

## ПРОБЛЕМЫ ОЧИСТКИ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Г.М. Харченко, В.И. Земсков

*Анализируются способы очистки растительных масел центрифугированием. Показано, что сепарирование не обеспечивает полную очистку, так как существует предел центрифугирования. Использование разработанных авторами вертикальных фильтрующих центрифуг с цеолитовой фильтровальной перегородкой позволяет обеспечить качественную очистку растительных масел в условиях сельскохозяйственных предприятий с минимальными эксплуатационными затратами. Приводятся формула производительности центрифуги и итоговые результаты анализа адекватности математических моделей и экспериментальных данных процесса очистки растительных масел на экспериментальной фильтрующей центрифуге с цеолитовой фильтрующей перегородкой. Полученные результаты позволяют использовать математическую модель рабочего процесса центробежной фильтрации при обосновании конструктивных параметров проектируемых конических фильтрующих центрифуг.*

*Ключевые слова: растительные масла, очистка, виды, центрифугирование, математическая модель, рациональные параметры, адекватность.*

Производство растительных масел непосредственно у производителя позволяет повысить рентабельность производства за счет снижения издержек на транспортировку

сырья и получаемой продукции. Однако отсутствие малогабаритного оборудования, приспособленного для условий сельскохозяйственных производителей при незначительных объемах производства, сдерживается отсутствием оборудования для тонкой очистки масел.

Масло из семян масличных культур для условий сельскохозяйственных предприятий целесообразно извлекать механическим способом, в основе которого лежит прессование измельченного сырья (при этом кроме масла получают жмых).

На рисунке 1 приведена схема получения растительных масел после предвари-

тельного обезжиривания методом прессования (форпрессования).

По литературным источникам растительное масло, полученное прессовым методом, вызывает особый интерес, благодаря большому количеству в нем витаминов и биологически активных веществ. Масло холодного прессования сохраняет натуральные вкус и запах, но оно получается мутным из-за белковых и слизистых веществ, перешедших из масличного сырья, и, как правило, проходит фильтрование.

Наибольший эффект при переработке культур, масличность которых достигает 50%, обеспечивает двукратное прессование: предварительное прессование на прессах непрерывного действия (форпрессах) под малым давлением с отжимом лишь части масла (60...85%) и вторичное прессование на шнековых прессах – экспеллерах.

