

*На основі теорії малих відхилень і експериментальних результатів обґрунтовується вплив зміни найважливіших теплофізичних характеристик зерна і шкідливих домішок на ступінь розділення зернової суміші у вихрових апаратах*

*Ключові слова: ступінь очищення, теплофізичні характеристики, вихрові апарати, сепарація*

*На основе теории малых отклонений и экспериментальных результатов обосновывается влияние изменения важнейших теплофизических характеристик зерна и вредных примесей на степень разделения зерновой смеси в вихревых аппаратах*

*Ключевые слова: степень очистки, теплофизические характеристики, вихревые аппараты, сепарація*

*On the basis of theory of small rejections and experimental results influence of change of major thermophysical descriptions of grain and harmful admixtures is grounded on the degree of division of corn mixture in vortical vehicles*

*Keywords: cleaning degree, thermophysical descriptions, vortical vehicles, separation*

# СТЕПЕНЬ ОЧИСТКИ ЗЕРНОВОЙ СМЕСИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТ

**Л. В. Кнауб**

Доктор технических наук, доцент, профессор  
Кафедры службы ракетно-артиллерийского вооружения  
Военный институт Одесского Национального  
политехнического университета  
ул. Фонтанская дорога, 10, г. Одеса, Украина, 65009  
Контактный тел.: 067-682-86-70  
E-mail: knaubludmila@gmail.com

## 1. Введение

На основе анализа машин по очистке зерна, выпускаемых в СНГ и зарубежных странах, можно сделать вывод, что все они работают по технологическому принципу (в самой себе) [1]:

- предварительная воздушная сепарація (первая цепочка принципа);
- просеивание (вторая цепочка);
- воздушная сепарація и разделение (третья цепочка) по критической скорости и толщине зерна.

Конструкции зерноочистительных машин включают в себя электроприводы (от двух до семи электродвигателей) с потребляемой мощностью, в отдельных случаях, от 4 до 15 кВт, набор дорогостоящих сит, состоящий из 4 – 7 штук со скребковыми механизмами для их очистки, привод которых осуществляется кривошипно-шатунным механизмом. Кроме того, в ряде машин электроприводы осуществляют свою работу через механические (шестеренчатые) приводы, а некоторые из машин работают при разряжении, что требует выполнения ряда дополнительных работ и специальных эксплуатационных требований.

Таким образом, существующие зернообрабатывающие сепарирующие и очищающие машины не лишены таких недостатков, как:

- сложность конструкции;
- большое число источников сжатого воздуха;
- высокие эксплуатационные требования к приводам и ситам;

– большое число подвижных механизмов, узлов и деталей;

- большое число (наборы) сепарирующих сит;
- высокие требования по чистоте и исправности сит и вентиляторов;
- электро- и пожаробезопасность и др.

Исходя из выше сказанного, перед нами стояла цель – разработать новую, принципиально отличную от существующей, машину по очистке зерна без подвижных частей и узлов, что позволит параллельно решить задачу ликвидации дорогостоящих сит. Предлагаемый нами принцип сепарации основывается на термогазодинамических воздействиях на зерновую смесь, находящуюся в вихревом потоке, поэтому особое внимание надо обращать на эффект воздействия температуры, а следовательно и на изменение теплофизических параметров смеси.

## 2. Основная часть

Задача дискретной оценки влияния теплофизических характеристик на степень очистки зерновой смеси является исходной информацией для проектирования вихревых аппаратов и технологических процессов с ними. При этом устранение калиброванных дорогостоящих сит, подвижных частей и узлов приводит к созданию принципиально новых сепараторов, работающих по принципу эффекта Ж.Ранка и позволяющих получать наперед заданную чистоту выделя-

емых потоков, кроме того, на порядок и выше снизить энергозатраты на единицу обрабатываемой смеси.

