

теми й зникнення структури або нового її стану з мінімумом виробництва ентропії. Утворення дисипативних структур супроводжується зміною механічної енергії структури або системи в цілому: виникає видимий макроскопічний рух або упорядкування цього руху.

Теорія І. Пригожина дозволяє припустити існування потенційних механізмів самоорганізації таких дисипативних структур. Умовами для таких механізмів є: віддалення від рівноваги; нестійкість системи поблизу стаціонарного стану; флуктуації; відкритість системи по потоках енергії та маси.

Дисипативні структури дозволяють максимально розсіяти «високоякісну» енергію сушильного агента, що в першому наближенні визначається зниженням температури відпрацьованого сушильного агента. Під час ЗТП-сушіння під утворенням дисипативних структур розуміється розвиток поверхні випару за рахунок збільшення пористості матеріалу, що зневоднюється [2].

Збільшення пористості сушених харчових продуктів, тобто збільшення кількості пор та віддалення матеріалу від монопористої структури, сприяє збільшенню здатності отриманого продукту поглинати вологу та відновлювати свої властивості.

#### **Висновки**

Таким чином, за ізотермами сорбції контрольних зразків та швидковідновлювальних каш встановлено, що функція розподілення для каші, отриманої з використанням принципів ЗТП-процесу, має більшу ширину та найбільш імовірний радіус, що свідчить про розвиток пористої структури під час ЗТП-сушіння, і, як наслідок, підвищення функціонально-технологічних властивостей сушеної харчової сировини.

Робота виконана в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи кафедри енергетики та фізики Харківського державного університету харчування та торгівлі – № 06-11-13Б «Наукові обґрунтування енергоефективних процесів харчової промисловості».

#### **Література**

1. Пат. 2096962 РФ, МКИ А23 В7/03. Способ сушки пищевых продуктов / Н.И. Погожих, В.А. Потапов, Н.М. Цуркан (Украина). – №94033280/13. Заявл. 13.09.94, опубл. 22.06.89. БИ №40. – 3 с.
2. Погожих Н.И. Научные основы теории и техники пищевого сырья в массообменных модулях : Автореф. дис. ... доктора техн. наук / ХДАТОХ. – Харьков, 2002. – 35 с.
3. Цуркан, Н.М. Разработка рациональных режимов производства сушеного быстровосстанавливаемого картофеля : Автореф. дис. ... кандидата техн. наук / ХДАТОХ. – Харьков, 2000. – 20 с.
4. Пак, А.О. Розробка процесу сушіння плодово-ягідної сировини змішаним теплопідводом зі штучним пороутворенням : Автореф. дис. ... кандидата техн. наук / ХДУХТ. – Харків, 2008. – 20 с.
5. Пат. 48230 UA, МПК А23L 3/00. Установка для гидротермической обработки та сушіння крупи / О.І. Черевко, М.І. Погожих, М.В. Жеребкін, А.О. Пак, М.М. Цуркан (Україна). – №u2009 09646, Заявл. 21.09.2009, публ. 10.03.2010, Бюл. № 5. – 2 с.
6. Потапов, В.О. Структурно-енергетичний метод аналізу ізотерм сорбції-десорбції харчової сировини [Текст] / В.О. Потапов // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі: Зб. наук. пр. Харків: ХДУХТ, 2005. - Вип.1. - С. 313 - 322.
7. Потапов, В.А. Научные основы анализа и управления кинетикой сушки пищевого сырья [Текст] : дис. ... докт. техн. наук: 05.18.12: защищена 18.05.07: утв. 05.11.07/ Потапов Владимир Алексеевич. - Харьков, 2007. - 348 с.

УДК 664-492.2:621.928.23

## **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО СЕПАРИРОВАНИЯ ТРУДНОСЫПУЧИХ ПРОДУКТОВ**

**Батт А.В., канд. техн. наук, доцент, Чумаченко Ю.Д., канд. техн. наук, доцент  
Одесская национальна академия пищевых технологий, г. Одесса**

*В данной статье приводится решение сложной многофакторной экспериментальной задачи, связанной с отысканием оптимальных условий проведения технологических процессов и разработкой наиболее рациональных конструкций оборудования.*

*This article provides a solution to a complicated multi-factor experimental task of finding the optimal conditions for manufacturing processes and develop more rational design of equipment.*

Ключевые слова: вибрационное сепарирование, трудносыпучие продукты.