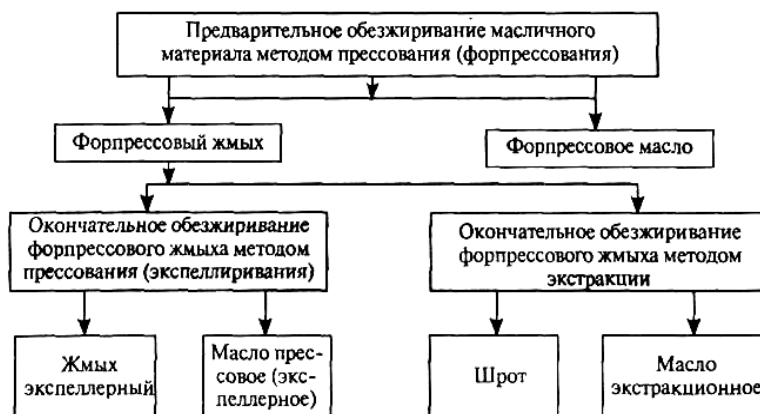


Рисунок 1 - Схема получения растительных масел методом прессования

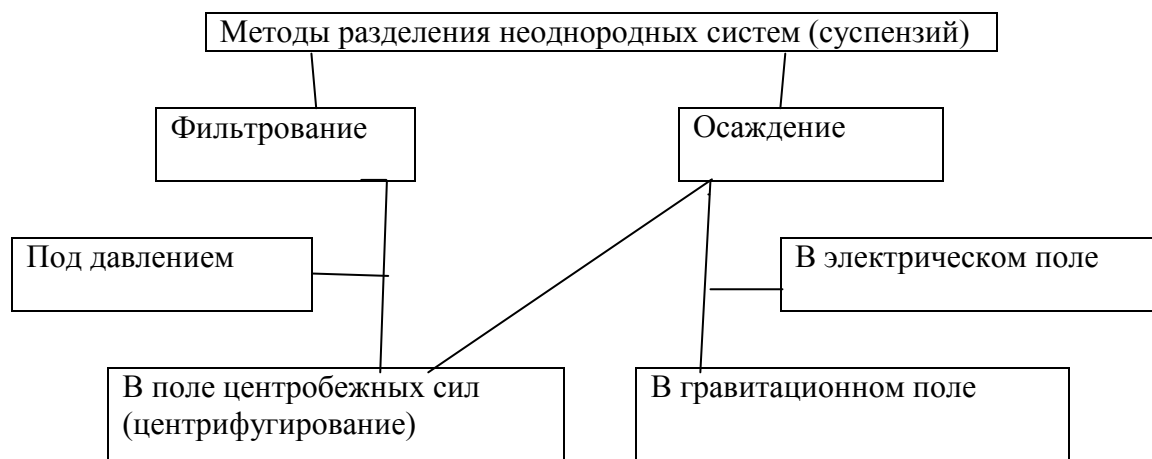


Рисунок 2 - Классификация методов разделения неоднородных систем

Методы разделения суспензий (очистки) подразделяются в зависимости от того, какая фаза движется относительно другой.

В процессе осаждения частицы движутся относительно сплошной среды. При фильтровании дисперсионная фаза проходит сквозь концентрированную дисперсную фазу.

Из исследований В.И.Соколова [1] следует, что при центрифугировании неоднородных систем удаляются не только взвешенные примеси, но и вода.

Применение фильтрующих центрифуг с фильтровальной перегородкой из цеолита в соответствии с нашей гипотезой позволит извлекать практически все виды примесей [2].

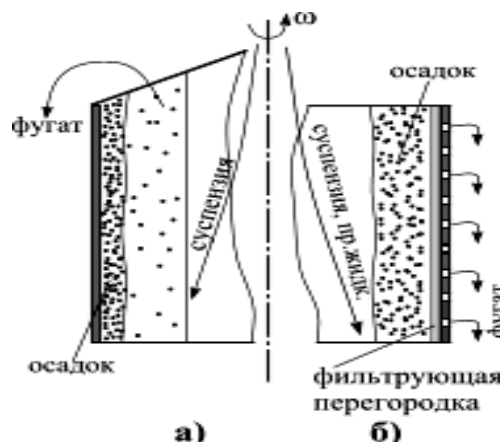


Рисунок 3. Виды центрифугирования:  
а) осаждение, б) фильтрование

О достоинствах и недостатках центрифуг можно судить по фактору разделения и индексу производительности, в конических центрифугах средний индекс производительности больше в 2,7...3 раза по сравнению с цилиндрическими.

Для центрифуг, предназначенных для очистки растительных масел, важными показателями являются: производительность при определенной степени очистки, зависимость показателей качества очистки от конструктивно-кинематических параметров центрифуги, технологических свойств «сырого» масла и параметров фильтровальной перегородки.

Использование сепараторов для очистки растительных масел не позволяет полностью удалить механические примеси. Для сепараторов с центральной подачей жидкости предельный размер частицы

$$d_1 = \sqrt{\frac{27\dot{I} \mu}{\pi \omega^2 z \operatorname{tg} \alpha (R_d^3 - R_i^3)^2 (\rho_0 - \rho_z)}}, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho_z$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\mu$  – динамическая вязкость жидкости, Па·с;  
 $z$  – число тарелок;  
 $R_d$  – радиус максимальный тарелки, м;  
 $R_i$  – радиус минимальный тарелки;  
 $\alpha$  – угол конуса тарелки, град.  
 $\dot{I}$  – производительность сепаратора, м<sup>3</sup>/с.

