной поверхности, кг.

Решением уравнения (7) устанавливается величина прогиба текущей точки фильтрационной поверхности в функциях координаты « x » и времени « t », позволяющая характеризовать эффективность и достаточность амплитуды колебания фильтрационной поверхности:

$$A_{kc}(x, t) = x_k(x)T_k(t), \quad (8)$$

где $x_k(x)$ – функция координаты смещения материальной точки; $T_k(t)$ – функция периода колебательных движений по текущему времени.

Основываясь на выражении (8), функцию периода колебательных движений можно записать в следующем виде:

$$T_k(t) = A_{kc} \sin[P_k(t) + P_k]. \quad (9)$$

где $P_k(t)$ – главные моногармонические колебания по текущему времени, м; P_k – главные моногармонические колебания, м; A_{kc} – амплитуда колебательных движений, м.

Функция координаты смещения материальной точки, в соответствии с рекомендациями Бидермана [11], описывается уравнением, учитывающим все параметры процесса колебательных движений:

$$X_k(x) = c_1 S(f, x) + c_2 T(f, x) + c_3 A(f, x) + c_4 v(f, x), \quad (10)$$

где $c_1 S, c_2 T, c_3 A, c_4 v$ – постоянные, характеризующие начальные значения функции и их производных колеблющейся системы S , периода колебательных движений T , амплитуды колебательных движений A и частот колебательных движений v соответственно; f – частота свободных колебаний, кГц.

Показатель частоты колебательных движений устанавливается в зависимости от главных моногармонических колебаний и преодоления сил сопротивления передвижению материальной точки над фильтрационной поверхностью:

$$f_1 = \sqrt[4]{\frac{m P_k^2}{EG}}, \quad (11)$$

где m – масса единицы длины фильтрационной поверхности, кг; P_k – главные моногармонические колебания, м; EG – изгибная жесткость точки фильтрационной поверхности.

Постоянные начальных значений функций имеют следующий вид:

$$C_1 = x(0); \quad C_2 = \frac{1}{f} x'(0); \quad C_3 = \frac{1}{f^2} x''(0); \quad C_4 = \frac{1}{f^3} x'''(0). \quad (12)$$

Уравнение (12) характеризует собой форму колебательных движений с учетом колеблющейся системы S и материальной точки x .

Дифференциальные уравнения

$$\begin{aligned} S(f, x) &= \frac{1}{2} (c_1 h f x + \cos f x); & T(f, x) &= \frac{1}{2} (c_2 h f x + \sin f x); \\ A(f, x) &= \frac{1}{2} (c_3 h f x - \cos f x); & v(f, x) &= \frac{1}{2} (c_4 h f x - \sin f x). \end{aligned} \quad (13)$$



Последовательные производные функции из выражения (13) определяются посредством производных функций перемещения материальной точки $x(x)$ по переменной x , характеризующей параметры вибрационных колебаний:

$$\begin{aligned}x''(x) &= f[c_1v(fx) + c_2S(fx) + c_3T(fx) + c_4A(fx)]; \\x'''(x) &= f^2[c_1v(fx) + c_2S(fx) + c_3T(fx) + c_4A(fx)]; \\x^{(4)}(x) &= f^3[c_1v(fx) + c_2S(fx) + c_3T(fx) + c_4A(fx)].\end{aligned}\quad (14)$$

Исходя из схемы возбуждения гармонических колебаний, представленной на рис. 1, последовательные производные функции $x(x)$ зависят от амплитуды колебаний на расстоянии, следовательно:

$$x(0) = 0; x'(0) = 0; x''(Z) = 0; x'''(Z) = 0. \quad (15)$$

Учитывая данные выражений (14) и (15), постоянные c_1, c_2, c_3, c_4 примут следующий вид:

$$c_1 = c_2 = 0, c_3 \text{ и } c_4 \rightarrow \begin{cases} f^2[c_3S(fZ) + c_4T(fZ)] = 0 \\ f^3[c_3v(fZ) + c_4A(fZ)] = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Система уравнений (16) при разложении определяет условие ненулевых решений:

$$\Delta = \begin{vmatrix} S(fZ) & T(fZ) \\ v(fZ) & A(fZ) \end{vmatrix} = 0. \quad (17)$$

Отсюда:

$$S^2(fZ) - T(fZ) \cdot v(fZ) = 0. \quad (18)$$

Или, учитывая выражение (18), с условием распределения гармонических колебательных движений получим:

$$\frac{1}{4}(chfZ + \cosfZ)^2 - \frac{1}{2}(chfZ + \sinfZ) \cdot (chfZ - \sinfZ) = 0. \quad (19)$$