Известно, что зерновая смесь, поступающая на хранение и переработку, состоит из зерна и примесей: вредных и трудноотделимых, с предельным содержанием от 2 до 3,45% по объемной плотности. Плотность компонент, входящих в смесь зависит от относительной влажности, дискретные значения которой меняются в достаточно широких пределах (от 0,5 – 17, а иногда до 28%) и увеличение которой отрицательно влияет не только на процесс очистки и стабильного хранения, но и на технологический процесс переработки зерна.

За основные теплофизические характеристики компонент зерновой смеси, определяющие характер движения в воздушных потоках, принимают [2]:

– среднюю теплоемкость компонент

$$c_{cp} = \frac{1}{T_n - T_0} \cdot \int_{T_0}^{T_n} c_n dT, \tag{1}$$

$$c_n = \frac{dQ}{m \cdot dT},$$

где  $m$  – масса компоненты, кг;

$dQ$  – количество затраченной теплоты, Дж;

– теплопроводность компонент, которая определяет степень прогрева по сечению

$$\lambda = - \frac{Q}{\sum F \cdot \frac{dT}{dn} \cdot d\tau}, \tag{2}$$

где  $Q$  – количество теплоты, подведенное к поверхности  $\sum F$ , Дж;

$n$  – координата по нормали к поверхности, м;

$\tau$  – время, с;

– коэффициент температуропроводности

$$a = \frac{\lambda}{c_{cp} \cdot \rho}, \tag{3}$$

где  $\rho$  – плотность компонент, кг/м<sup>3</sup>;

– коэффициент тепловой активности [2]

$$\epsilon = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho} \text{ или } \epsilon = c \cdot \rho \cdot \sqrt{a}. \tag{4}$$

Анализ уравнений (4), приведенных в работе [3, стр. 66], показывает, что  $\epsilon$ , измеряемая в  $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{с}^{0,5}}$ , не может “выражать теплоусвоение, его теплоаккумулирующую способность и теплоинерционные свойства” [2] по следующим положениям, с позиций теплопередачи:

- размерность времени  $\tau, [c^{0,5}]$  не имеет смысла;

- размерность  $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \sqrt{\text{с}}}$  не может быть физически объяснена;

- если корень из произведения  $\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}$  зависит только от температуры, тогда теплообмен при сушке не определим, а зерно сжечь в шахтной зерносушилке не

удастся даже при бесконечно больших температурных градиентах “между поверхностью короба, подводящего агент сушки, и слоем зерна в шахтной зерносушке” [2], **а важность, тем не менее, этой комплексной характеристики  $\epsilon$  в процессах сушки и сепарирования неоспорима.**

В силу выказанного, следует как аксиома, что не может быть аккумуляции любой энергии без времени. На основании этого, значение  $\epsilon$  (4), как комплексной характеристики, должно быть представлено так, как это используется при нестационарном движении и теплообмене (сушке или испарении капель) в газодинамических сепараторах [3,4]:

$$\epsilon = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot \tau}, \tag{5}$$

где  $\lambda, c, \rho = f(\Delta T, \Delta \tau, \Delta T(\Delta \tau))$  и  $\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial n^2}$  или ее изменение

$$\Delta \epsilon = \sqrt{\int \int [(\lambda + \Delta \lambda) \cdot (c + \Delta c) \cdot (\rho \pm \Delta \rho(D))] \cdot d\tau},$$

$$\left[ \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}} = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}} \right] \tag{6}$$

Уравнение (6) есть плотность тепловой энергии с градиентом температуры в один градус, изменяющая теплофизические характеристики за единицу времени. Это справедливо для любого процесса теплообмена, особенно для сыпучих (скважистых) тел. Например, воздействие силового вихревого потенциального поля на движущийся гетерогенный поток в воздушных сепараторах показывает, что, чем выше концентрация составляющих, тем больше поверхность теплообмена при постоянных температурном градиенте и энергии, следовательно значение  $\epsilon$  уменьшается, а значит меньше изменения  $\Delta \lambda, \Delta c, \Delta \rho$  за единицу времени  $\tau$  - тепло- и массообмен уменьшается.