В этом случае под предельным размером частицы понимают минимальный размер такой частицы, которая, находясь на конической поверхности периферии тарелки, может выдержать напор жидкости, движущейся от центра к периферии, и удержаться на тарелке. Предельным размером частицы, выделяемой из жидкости, можно охарактеризовать качество разделения системы. Очевидно, что чем меньше предельный размер частицы, тем эффективнее процесс сепарирования. Слишком малые взвешенные в жидкости частицы, имеющие размеры, меньшие так называемого «предела центрифугирования», не отделяются от жидкости при центрифугировании.

Этот предел является определенным для данной центрифуги, данной дисперсной системы и условий центрифугирования.

Понятие о пределе центрифугирования, или, как он был первоначально назван, о пределе сепарации, введено Г.И. Бремером [3]. По его исследованиям очень мелкие частицы, осаждающиеся в центрифугируемой

жидкости, вследствие диффузии могут оставаться в последней во взвешенном состоянии независимо от продолжительности процесса. Это обусловлено тем, что скопление высокодисперсных частиц у поверхности, ограничивающей их движение, при определенных условиях и нестесненном броуновском движении может привести к равенству движущей силы процесса и градиента осмотического давления.

Как показывают наши исследования использование фильтровальной перегородки, в конических фильтрующих центрифугах из цеолита, позволяет осуществлять более глубокую очистку по сравнению с сепарированием.

Основное дифференциальное уравнение фильтрации [1]:

$$dV / (S d\tau) = (\Delta P / \mu) (R_{oc} + R_{фп.}), \quad (2)$$

где  $\Delta P$  – разность давлений, Па;  
 $R_{oc}$  – гидравлическое сопротивление осадка, м<sup>-1</sup>;  
 $R_{фп.}$  – гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки, м<sup>-1</sup>.

В работе В.Н. Стабникова, В.М. Лысянского, В.Д. Попова [4] основное дифференциальное уравнение фильтрации с образованием несжимаемого осадка на несжимаемой перегородке:

$$\frac{dV}{S d\tau} = \frac{\Delta P}{\mu \left( r_0 x_0 \frac{V}{S} + R_{\delta.i} \right)}. \quad (3)$$

Применительно к процессу очистки в конических фильтрующих центрифугах, перепад давления, действующего на фильтровальную перегородку

$$\Delta P = 2\pi^2 \rho_f n^2 (R_2^2 - R_1^2). \quad (4)$$

$n$  – число оборотов барабана центрифуги, об/с;

$\rho_f$  – плотность дисперсионной фазы, кг/м<sup>3</sup>;

$R_2$  – средний наружный радиус барабана, м;

$R_1$  – средний внутренний радиус слоя осадка, м.

Давление, развиваемое в жидкости при действии центробежного поля

$$P = [(\omega^2 \rho_f) / 2] (R^2 - r_0^2), \quad (5)$$

где  $R$  – наружный радиус ротора центрифуги, м;  $r_0$  – внутренний радиус слоя суспензии в роторе, м.

При фильтрации с постоянной скоростью повышается сопротивление осадка в результате увеличения его толщины.

При постоянной разности давлений уравнение фильтрования с образованием несжимаемой фильтровальной перегородки:

$$V^2 + 2 \frac{R_{\delta,i} S}{r_0 x_0} V = 2 \frac{\Delta P S^2}{\mu r_0 x_0} \tau. \quad (6)$$

В работах В.Н. Лунева, Ю.А. Емельянова [5] приводится следующая формула производительности при ламинарной центробежной фильтрации

$$V = \frac{k_c P_f}{\mu h} F, \quad (7)$$

где  $V$  – количество жидкости, проходящей в единицу времени через фильтрующую среду, м<sup>3</sup>/с;

$k_c$  – коэффициент проницаемости данной фильтрующей среды, м<sup>2</sup>;

$P_f$  – падение давления при прохождении жидкости через фильтрующую среду, Па;

$\mu$  – динамическая вязкость суспензии, Па·с;

$h$  – толщина фильтрующего слоя, м.

$F$  – полная площадь поперечного сечения фильтрационного потока, включая площадь пор и твердых частиц, м<sup>2</sup>.

При высоких давлениях, развиваемых в центрифугах, сжимаемые осадки сильно уплотняются, и их гидравлическое сопротивление потоку становится чрезмерно большим. Поэтому на фильтрующих центрифугах нецелесообразно разделять суспензии, образующие сильно сжимаемый осадок.