Отсюда

$$\begin{aligned}ch^2fZ + 2chfZ\cosfZ + \cos^2fZ - (ch^2fZ - \sin^2fZ) &= \\= ch^2fZ - ch^2fZ + 2chfZ\cosfZ + \cos^2fZ + \sin^2fZ &= \\= 1 + 2\coschfZ \cosfZ + 1.\end{aligned}\quad (20)$$

На этом основании уравнение для собственных колебательных частот примет следующий вид:

$$chfZ\cosfZ = -1. \quad (21)$$

Исходя из полученного выражения (21) функции координаты x , очевидно, что распространение количественных движений в функции времени t , примет вид:

$$x(x) = (chfZ + \sinfZ) \cdot (chfZ - \cosfx) - (chfx - \cosfx) - (chfZ + \cosfZ) \cdot (chfsinfx). \quad (22)$$

Таким образом, уравнение (22) позволяет определять частоты колебаний фильтрационной поверхности в координате x и амплитуду колебаний с учетом силы

$P = P(t)$, возбуждаемой вибрационной колебательной системой. Тогда выражение для определения амплитуды колебательных движений или величины прогиба фильтрационной поверхности, означающей эффективность и достаточность колебания фильтрационной поверхности для отрыва и смещения частицы загрязнения примет вид:

$$\begin{aligned}A_{kc}(x, t) &= (chf_kZ + \sinf_kZ) \cdot (chf_kx - \cosf_kx) - \\&- (chf_kZ + \cosf_kZ) \cdot (chf_kx - \sinf_kx) \cdot \sin P_k(t) + P_k.\end{aligned}\quad (23)$$

Принимая во внимание ранее приведенные показатели, представленные в выражениях (21), (22), (23), формулу для случая определения амплитуды материальной точки фильтрационной поверхности можно представить в виде

$$A_{kc}(x, t) = [T(f_kZ)A(f_kZ) - S(f_kZ)v(f_kZ)] \cdot A \sin P_k(t) + P_k. \quad (24)$$

За счет создания дополнительных вибрационных колебаний, действующих по оси x и устанавливаемых в соответствии с выражением (24), создаются дополнительные микротоки, которые в первую очередь, способствуют отрыву с фильтрационной поверхности суспензии. А во вторую - снижению коэффициента интенсивности поглощения микротоков в колебательной среде. Тогда, основываясь на закономерности распределения акустических ультразвуковых колебаний в жидкой среде, процесс затухания уменьшается на величину, равную частоте вибрационных колебаний:

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \frac{EG}{m}, \quad (25)$$



а закономерность затухания колебательных движений запишется в виде

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{2\eta(f_1^2 + f_2^2)}{3\rho c^3}, \quad (26)$$

где η – вязкость жидкости, для масла $\eta = 0,0598$ Па·с; f_1 – частота акустических колебаний, c^{-1} ; ρ – плотность очищаемого масла, $\rho = 920$ кг/м³; c – коэффициент сжимаемости масла, $c=20,5$ с дополнительными механическими колебательными движениями, создаваемыми гармоническими продольными вибрациями фильтрационной поверхности.

Рассмотренный характер изменения кинематического состояния колебательной системы предусматривает одновременное воздействие на среду акустических и механических колебаний, что увеличивает интенсивность микротоков. В данном случае в выражениях интенсивности и амплитуды колебательных движений появляется новая степенная функция a_{Σ} , снижающая величину коэффициента затухания и, соответственно, повышающая интенсивность микротоков:

$$I = I_1 + I_2 e^{-2a_{\Sigma}x}; \quad A = A_1 + A_2 e^{-a_{\Sigma}x}, \quad (27)$$

где I_1 – интенсивность акустических волн, Вт/м²10⁵; I_2 – интенсивность механических волн, Вт/м²10⁵; A_1 – амплитуда акустических волн, мм; A_2 – амплитуда механических волн, мм.

Для получения уравнения скорости движения над фильтрационной поверхностью учитываются законы Стокса и Архимеда, а также условия того, что частоты взаимно перпендикулярных колебаний должны быть равны $\omega_B + \omega_n = \omega$, разность фаз колебаний отсутствует. В этом случае фигура Лиссажу (траектория частиц) является прямой линией (рис. 2).

Для определения в масле скорости движения загрязнений устанавливается производительность процесса перемещения:

$$Q = S_{\text{сеч}} V \gamma_{\text{уд}} K_{\text{распр}}, \quad (28)$$

где Q – производительность, кг/с; $S_{\text{сеч}}$ – площадь поперечного сечения загрязнителя, м²; $\gamma_{\text{уд}}$ – насыпная плотность загрязнителя, (ориентировочно 0,6 ... 1).