Тогда, в соответствии с требованиями, предъявляемыми к зерновой смеси, что процент примесей не должен превышать двух, а относительная влажность не выше 12%, необходимо учитывать изменения характеристик за время протекания процессов сушки, очистки зерна от примесей, что очень важно для проектирования аппаратов сушки и, особенно, вихревых сепараторов, где периферийные потоки несущей фазы имеют большую температуру, чем осевые. На основании этого дискретные изменения теплофизических параметров за интервал времени можно представить аналогично (1 – 3, 5):

$$\Delta c_{cp} = \frac{1}{T_n - T_0} \int_{T_0}^{T_n} \int_{\tau_0}^{\tau_2} c_n dT \frac{d\tau}{\tau}, \text{ при } \tau_2, T = T_n; \tag{7}$$

$$\text{при } \tau_1, T = T_0;$$

$$\Delta \lambda = - \frac{Q}{\sum F \cdot \frac{dT}{dl} \cdot \int_{\tau_1}^{\tau_2} d\tau}, \text{ при } \tau_2, T = T_n; \tag{8}$$

$$\text{при } \tau_1, T = T_0;$$

$$\Delta a = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{(\lambda_0 + \Delta \lambda)}{(c_0 + \Delta c)(\rho_0 \pm \Delta \rho(D))} \frac{d\tau}{\tau},$$

при  $\tau_2, \lambda_0 + \Delta\lambda, c_0 + \Delta c, \rho_0 \pm \Delta\rho(D)$ ;  
 при  $\tau_1, \lambda_0, c_0, \rho_0$  – исходные. (9)

Соотношения (7 – 9) дают изменение комплексной характеристики за время действия тепловой энергии

$$\Delta\varepsilon = \left[ \int_{\tau_1}^{\tau_2} \left( \lambda_0 + \frac{Q}{\sum F \cdot \frac{dT}{dl} \int_{\tau_1}^{\tau_2} dt} \right) \left( c_0 + \frac{1}{T_n - T_0} \cdot \int_{\tau_0}^{\tau_2} c_n dT \frac{d\tau}{\tau} \right) (\rho_0 \pm \Delta\rho(D)) d\tau \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (10)$$

где  $\tau = \tau_2 - \tau_1$  – время прохождения зон сепарации и теплообмена (время теплового воздействия)[4];

$\Delta\rho(D)$  – изменение плотности от влажности;

$dl$  – усредненный линейный размер составляющей гетерогенной смеси по координатам;

$\lambda_0, c_0, \rho_0$  – усредненные исходные теплофизические характеристики.

Истинная плотность зерновой смеси зависит от влажности, шероховатости, времени уборки, продолжительности хранения, сорта, зрелости, полноты зерна и т.д. Тогда, изменение плотности от влажности для разных сортов натуры зерна можно принять по статистическим данным с дискретными значениями отклонений. Плотность украинской пшеницы получена методом инфракрасной спектроскопии (гидроксильная группа прямо пропорционально поглощает электромагнитные колебания (энергию) в инфракрасной области спектра) (рис. 1).

Таким образом, находим, что по дискретным приближениям теплофизических характеристик зерновой смеси (7 - 10) и графической зависимости  $\rho(D)$  (рис. 1) можно определить степень отклонения очистки зерновой смеси от количественного содержания вредных примесей, воспользовавшись отклонениями  $\rho_i(D)$  (рис. 2), если рассматривать задачу очистки зерна вихревым сепаратором с переменными теплофизическими характеристиками.

Расписывая и интегрируя уравнения движения отдельных компонент, учитывающие  $\rho_i(D)$  по цилиндрическим координатам при вихревом движении от свободных вихрей до конца потенциальных, определяются координаты траекторий [6,7], которые не должны отклоняться на величину большую, чем необходимые размеры приемников компонент при расчете геометрии зоны потенциальных вихрей сепаратора [7].

Отдельное влияние теплофизических характеристик на степень отклонения очистки оценивается

на основе многопараметрических дифференциальных связей, определяющих  $\Delta\varepsilon$  (10).