Необходимо учитывать высокое давление, создаваемое в конической фильтрующей центрифуге при работе, и предусматривать соответствующее уплотнение рабочих органов.

Процесс очистки растительного масла в вертикальной конической фильтрующей центрифуге можно разделить на три периода: образование слоя осадка в порах цеолита; уплотнение осадка и уменьшение объема пор цеолита; вытеснение жидкости, удерживаемой капиллярными и молекулярными силами [6].

Первый период можно сравнить с обычной фильтрацией, причем давление фильтрации обуславливается здесь напором, развиваемым благодаря действию на суспензию поля центробежных сил.

Второй период является специфическим, не имеющим аналогий среди других процес-

сов. Во время второго периода вначале твердые частицы центрифугируемой суспензии расположены некомпактно, при минимуме точек касания друг с другом. Ввиду того, что осадок находится под действием силового поля, его скелет стремится к более плотному расположению частиц. Однако сближение частиц связано с уменьшением объема пор в цеолите, и, следовательно, с выжиманием жидкой фазы из этих пор.

В этом случае возникает движение жидкой фазы к центру вращения. Скорость этого процесса описывается уравнением Стокса.

Возникающее в связи с этим давление обуславливает фильтрацию жидкости. Помимо давления, вызванного действием скелета на жидкую фазу, в последней развивается давление от действия на нее центробежного поля.

Процесс всплывания жидкой фазы в течение второго периода и обусловлен действием двух выше указанных давлений; от них, а также от гидравлического сопротивления зависит скорость перемещения частиц к наружной обечайке.

По окончании периода уплотнения осадка в порах цеолита начинается переходный период, во время которого происходит движение уровня насыщения осадка к наружной обечайке ротора.

Когда этот уровень достигнет состояния максимального заполнения пор цеолита примесями, начинает проявляться в чистом виде третий период процесса. К этому моменту расположение частиц скелета делается наиболее компактным. К началу третьего периода в местах соприкосновения частиц между собой и с поверхностью пор цеолита остается растительное масло, удерживаемое капиллярными и молекулярными силами. Часть его постепенно перетекает от одного стыка к другому к центру центрифуги.

Примеси, находящиеся в масле, как более тяжелая фракция, вытесняются к периферии. С целью повышения качества очистки вывод масла из ротора центрифуги осуществляется через отверстия, расположенные ближе к центру центрифуги.

Неочищенное масло после поступления в нижнюю часть зазора между обечайками начинает движение вверх со скоростью протока  $u_{пр}$ . К центру центрифуги движется очищенное масло, вытесняемое более тяжелыми частицами примесей со скоростью всплывания  $u_c$ . При движении вверх в межобечайечном пространстве ротора вдоль образующей конуса масло протекает по каналам цеолита при од-

новременном радиальном движении, в процессе которого оно постепенно освобождается от частиц примесей под действием сил центробежного поля. При достижении верхней части ротора очищенное масло выводится через трубку с регулируемой площадью поверхности отверстия и попадает в сборник очищенного масла кожуха центрифуги.

В результате теоретических исследований [7] получено следующее уравнение производительности

$$W = 3,16gF_2 \cdot Frk_c C_m = 3,16g \sum k_c C_m, \quad (8)$$

где  $F_2$  – площадь поверхности осаждения ротора центрифуги,  $m^2$ ;

$$F_2 = r_{min} \{ [(r_{min} + H \operatorname{tg} \theta_0) r_{min}]^{1/2} + [(r_{min} + H \operatorname{tg} \theta_0 + \ell_2)(r_{min} + \ell_2)]^{1/2} \}^2 / [(r_{min} r_{max})^{1/2} \operatorname{tg} \theta_0], \quad (9)$$

$Fr$  – фактор разделения

$$Fr = \frac{\omega^2 r_{cp}}{g} = \frac{\omega^2}{g} (r_{min} r_{max})^{1/2}. \quad (10)$$