На этом основании уравнение скорости перемещения загрязнений записывается в виде

$$V = \rho_m S_{\text{реш}} \eta_m K^{(\omega)} \omega \cos \alpha \sqrt{(A_{\text{кв}}^2 + A_{\text{уз}}^2) \cdot \left(1 - \frac{g \cos \beta}{A_{\text{уз}} \omega^2 \sin \alpha}\right)}, \quad (29)$$

где ρ_m – плотность масла, кг/м³; $S_{\text{реш}}$ – площадь фильтрационной поверхности, м²; η_m – динамическая вязкость масла, Па·с; $K^{(\omega)}$ – коэффициент, учитывающий изменение частоты колебаний, c^{-1} ; ω – частота колебаний, c^{-1} ; α – угол между направлениями вертикальных колебаний и фильтрационной плоскостью, град; $A_{\text{кв}}$ – амплитуда вертикальных колебаний, м; $A_{\text{уз}}$ – амплитуда поперечных колебаний, м; β – угол наклона фильтрационной поверхности, град; g – ускорение свободного падения, м/с².

Заключение. Анализируя приведенные выше выражения, следует, что частота и цикл колебательных движений непосредственно влияют на максимальное смещение материального тела по оси «х».

Оптимизация их значений играет существенную роль в обеспечении оптимальных гидромеханических условий для всплытия частиц осадка с целью создания нового равновесного состояния материальной точки на расстоянии « x_{max} » от точки равновесия «х». Данное обстоятельство позволит направленно воздействовать на частицы осадка акустическими микротечениями и переместить их в отстойник, высвободив при этом доступ масла к адсорбирующей поверхности фильтра.

Полученным выражением (24) анализируются все параметры колебательных движений, необходимые для снижения седиментационной устойчивости грубодисперсных частиц, находящихся на фильтрационной поверхности, их отрыва и перемещения в последующем в накопитель суспензии.

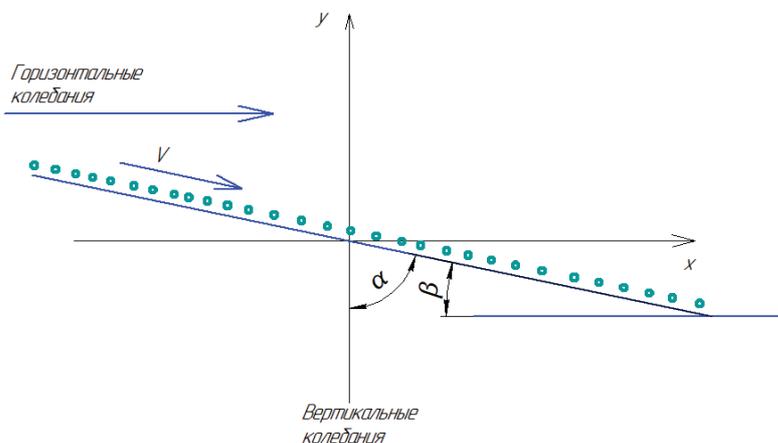


Рис. 2. Схема процесса действия совмещенных ультразвуковых и вибрационных колебательных волн



Аналитические зависимости (28), (29) позволяют определить и задавать оптимальные конструктивные параметры установки для очистки фильтрационной поверхности от частиц загрязнений за счет совместного действия: механических колебательных движений в вертикальной плоскости с амплитудой $A_{кс}$, осуществляющих отрыв и подъем частиц и приводящих их во взвешенное состояние над фильтрационной поверхностью; акустических колебательных движений в горизонтальной плоскости с амплитудой $A_{уз}$, осуществляющих направленное перемещение взвешенных частиц по наклонной фильтрационной поверхности в емкость-сборник.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О'Брайнен Р. Жиры и масла: производство, состав и свойства. СПб., 2007. 751 с.
2. Харченко Г.М., Земсков В. И. Эффективность очистки растительных масел в условиях сельскохозяйственных предприятий // Аграрная наука – основа успешного развития АПК и сохранения экосистем: Междунар. науч.-практ. конф. Барнаул, 2012. С. 234–237.
3. Очистка и регенерация нерафинированных растительных масел / Ф.Я. Рудик [и др.] // Известия ТСХА. 2019. Вып. 1. С. 113–126.
4. Балина Ю.А., Ербахова О.В. Инновационные технологии в очистке растительных масел // Информационные технологии, энергетика и экономика: микроэлектроника и оптотехника, инновационные технологии и оборудование в промышленности, управление инновациями: материалы XIII Междунар. науч.-техн. Конф. Смоленск, 2016. С. 227–230.
5. Рудик Ф.Я., Моргунова Н.Л., Тулиева М.С. Факторы, обуславливающие процесс порчи масла при хранении // Аграрный научный журнал. 2015. № 4. С. 66–69.
6. Бредихин С.А., Рудик Ф.Я., Тулиева М.С. Фильтрация подсолнечного масла в поле виброакустического воздействия // Вестник ВГУИТ. 2017. № 1. С. 22–27.
7. Бредихин С.А., Рудик Ф.Я., Тулиева М.С. Закономерности фильтрации подсолнечного масла с применением виброакустического воздействия // Вестник ВГУИТ. 2017. № 1. С. 68–72.
8. Сундуков Е.А., Моргунова Н.Л., Рудик Ф.Я. Повышение эффективности действия совмещенных ультразвуковых и колебательных волн // Пищевые технологии будущего: инновации в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. Саратов, 2021. С. 686–689.
9. Интенсификация процесса массопередачи ультразвуковыми колебаниями / Ф.Я. Рудик [и др.] // Пищевые технологии будущего: инновации в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Пенза, 2020. С. 314–316.
10. Рудик Ф.Я., Тулиева М.С., Моргунова Н.Л. Распределение ультразвуковых и колебательных волн при очистке сырых и не рафинированных подсолнечных // Технологии продуктов питания: материалы X Междунар. науч.-практ. конф. Саратов, 2018. С. 82–89.
11. Рудик Ф.Я., Моргунова Н.Л., Сундуков Е.А. Факторная взаимосвязь параметров гармонической колебательной системы при очистке фильтрационной поверхности установки для регенерации растительного масла // Аграрный научный журнал. 2020. № 12. С. 100–102.
12. Пановка В.Г. Введение в теорию механических колебаний. М., 1980. 321с.
13. Алфутов Н.А. Основы расчета на устойчивость систем. М., 1978. 312 с.
14. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний: учебник для вузов. М., 1980. 408 с.