Положим, что степень очистки  $\delta$ , % зависит от теплофизических параметров  $X$ , тогда, в общем виде, можно задачу оценки приближения привести к задаче оценки дифференциальных связей, независимо линейные или нелинейные функции степени очистки от выбранного переменного параметра. Воспользуемся рядом Тейлора, выразив

$$\bar{\delta} = f(\bar{X}) = f(\bar{c}_{cp}, \bar{\lambda}, \bar{a}, \bar{\varepsilon}, \bar{\rho}, \bar{\rho}(D)) \leq [\delta], \quad (11)$$

где  $[\delta]$  – допустимая чистота;

$\bar{\delta}, \bar{X}$  – средние значения степени очистки и параметров, соответственно, и задавая изменения  $\bar{X}$  в полях допуска отклонений  $\Delta(X(c_{cp}, \lambda, a, D, \varepsilon))$  (пунктирные кривые рис. 1,2), находим изменение  $\bar{\delta}$  разложением  $f(\bar{X})$  в ряд Тейлора

$$\Delta\delta = f_0|_{X=\bar{X}_0} + f_1|_{X=\bar{X}} \cdot \Delta X + \frac{1}{2!} f_2|_{X=\bar{X}} \cdot \Delta X^2 + \dots + \frac{1}{(n-1)!} f_{n-1}|_{X=\bar{X}} \cdot \Delta X^{n-1}. \quad (12)$$

Приравнивая малые отклонения второго и высших порядков к нулю ( $\Delta X^2, \Delta X^3, \dots, \Delta X^{n-1} = 0$ ), получим линейное уравнение, вместо уравнения (11)

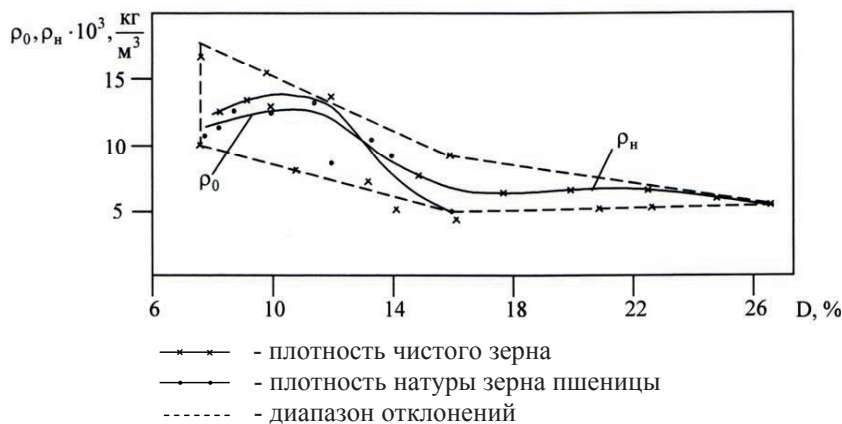


Рис. 1. Зависимость плотности от влажности

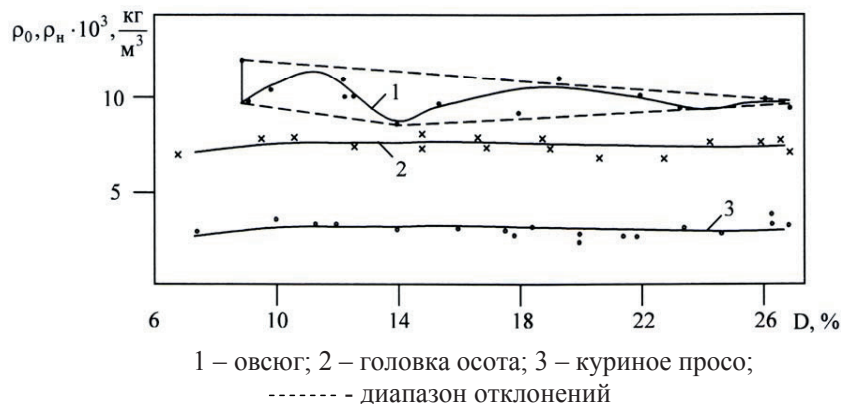


Рис. 2. Зависимость плотности от влажности примесей

$$\Delta\delta = K \cdot \Delta X, \tag{13}$$

где  $K = \frac{\Delta\delta}{\Delta X}$  - коэффициент комплексного (общего)

влияния всех параметров на степень очистки.