Коэффициент проницаемости

$$k_c = 0,0068d^2 \frac{\varepsilon^3}{1 + \xi}. \quad (11)$$

Показатель, характеризующий влияние свойств обрабатываемого масла  $C_m$  ( $кг \cdot с / м^5$ )

$$C_m = \frac{\rho_s - \rho_f}{\nu} = \frac{\Delta\rho}{\nu}. \quad (12)$$

Индекс производительности центрифуги

$$\Sigma = 0,196 \omega F_{ome} [(R_{max} R_{min})^{1/2} + (r_{max} r_{min})^{1/2}] \times [\rho_f \nu / (\rho_s - \rho_f)] / [g k_c]. \quad (13)$$

Решая относительно разности плотностей дисперсной и дисперсионной фаз  $\Delta\rho$ , получим

$$\Delta\rho = (\rho_s - \rho_f) = 0,196 \omega F_{ome} \nu \rho_f [(R_{max} R_{min})^{1/2} + (r_{max} r_{min})^{1/2}] / (g k_c \Sigma). \quad (14)$$

В приведенных формулах использованы следующие обозначения:

$\omega$  – частота вращения ротора центрифуги,  $с^{-1}$ ;  
 $(\rho_s - \rho_f)$  – разность плотностей дисперсной и дисперсионной фаз растительного масла,  $кг/м^3$ ;

$\rho_f$  – плотность дисперсионной среды (масла),  $кг/м^3$ ;

$\mu$  – динамическая вязкость суспензии,  $кг/м \cdot с$ ;

$r_{min}$  – минимальный радиус внутренней обечайки ротора центрифуги,  $м$ ;

$d$  – диаметр частиц цеолита,  $м$ ;

$\varepsilon$  – пористость фильтрующего материала;

$\xi$  – коэффициент порозности;

$H$  – высота ротора центрифуги,  $м$ ;

$\theta_0$  – угол между осевой линией и образующей ротора центрифуги,  $град.$ ;

$\ell_2$  – радиальное расстояние между обечайками ротора центрифуги,  $м$ .

$\rho_s$  – плотность суспензии,  $кг/м^3$ ;

$\nu$  – кинематическая вязкость фильтруемого масла,  $м^2/с$ .

Экспериментальная центрифуга имеет следующие параметры: минимальный радиус внутренней обечайки конуса ротора  $r_{min} = 0,04$   $м$ , радиальное расстояние между внутренней и наружной обечайками ротора  $\ell_2 = 0,028$   $м$ , высота конуса ротора  $H = 0,135$   $м$ , тангенс угла наклона между образующей ротора с вертикальной осью центрифуги  $\operatorname{tg} 35^\circ = 0,7$ .

В процессе исследований анализируемыми факторами процесса очистки растительных масел приняты: частота вращения ротора центрифуги  $X_1(\omega)$ , площадь отверстий на выходе очищенного масла из центрифуги  $X_2(F_{отв})$  и эквивалентный диаметр частиц цеолита  $X_3(d)$ .

Компромиссные значения анализируемых факторов оцениваются по результатам анализа результатов многофакторных экспериментов при оценке критериев оптимизации: разности плотностей очищенного масла и дисперсионной фазы ( $Y_1$ ), кислотного числа очищенного масла ( $Y_3$ ), массовой доли нежировых примесей ( $Y_4$ ), массовой доли влаги и летучих веществ ( $Y_5$ ).

Компромиссными параметрами являются частота вращения ротора центрифуги  $\omega \geq 250$   $с^{-1}$ , эквивалентный диаметр частиц цеолита  $d = 0,0035 \dots 0,004$   $м$ , которые справедливы для всех центрифуг аналогичной конструкции. При таких показателях и при размерных характеристиках экспериментальной центрифуги производительность ограничивается отверстием для выхода очищенного масла  $F_{отв} < 0,5 \cdot 10^{-6}$   $м^2$ .

Приведенные данные свидетельствуют о том, что разработанные конструкции центрифуг позволяют получать очищенное масло, соответствующее требованиям ГОСТ

7825 и ГОСТ Р 52465 при их использовании с компромиссными параметрами, оказывающими влияние на качественные показатели очистки.