Для исследования процесса вибрационного сепарирования труднораспаечивых продуктов принят метод математического планирования и анализа эксперимента, который позволяет принимать решения в условиях неопределенности или при низком уровне априорной информации об изучаемом процессе. Наличие недостаточной априорной информации об изучаемом процессе позволяет поставить эксперимент в области, близкой к оптимальной, что значительно сокращает время экспериментирования и получения математической модели, адекватно отражающей реальный процесс. Оптимальное решение, найденное с помощью этой модели, рассматривают лишь как хорошую аппроксимацию оптимального решения реальной задачи. Однако ценность такой модели этим не снижается. Напротив, приближенная модель системы, позволяющая улучшить качество её функционирования, гораздо лучше точного описания системы, не обеспечивающего этой задачи.

Анализ опубликованных работ показал, что в большинстве случаев наиболее приемлемым критерием для оптимизации процесса сепарирования, характеризующим качественную сторону процесса, по мнению различных авторов, является показатель степени извлечения проходовой фракции, который определяется как отношение массы проходовой фракции, полученной в результате опыта  $P_{np}$  к массе её в исходной смеси  $P_{исх}$ :

$$E = \frac{P_{np}}{P_{исх}} \cdot 100\% . \quad (1)$$

Этот показатель является простым и удобным, имеет ясный физический смысл и отвечает требованиям, предъявляемым к критериям оптимизации.

Учитывая условия сепарирования на вибрационном сепараторе, а именно: подачу продукта с подпором, необходимо оценивать и количественную сторону процесса. Односторонняя количественная или качественная характеристика в этом случае не позволит полностью оценить процесс.

В качестве критерия, отражающего количественную сторону процесса, приняли производительность вибрационного сепаратора ( $Q$ , т/ч), которая определялась по результатам снятия баланса продукта по формуле:

$$Q = \frac{Q_o \cdot 3600}{t \cdot 1000} , \text{ т/ч}, \quad (2)$$

где  $Q_o$  — масса исходной смеси, поступающей в машину, кг;

$t$  — время снятия баланса, с.

Таким образом, в качестве критериев, отражающих количественную и качественную стороны процесса, приняты показатель степени извлечения проходовой фракции и производительность вибрационного сепаратора.

При формализации любого объекта исследования важно установить его различные состояния и выбрать соответствующие влияющие факторы. Установление разнообразия состояний объекта зависит от поставленной цели и априорных данных об объекте. При этом важным является выбор такого состояния (выбор факторов и их значений), при котором обеспечивается установление оптимального состояния изучаемого объекта.

Предварительное изучение процесса сепарирования и многочисленных конструкций сепарирующих машин позволило определить совокупность факторов, наиболее существенно влияющих на эффективность процесса.

Обозначим эти факторы:

$A$  — амплитуда колебаний рабочего органа;

$V_u$  — средняя скорость перемещения частицы по ситам;

$q$  — начальная подача;

$H$  — толщина слоя продукта;

$t$  — экспозиция сепарирования;

$\omega$  — частота колебаний;

$\alpha$  — угол наклона сита к горизонту;

$d$  — размер отверстий сита;

$c$  — физико-механические свойства продукта.

Одним из основных факторов, влияющим на процесс сепарирования, является амплитуда колебаний. Для рабочих органов, совершающих сложное пространственное движение, характерно наложение колебаний. Другими словами, точки рабочего органа совершают движения, которые можно представить, как результат наложения гармонических колебаний с одинаковой частотой, происходящих со сдвигом по фазе в различных направлениях. При этом траекторию точек представляют в общем случае эллипсоиды, длина и наклон осей которых определяются амплитудами составляющих колебаний и сдвигом фаз между