Очевидно, что, чем меньше модуль изменения  $\bar{X}$ , тем меньше ошибка в теоретическом определении отклонения степени очистки зерновой смеси от присутствующих вредных компонент.

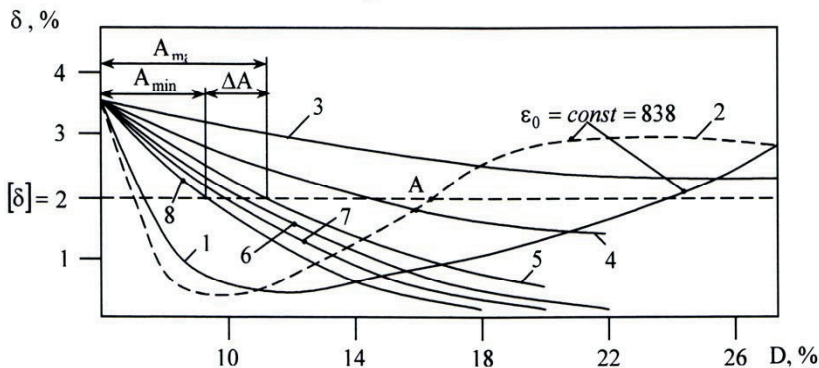


Рис. 3. Степень отклонения очистки зерна от изменения теплофизических характеристик: 1 -  $\delta(\epsilon_0) = 838 = \text{const}$  - экспериментальные значения ( $c_0, \lambda_0, a_0, \rho_0 = \text{const}$ ) при производительности 700 кг/ч и давлении набегающего потока 0,045 МПа при  $\tau_2 = 6$  с,  $T_n = 298$  К,  $T_0 = 275$  К; 2 - расчетные значения  $\delta(\epsilon_0)$  при тех же значениях, что и для кривой 1; 3 -  $\delta(\rho_0), \rho_0 \approx \rho_{\text{прим}} \approx 1350 \text{ кг/м}^3$  (смесь зерна 96,55% и рисовое просо 3,45%); 4 -  $\delta(\bar{\rho}(D))$ ; 5 -  $\delta(\bar{\epsilon}(D))$ ; 6 -  $\delta(\bar{c}(D))$ ; 7 -  $\delta(\bar{\lambda}(D))$ ; 8 -  $\delta(a)$

Тогда, выражение (11), на основании принципа суперпозиции, отклонения степени очистки представляется линейной зависимостью вида (13), независимо от нелинейностей  $\delta(\Delta c_{cp}, \Delta \lambda, \Delta a, \epsilon, \dots, D, \Delta \rho)$ , в абсолютном и относительном дискретных значениях

$$\Delta\delta = \frac{\partial(\Delta\delta)}{\partial c_{cp}} \Big|_{\Delta\lambda, \Delta a, \bar{\epsilon}, \bar{D}, \bar{\rho} = \text{const}} \cdot (\Delta c_{cp}) + \frac{\partial(\Delta\delta)}{\partial \lambda} \Big|_{\Delta c_{cp}, \Delta a, \bar{\epsilon}, \bar{D}, \bar{\rho} = \text{const}} \cdot (\Delta \lambda) + \frac{\partial(\Delta\delta)}{\partial a} \Big|_{\Delta\lambda, \Delta c_{cp}, \bar{\epsilon}, \bar{D}, \bar{\rho} = \text{const}} \cdot (\Delta a) + \frac{\partial(\Delta\delta)}{\partial \epsilon} \Big|_{\Delta\lambda, \Delta c_{cp}, \Delta a, \bar{D}, \bar{\rho} = \text{const}} \cdot (\Delta \epsilon) + \frac{\partial(\Delta\delta)}{\partial D} \Big|_{\Delta\lambda, \Delta c_{cp}, \bar{\epsilon}, \bar{D}, \Delta a = \text{const}} \cdot (\Delta D) + \dots + \frac{\partial(\Delta\delta)}{\partial \rho} \Big|_{\Delta\lambda, \Delta c_{cp}, \bar{\epsilon}, \bar{D}, \Delta a = \text{const}} \cdot (\Delta \rho), \tag{14}$$