По теоретическим ( $\Delta\rho_{\text{теор}}$ , кг/м<sup>3</sup>) и экспериментальным ( $\Delta\rho_{\text{эксп}}$ , кг/м<sup>3</sup>) данным разности плотностей очищенного подсолнечного масла и дисперсной фазы получена зависимость теоретической и экспериментальной разности плотностей очищенного подсолнечного масла и дисперсионной фазы от площади отверстий для вывода очищенного масла из ротора центрифуги.

Эксперимент проведен на центрифуге при частоте вращения ротора  $\omega = 250 \text{ с}^{-1}$  и эквивалентном диаметре частиц цеолита  $d = 0,004 \text{ м}$ .

Теоретическая разность плотностей получена по математической модели (14) при частоте вращения ротора  $\omega = 250 \text{ с}^{-1}$  и эквивалентном диаметре частиц цеолита  $d = 0,004 \text{ м}$ .

В связи с тем, что при выводе математической модели процесса очистки растительных масел учесть все микро- и макрофакторы не представляется возможным, экспериментальные данные отличаются от теоретических, поэтому введен поправочный коэффициент  $K_n$ :

$$\Delta\rho = K_n 82,8 F_{\text{отв}} / (\omega C_u).$$

Поправочный коэффициент  $K_n$  находится по экспериментальным  $\Delta\rho_{\text{эксп}}$  и теоретическим  $\Delta\rho_{\text{теор}}$  данным по формуле

$$K_n = \Delta\rho_{\text{эксп}} / \Delta\rho_{\text{теор}} = 2,62.$$

По формуле (14) рассчитывается теоретическая разность плотностей ( $\Delta\rho_{\text{теор}}$ , кг/м<sup>3</sup>) при конструктивно-кинематических параметрах, характеризующих экспериментальную центрифугу, которая уточняется поправочным коэффициентом  $K_n$  и наносится на график (рис.4, ряд 2)

С использованием программы «Excel» по полученным данным построен график (рисунок 4) зависимости теоретической и экспериментальной разности плотностей очищенного подсолнечного масла и дисперсионной фазы от площади отверстия. По программе «Statistica-6» определена теснота связи между теоретическими и экспериментальными значениями разности плотностей, которая характеризуется коэффициентами детерминации  $R^2 = 0,981$  и корреляции  $R = 0,993$  при доверительной вероятности  $p = 0,0075$ , что характеризует хорошую связь. Расчетный критерий Фишера  $F_R = 77,4$  больше табличного  $F_{\text{табл}} = 10,1$ , то есть математическая модель адекватно отражает процессы очистки растительных масел в конических центрифугах.