REFERENCES

1. O'Brien R. Fats and oils: production, composition and properties. Saint Petersburg, 2007. 751 p. (In Russ).
2. Kharchenko G.M., Zemskov V.I. Efficiency of purification of vegetable oils in the conditions of agricultural enterprises. *Agrarian science is the basis for the successful development of the agro-industrial complex and the conservation of ecosystems*. Barnaul, 2012: 234–237. (In Russ).
3. Purification and regeneration of unrefined vegetable oils / F.Ya. Rudik et al. *Izvestiya TSHA*. 2019; 1: 113–126. (In Russ).
4. Balina Yu.A., Erbakhova O.V. Innovative technologies in the purification of vegetable oils. *Information technologies, energy and economics: microelectronics and optotechnics, innovative technologies and equipment in industry, innovation management*. Smolensk, 2016: 227–230. (In Russ).
5. Rudik F.Ya., Morgunova N.L., Tulieva M.S. Factors that determine the process of spoilage of oil during storage. *The agrarian scientific journal*. 2015; 4: 66–69. (In Russ).
6. Bredikhin S.A., Rudik F.Ya., Tulieva M.S. Filtration of sunflower oil in the field of vibroacoustic impact. *Vestnik VGUIT*. 2017; 1: 22–27. (In Russ).
7. Bredikhin S.A., Rudik F.Ya., Tulieva M.S. Regularities of filtering sunflower oil using vibroacoustic impact. *Vestnik VGUIT*. 2017; 1: 68–72. (In Russ).
8. Sundukov E. A., Morgunova N. L., Rudik F. Ya. Improving the efficiency of combined ultrasonic and oscillatory waves. *Food technologies of the future: innovations in the production and processing of agricultural products*. Saratov, 2021: 686–689. (In Russ).
9. Intensification of the process of mass transfer by ultrasonic vibrations / F.Ya. Rudik et al. *Food technologies of the future: innovations in the production and processing of agricultural products*. Penza, 2020: 314–316. (In Russ).
10. Rudik F.Ya., Tulieva M.S., Morgunova N.L. Distribution of ultrasonic and oscillatory waves during the cleaning of raw and unrefined sunflower seeds. *Food Technologies*. Saratov, 2018: 82–89. (In Russ).
11. Rudik F.Ya., Morgunova N.L., Sundukov E.A. Factorial relationship between the parameters of a harmonic oscillatory system during cleaning of the filtration surface of a plant for regenerating vegetable oil. *The agrarian scientific journal*. 2020; 12: 100–102. (In Russ).
12. Panovka V.G. Introduction to the theory of mechanical oscillations. Moscow, 1980. 321s. (In Russ).
13. Alfutov N.A. Fundamentals of calculation for the stability of systems. Moscow, 1978. 312 p. (In Russ).
14. Biderman V.L. The theory of mechanical vibrations: a textbook for universities. Moscow, 1980. 408 p. (In Russ).

Статья поступила в редакцию 27.03.2022; одобрена после рецензирования 20.04.2022; принята к публикации 25.04.2022.
The article was submitted 27.03.2022; approved after reviewing 20.04.2022; accepted for publication 25.04.2022.