а безразмерные коэффициенты, влияющие на величину  $\delta\Delta$ , выразятся зависимостями:

$$\left. \begin{aligned} \bar{K}_{\Delta\delta}^{\Delta c_{cp}} &= K_{\Delta\delta}^{\Delta c_{cp}} \cdot \frac{\Delta c_{cp}}{\Delta\delta}; & \bar{K}_{\Delta\delta}^{\epsilon} &= K_{\Delta\delta}^{\epsilon} \cdot \frac{\Delta \epsilon}{\Delta\delta}; \\ \bar{K}_{\Delta\delta}^{\Delta \lambda} &= K_{\Delta\delta}^{\Delta \lambda} \cdot \frac{\Delta \lambda}{\Delta\delta}; & \bar{K}_{\Delta\delta}^D &= K_{\Delta\delta}^D \cdot \frac{\Delta D}{\Delta\delta}; \\ \bar{K}_{\Delta\delta}^{\Delta a} &= K_{\Delta\delta}^{\Delta a} \cdot \frac{\Delta a}{\Delta\delta}; & \bar{K}_{\Delta\delta}^{\Delta \rho} &= K_{\Delta\delta}^{\Delta \rho} \cdot \frac{\Delta \rho}{\Delta\delta}. \end{aligned} \right\} \tag{15}$$

В уравнение (13), а следовательно и (14), могут вводиться аналогично другие интересующие параметры: плотности газового потока, концентрации компонент, геометрические размеры вихревых сепараторов и др.

На рис. 2 приведены результаты статистической обработки изменения плотности примесей от влажности, с наложенными диапазонами изменения тех же урожаяев, что и зерна, которые использованы для решения системы (5 - 15). Аналогичные отклонения

получены для татарской гречихи, куколя, спорыньи, курмака и т.д.

### 3. Выводы

Результаты решения (рис. 3) дают основания сделать обобщающие выводы, что при условиях, если одно из слагаемых уравнения (14) принимается как независимое переменное, то все остальные в расчет вводятся по осредненным значениям для выбранной влажности D, а общее количество одной, как и суммарной, компоненты в зерне не должно превышать 3,45% с суммарной влажностью исходного гетерогенного потока равной 6%. Экспериментальные отсеивания выбранной компоненты для сравнения с расчетом проводилось один раз на вихревом газодинамическом сепараторе [4-7].

1. Постоянный расход (производительность 700 кг/ч) показывает, что с увеличением влажности более, чем 22%, степень очистки ухудшается (кривые 1, 2 рис. 3). Связано это с увеличением относительной скорости воздуха в вихревом потоке по поверхности компонент, вследствие уменьшения шероховатости оболочек и зерна, и любой примеси (аналогично влияют и плотность, и тепловая активность). Эта закономерность объясняется нами тем, что с уменьшением влажности резко уменьшаются тепловой и гидродинамический пограничные слои на поверхностях компонент (кривые 4 – 8 рис. 3).

2. Установлено предельное значение комплексной характеристики - точка "А" (рис. 3), когда значение  $\delta(\epsilon) < 2\%$ , что определяет и соответствует предельной влажности зерновой смеси 16% для вихревого сепарирования. Уменьшение разности плотностей ухудшает очистку при любой влажности (кривая 3).