ними, причём их размеры по длине образующей рабочего органа вибрационного сепаратора различны, т. е. составляющие амплитуды колебаний в этих точках отличаются друг от друга. Следовательно, в результате различия кинематических режимов на отдельных участках рабочего органа от центра к периферии технологическая эффективность и производительность процесса вибрационного сепарирования на этих участках будут также различны. Это обстоятельство обуславливает необходимость учитывать значения составляющих амплитуды колебаний в различных точках по длине образующей рабочего органа, что существенно усложняет процесс исследования. Кроме того, конкретное значение амплитуды колебаний определяется соответствующим сочетанием значений других факторов. Для вибрационного сепаратора амплитуда колебаний является функцией частоты вращения вала вибратора, угла взаимного расположения дебалансов и их масс, которые, в свою очередь, являются также важными факторами, существенно влияющими на эффективность процесса вибрационного сепарирования и требующие самостоятельного включения каждого из них в эксперимент. При использовании их в сочетании с амплитудой колебаний в качестве факторов такие требования, предъявляемые к факторам при планировании эксперимента, как управляемость и однозначность, не выполняются, так как амплитуда колебаний является функцией многих переменных и её значение нельзя точно установить на каком-либо уровне, независимо от уровней остальных факторов. Другими словами, мы не можем изменять амплитуду колебаний, придавая ей в каждом опыте желаемое значение. Следовательно, в данном случае амплитуда колебаний не может являться фактором при планировании эксперимента.

Поэтому в технологических исследованиях вибрационного сепаратора с рабочим органом, совершающим сложное пространственное движение, правильнее говорить о факторах, функцией которых является амплитуда колебаний, что позволяет оценить влияние совокупности кинематических параметров, характеризующих режимы движения различных точек по длине образующей рабочего органа от центра к периферии, на эффективность процесса сепарирования. При этом сложный фактор-функция представляется с помощью простых однозначных факторов.

Для вибрационного сепаратора составляющую амплитуды колебаний в любой точке рабочего органа и в любом направлении с учетом основных конструктивных параметров колеблющейся части (рис. 1) в общем виде можно представить, как функцию:

$$A_{ij} = f(M_{к.ч}, m_в, m_н, l_1, l_2, l_3, l_4, \beta, \omega), \quad (3)$$

где  $A_{ij}$  — составляющая амплитуды колебаний в  $i$ -ой точке рабочего органа в  $j$ -ом направлении;  
 $M_{к.ч}$  — масса колеблющейся части вибрационного сепаратора;  
 $m_в, m_н$  — массы соответственно верхнего и нижнего дебалансов;  
 $l_1, l_2$  — длины плеч соответственно верхнего и нижнего дебалансов относительно оси вращения;  
 $l_3, l_4$  — длины плеч соответственно верхнего и нижнего дебалансов относительно центра тяжести колеблющейся системы;  
 $\beta$  — угол взаимного расположения дебалансов;  
 $\omega$  — частота колебаний рабочего органа.

Масса колеблющейся части для данного сепаратора — величина постоянная. Длины плеч дебалансов установим на фиксированных уровнях, тогда представленная функция значительно упрощается:

$$A_{ij} = f(\beta, \omega, m_в, m_н). \quad (4)$$

Скорость перемещения частицы по рабочему органу является функцией:

$$V_{ч} = f(\alpha, \beta, \omega, A_{ij}), \quad (5)$$

которую с учетом зависимости (4) можно записать, как

$$V_{ч} = f(\alpha, \beta, \omega, m_в, m_н). \quad (6)$$

Начальная подача определяется массой, объемом или количеством частиц исходной смеси в единицу времени. В общем случае начальная подача является функцией:

$$q = f(S, V_{ч}, \gamma), \quad (7)$$

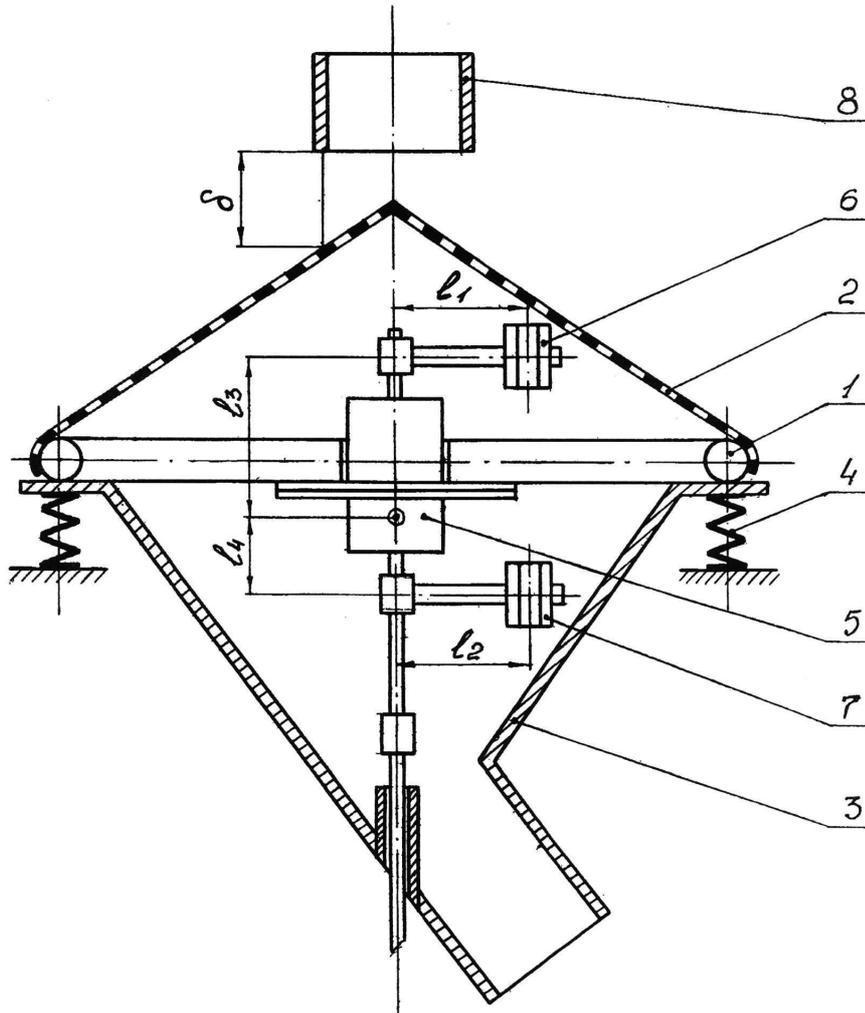
где  $S$  — площадь поперечного сечения питающего патрубка;

$V_{ч}$  — скорость движения частиц подаваемого продукта;

$\gamma$  — объемная масса продукта.

В ходе предварительных исследований установлено, что максимальная эффективность вибрационного сепаратора достигается путём подачи продукта на рабочий орган с подпором. В связи с этим необходимо отметить следующее. Обычно, в исследованиях процесса сепарирования нагрузка на рабочий орган назначается исследователем произвольно в априорно известных интервалах варьирования. В случае подачи продукта с подпором, нагрузка на рабочий орган вибрационного сепаратора зависит от сочетаний значений факторов, влияющих на процесс. При этом реализуется возможность оценить совместно коли-

качественную и качественную сторону процесса вибрационного сепарирования, так как количество продукта, поступающего в единицу времени на рабочий орган, будет зависеть от факторов, влияющих в то же время и на технологическую эффективность.



1 – ситовая рама; 2 – сито; 3 – конусный сборник; 4 – пружина; 5 – механизм вибратора; 6, 7 – соответственно, верхний и нижний дебалансы; 8 – питающий патрубок

**Рис. 1 – Конструктивная схема колеблющейся части вибрационного сепаратора**

С учетом сказанного начальная подача для вибрационного сепаратора будет являться функцией:

$$q = f(S, V_{\text{ч}}, \gamma, H), \quad (8)$$

где  $H$  — начальная толщина слоя продукта.

В вибрационном сепараторе начальная толщина слоя продукта регулируется с помощью зазора ( $\delta$ ) между питающим патрубком и ситовой поверхностью (см. рис. 1), т. е.

$$H = f(\delta). \quad (9)$$

С целью упрощения зависимости (8), зазор между питающим патрубком и ситовой поверхностью установим на фиксированном уровне, т. е.  $\delta = \text{const}$ . Площадь поперечного сечения питающего патрубка и объемная масса каждого из исследуемых продуктов являются постоянными величинами. В связи с этим начальную подачу с учетом зависимости (6) можно записать, как

$$q = f(\alpha, \beta, \omega, m_b, m_n). \quad (10)$$

Из данной зависимости следует, что при неизменном зазоре между питающим патрубком и ситовой поверхностью начальная подача зависит от угла наклона сита, угла взаимного расположения дебалансов, их масс и частоты колебаний.