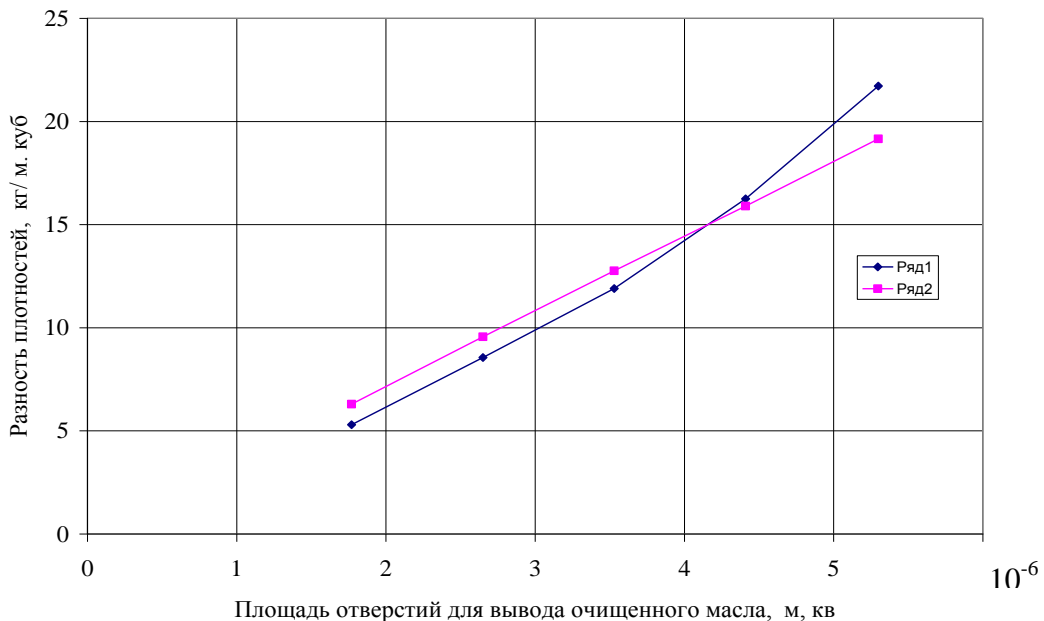


Рисунок 4 - Зависимость теоретической и экспериментальной разности плотностей очищенного подсолнечного масла и дисперсионной фазы от площади отверстий для вывода очищенного масла из ротора центрифуги: ряд 1 – экспериментальная; ряд 2 – теоретическая

## ПРОБЛЕМЫ ОЧИСТКИ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

### Выводы

1. Рациональными параметрами экспериментальной центрифуги являются: частота вращения ротора центрифуги  $\omega \geq 250 \text{ с}^{-1}$ , эквивалентный диаметр частиц цеолита  $d = 0,0035 \dots 0,004 \text{ м}$ , площадь отверстия для выхода очищенного масла

$$F_{\text{отв}} = 0,1 \cdot 10^{-6} \dots 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

При указанных параметрах критерии оптимизации для экспериментальной центрифуги равны: кислотное число  $K = 0,4 \text{ мг КОН/г}$ , массовая доля нежировых примесей, массовая доля влаги и летучих веществ, разность плотностей очищенного масла и дисперсионной фазы около нуля.

2. Обоснована адекватность разработанных математических моделей и экспериментальных данных рабочего процесса вертикальных конических фильтрующих центрифуг.

Полученные результаты позволяют рекомендовать математическую модель рабочего процесса центробежной фильтрации при обосновании конструктивных параметров проектируемых конических фильтрующих центрифуг.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов В.И. Центрифугирование [Текст] / В.И. Соколов. – М.: Химия, 1976. – 408 с.
2. Харченко Г.М. Механико-технологические основы фильтрации растительных масел в конических центрифугах (основы теории и расчета): монография [Текст] / Г.М. Харченко // Алт. гос. аграр. ун-

т. – Барнаул: АГАУ; Азбука, 2008. – 158 с.: ил. – Библиогр.: с. 143...158. – 130 экз. – ISBN 978-5-94485-099-7.

3. Бремер Г.И. Жидкостные сепараторы [Текст] / Г.И. Бремер. – М.: Машгиз, 1977. – 295 с.

4. Стабников В.Н. Процессы и аппараты пищевых производств [Текст] / В.Н. Стабников, В.М. Лысянский, В.Д. Попов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 503 с.

5. Лунев В.Д. Фильтрация в химической промышленности [Текст] / В.Д. Лунев, Ю.А. Емельянов. – Л.: Химия, 1982. – 72 с.

6. Центрифуга для очистки жидкости: пат. 2338598 Рос. Федерация: МПК В04 3/00 [Текст] / В.И. Земсков, Г.М. Харченко; заявитель и патентообладатель В.И. Земсков. – № 2007113289/12; заявл. 09.04.2007; опубл. 20.11.08, Бюл. № 32. – 4 с: ил.

7. Харченко Г.М. Механико-технологические основы фильтрации растительных масел в конических центрифугах (основы теории и расчета) (монография) / Г.М. Харченко. – Барнаул, Изд-во АГАУ; Азбука, 2008. – 158 с.

*Харченко Г.М., д.т.н., профессор кафедры МЖ и ПСХП,  
тел. 8-3832-267-3814,  
ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный аграрный университет»,  
Земсков В.И., д.т.н., профессор,  
e-mail: Zemskov.29@mail.ru  
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет»*