3. Температуропроводность, теплоемкость и теплопроводность при изменении влажности, в пределах от 9 до 16%, меняются в узких пределах (4 – 6%), как и плотности зерна, натуры зерна и примесей [3], из-за высокого термического сопротивления оболочек, и на степень очистки, за время действия тепловой энергии, практически не влияют, поскольку значения  $\Delta A(\lambda, c, a, \epsilon) = A_{\text{max}} - A_{\text{min}} < A(\rho(D))$  при  $\epsilon = 838 \text{ Дж/(м}^2 \cdot \text{К)} = \text{const}$  (рис. 3). Данное обстоятельство дает основание утверждать, что при проектировании вихревых газодинамических сепараторов зерна следует уделять особое внимание только изменению влажности компонент, входящей в интегральную зависимость как составляющая комплексной характеристики (10).

Сделанные выводы по результатам исследований определяют направления перспективного развития вихревых газодинамических сепараторов для гетерогенных полидисперсных смесей.



## Литература

1. Соколов, А. Я. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна [Текст] / А. Я. Соколова. - М.: Колос, 1984. - 445 с.
2. Гинзбург, А. С. Теплотехнические свойства зерна, муки и крупы [Текст] : учеб. / А. С. Гинзбург, М. А. Громов ; - М.: Колос, 1984. - 304 с.
3. Барсуков, С. И. Термодинамика и теплопередача [Текст] : учеб. / С. И. Барсуков, Л. В. Кнауб ; ОИСВ. - Одесса: Институт, 1993. - 396 с.
4. Проектирование и изготовление установки для очистки зерна [Текст] : отчет о НИР (промежуточн.) / Науч. техн. исслед. центр; рук. С. И. Барсуков. - Рег.№1233426. - М., 1993. - 74 с.
5. Проектирование и изготовление установки для очистки зерна [Текст] : отчет о НИР (промежуточн.) / Науч. техн. исслед. центр; рук. С. И. Барсуков. - Рег.№1399126. - М., 1993. - 50 с.
6. Проектирование и изготовление установки для очистки зерна [Текст] : отчет о НИР (промежуточн.) / Науч. техн. исслед. центр; рук. С. И. Барсуков. - Рег.№1504105. - М., 1993. - 59 с.
7. Кнауб, Л. В. Газодинамічний вихровий сепаратор [Текст] / Л. В. Кнауб // Eksploatacja silnikow spalinowych. - Szczecin (Poland): Wydawnictwo katedry eksploatacji pojazdow samochodowych politechniki szczecinskiej, 2002. - Zeszyt Nr.7. - P. 23 - 30.

*У роботі наведені результати досліджень, спрямованих на розширення галузі використання фільтруючих елементів. Запропоновані нові можливості для застосування синтезованих склокристалічних фільтрів, отриманих за розробленою енергозберігаючою технологією*

*Ключові слова: склокристалічні фільтри, регенерація, галузі використання*

*В работе приведены результаты исследований, направленных на расширение области применения фильтрующих элементов. Предложены новые возможности для использования синтезированных стеклокристаллических фильтров, полученных по разработанной энергосберегающей технологии*

*Ключевые слова: стеклокристаллические фильтры, регенерація, области применения*

*The results of studies aimed at expanding the application field of filter elements. The new possibilities for the synthesized glass-crystal filters use, obtained by the developed energy-saving technology, were offered*

*Key words: glass-crystal filters, regeneration, application fields*

УДК 666.189.241; 628.16

## НОВЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СТЕКЛО- КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

Л. А. Михеенко

Научный сотрудник

Кафедра технологии керамики, огнеупоров, стекла и эмалей

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

Контактный тел.: (057) 707-64-82, 050-605-73-26

### 1. Анализ проблемы и постановка задачи исследований

Вода в современном мире загрязняется промышленными сбросами, коммунально-бытовыми, сельскохозяйственными, а также дренажными, ливневыми, талыми водами. Объем сточных вод увеличивается

с каждым годом. В индустриально развитых странах главным потребителем воды и самым крупным источником стоков является промышленность.

Промышленные стоки в реки по объему в 3 раза превышают коммунально-бытовые. Поскольку гораздо дешевле выбрасывать отходы разных производствен-