Экспозиция сепарирования является функцией:

$$t = f(V_q, T), \quad (11)$$

где  $T$  — траектория движения частицы по рабочему органу.

Траектория движения частицы является функцией следующих факторов:

$$T = f(\alpha, \beta, \omega, A_{ij}) \quad (12)$$

или с учетом зависимости (4):

$$T = f(\alpha, \beta, \omega, m_g, m_n). \quad (13)$$

Из функциональных зависимостей (6), (11) и (13) можно записать, что экспозиция сепарирования является функцией:

$$t = f(\alpha, \beta, \omega, m_g, m_n). \quad (14)$$

Таким образом, с учетом полученных функциональных зависимостей критерии оптимизации процесса вибрационного сепарирования являются функциями следующих факторов:

$$E, Q = f(\alpha, \beta, \omega, m_g, m_n, d, c). \quad (15)$$

Размер отверстий сита для каждого из исследуемых компонентов устанавливали на фиксированном постоянном значении. Физико-механические свойства продукта в течение эксперимента также остаются неизменными. В связи с этим математическая модель в общем виде процесса вибрационного сепарирования упрощается:

$$E, Q = f(\alpha, \beta, \omega, m_g, m_n). \quad (16)$$

В результате проведенного анализа основных функциональных зависимостей процессе вибрационного сепарирования с учетом методического подхода к исследованию (подача продукта с подпором) установлено, что основными факторами, существенно влияющими на процесс, являются угол наклона сита, частота колебаний рабочего органа, угол взаимного расположения дебалансов и их массы. Из общего числа выделенных факторов определены те, которые целесообразно и можно варьировать в ходе эксперимента и которые отвечают требованиям, предъявляемым к факторам.

При выборе интервалов варьирования факторов необходимо учитывать число уровней в исследуемой области, которые выбираются с учётом условий задачи и предполагаемых методов планирования эксперимента.

Известно, что если однофакторную зависимость нельзя представить линейными уравнениями, то в многомерном случае будет существенная кривизна. В связи с этим необходимо отметить, что однофакторные зависимости эффективности процесса сепарирования от угла наклона сита, частоты колебаний и угла взаимного расположения дебалансов описываются нелинейными уравнениями. На основании этого было принято решение использовать для исследования процесса вибрационного сепарирования трудно-сыпучих продуктов план второго порядка.

По мнению ряда исследователей при  $k = 5$  наиболее целесообразно использовать, близкий к Д-оптимальному, план Хартли ( $Ha_5$ ), который характеризуется относительно небольшим числом опытов ( $N = 27$ ) и является наилучшим по величине определителя информационной матрицы. Кроме того, Д-оптимальному плану принадлежит наименьший объем эллипсоида рассеяния оценок параметров. Поэтому для исследования процесса вибрационного сепарирования использовали план Хартли второго порядка для пяти факторов.

### Выводы

Обосновано, что при использовании математических методов планирования эксперимента в исследованиях процессов разделения на сепараторах, рабочие органы которых совершают сложное пространственное движение с учетом требований управляемости и однозначности, предъявляемых к факторам, методически целесообразнее применять в качестве управляющего фактора не амплитуду колебаний, а факторы функцией которых является амплитуда.

При оценке взаимосвязи факторов, влияющих на процесс вибрационного сепарирования, получена функциональная зависимость, отражающая влияние основных управляемых независимых переменных на технологическую эффективность и производительность вибрационного сепаратора.

### Литература

1. Адлер О.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / О.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
2. Налимов В.В. Теория эксперимента [Текст] / В.В. Налимов. – М.: Наука, 1971. – 208 с.
3. Петрусов А.И. Зерноперерабатывающие высокочастотные вибрационные машины [Текст] / А.И. Петрусов. – М.: Машиностроение, 1975. – 40 с.

4. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента [Текст] / В.Б. Тихомиров. – М.: Легкая индустрия, 1974. – 262 с.
5. Федоров В.Г. Планирование и реализация экспериментов в пищевой промышленности [Текст] / Пищ. пром-сть, 1980. – 280 с.

УДК 664.743.02:519.876.5

## ЕНЕРГООЩАДНИЙ СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ І ЕФЕКТИВНОСТІ СЕПАРУВАННЯ ВОЛОГОЇ ЗЕРНОВОЇ СУМІШІ

Гапонюк І.І., канд. техн. наук, доцент  
Національний університет харчових технологій, м. Київ

*Із підвищенням вологовмісту зерна зібраного урожаю суттєво погіршується ефективність та продуктивність роботи зерноочисних сепараторів. Розробленим способом змінення пошарового в частинках зернової суміші вологовмісту, впродовж незмінного пошарового градієнта вологи в периферійній шари, можна суттєво покращити сипкість та показники роботи сепаратора.*

*With an increase in the humidity of grain the effectiveness and the productivity of the work of separators considerably deteriorates. By the developed method of change in the layers of the particles of the grain mixture of moisture content it is possible to substantially improve friability and indices of the work of grain separator during constant gradient of moisture content.*

Ключові слова: зерно, домішки зерна, сепаратор, пошаровий вологовміст.

Зерно зібраного урожаю (ЗЗУ) характеризується підвищеним, до (5...8) %, вмістом смітних домішок та перевищенням на (8...10) % критичної вологості зерна, що погіршує його якість, обмежує цільове використання і довготривале зберігання. Нормативною документацією встановлено обмеження до вмісту в ЗЗУ домішок і вологи та встановлено черговість операцій з післязбиральної обробки ЗЗУ. Зокрема, його спочатку слід очищати від різноманітних домішок до базисних кондицій, особливо рослинного походження, а потім сушити до так званого критичного вологовмісту [1, 2]. Вологість домішок рослинного походження, як правило, на 10 % і більше перевищує вологість зерна [3], негативно впливає на стан зберігання й техніко-економічні показники його сушіння та обмежує цільове використання ЗЗУ.

Очищають зерноsumіш різними способами. Проте для більшості з них спільним недоліком є суттєва залежність параметрів роботи сепараторів від вологовмісту зерноsumіші. Так, на кожен відсоток збільшення вологості ЗЗУ, продуктивність сепараторів зменшується на (4...5) %, і за даними зернозаготівельних та машинобудівельних підприємств їх фактична продуктивність з очищення сирого зерна може зменшуватися в 5-6 разів, до (16-18) % від паспортної продуктивності з очищення сухого зерна. Крім цього, погіршується також ефективність очищення ЗЗУ на (25-35) %.

Оскільки за даними Котова, Волошина, Тищенко, Рідного й інших дослідників, режимні та конструктивні напрямки інтенсифікації сепарування вичерпано, то у виробничій діяльності проблему зі зменшенням їх продуктивності вирішують екстенсивним способом, або в більшості випадків – порушенням послідовності технологій очищення і сушіння зерна. Це спричиняє погіршення технології сушіння і стану пожежобезпеки та обумовлює додаткові витрати енергії післязбиральної обробки зерна до (12-20) %.

Одним із напрямків вирішення зазначеної проблеми очищення ЗЗУ підвищеного вологовмісту може бути спосіб короткотривалого покращення її сипкості. Сутність цього способу зводиться до такого. Оскільки на продуктивність і ефективність роботи сепаратора суттєво впливає сипкість зерноsumіші, а її сипкість залежить від вологовмісту компонентів цієї зерноsumіші, то зменшуючи вологовміст лише поверхневих шарів частинок зерноsumіші, можна покращити показники роботи сепаратора впродовж незмінного градієнта пошарового вологовмісту частинок ЗЗУ. Можливість реалізації цього способу ґрунтується на значній уповільненості процесу внутрішнього, по шарах частинок ЗЗУ, перерозподілу вологи та незначній тривалості процесу сепарування. Із відомого коефіцієнта внутрішньої дифузії вологи ( $\alpha_m$ ) [4], для заданої тривалості сепарування і різних зерноsumішей, розрахунковим шляхом встановлювали параметри течії робочих газів конвективного способу вологообміну, щоб забезпечити задане зменшення вологовмісту лише поверхневих шарів частинок ЗЗУ на таку товщину, тривалість перерозподілу вологи між якими перевищує тривалість процесу сепарування ЗЗУ із поправкою на тривалість конвективного вологообміну.