

Рис. Кривая изменения концентрации щелочи в процессе варки волокна

Выводы

В результате математического описания процесса варки льняного волокна в электромагнитном поле сверхвысоких частот получено аналитическое решение, позволяющее:

- контролировать продолжительность варки при заданных условиях;
- строить кривые изменения концентрации щелочи в рабочем растворе в процессе варки волокна в электромагнитном поле сверхвысоких частот.

Библиографический список

1. Вайнштейн Г.А. Справочник по ватному производству / Г.А. Вайнштейн. – М.: Легкая индустрия, 1972. – 325 с.
2. Батунер Л.М. Математические методы в химической технике / Л.М. Батунер, М.Е. Позин. – Л.: Госхимиздат, 1963. – 640 с.
3. Бокштейн Б.С. Диффузия атомов и ионов в твердых телах / Б.С. Бокштейн, А.Б. Ярославцев. – М.: МИСИС, 2005. – 362 с.
4. Лыков А.В. Теплообмен: справочник / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1971 – 560 с.



УДК 631.632.3

**В.И. Подоляко,
Б.Т. Тарасов**

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗДУШНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ПРОБ ЗЕРНА

Ключевые слова: воздушный классификатор, скорость витания зерна, дискретный, непрерывный, метод, теорети-

ческий анализ, сепарирование, полота выделения, коэффициент, ускорение, скорость, дифференциальное уравнение.

Совершенствование процесса воздушной классификации проб зерна является продолжением и развитием применения статического метода к решению задач очистки и сортировки зерна, в основу которого положены идеи академика В.П. Горячкина [1-3].

Для настройки и контроля воздушного сепарирования необходима всесторонняя характеристика технологических свойств исходного зерна и готового продукта. Обобщенным показателем технологических свойств зерна может служить их скорость витания [5].

Из известных способов наибольшее практическое применение получил способ определения скорости витания зерновых частиц с помощью парусных классификаторов ВИМа [4, 5]. Это способ, названный воздушной классификацией, позволяет определять изменчивость аэродинамических свойств зерна в пределах испытываемого образца. Для получения такой изменчивости навеску зерна помещают в канал классификатора и устанавливают скорость воздушного потока такой величины, при которой начинают выноситься самые легкие зерновые частицы. Эту скорость выдерживают постоянной в течение определенного времени [4]. Зерновые частицы, вынесенные в остаточное устройства классификатора, выгружают и взвешивают. Затем увеличивают скорость воздушного потока на определенную величину (классовый интеграл) и снова продувают навеску в течение того же времени. Зерновые частицы, вынесенные в осадочные устройства, так же выгружают и взвешивают и так повторяют до тех пор, пока не вынесется вся зерновая навеска. Результаты взвешивания выносов записываются в вариационный ряд, по которому строят гистограмму, а затем вариационную кривую распределения навески зерна по скоростям витания.

Описанный способ воздушной классификации в последующих выкладках назван дискретным методом классификации (ДМК).

Исследованиями установлено, что время, необходимое для полного выделения каждого класса зерновых культур, находится в пределах 5-8 мин. [4]. Исходя из того, что для построения и обработки вариационных кривых достаточно иметь 9-11 классов, продолжительность ДМК (без учета времени на выгрузку каждого

класса, измерения и установки скоростей воздушного потока и обработки результатов) находится в пределах 45-90 мин. [3]. Полнота выделения классов также зависит от погрешностей измерения и установления скоростей воздушного потока, а величины погрешности зависят от величины классовых интервалов скоростей витания. Если разница в скорости витания легких и тяжелых частиц зерновых культур находится в пределах 3-5 м/с, то величина классового интервала будет равна 0,3-0,5 м/с, что находится в пределах погрешности измерения скорости воздушного потока, применяемыми в сельском хозяйстве средствами [6]. Если бы точность замера скоростей воздушного потока не зависела от величины классового интервала, то получаемая вариационная кривая отличалась бы от истинной тем в меньшей степени, чем на большее число классов разделялась бы навеска зерна. Наибольшее соответствие вариационной кривой действительному распределению будет при увеличении числа классов до бесконечности, что возможно при непрерывном возрастании скорости воздушного потока в процессе классификации. Такой метод в дальнейшем будем называть непрерывным методом классификации (НМК). На рисунке 1 приведены графики изменения скоростей воздушного потока при ДМК и НМК в процессе воздушной классификации. При ДМК скорость воздушного потока изменяется дискретно по зависимости вида (рис. 1 а):

$$V = V_0 + \Delta V n, \quad \text{м/с} \quad (1)$$

где V_0 – начальная скорость воздушного потока, м/с;

ΔV – классовый интервал скорости воздушного потока, м/с;

n – количество классов, на которые делится навеска.

Тогда общая продолжительность процесса пневмокласификации пробы зерна будет равна:

$$t_{\text{ДМК}} = (t_1 + tg)n, \quad \text{мин.} \quad (2)$$

где t_1 – время воздействия воздушного потока на зерновую навеску на каждом классовом интервале, мин.;

tg – дополнительное время, затрачиваемое на выгрузку вынесенного зерна и установку следующего режима воздушного потока, мин.;

n – количество классовых интервалов.

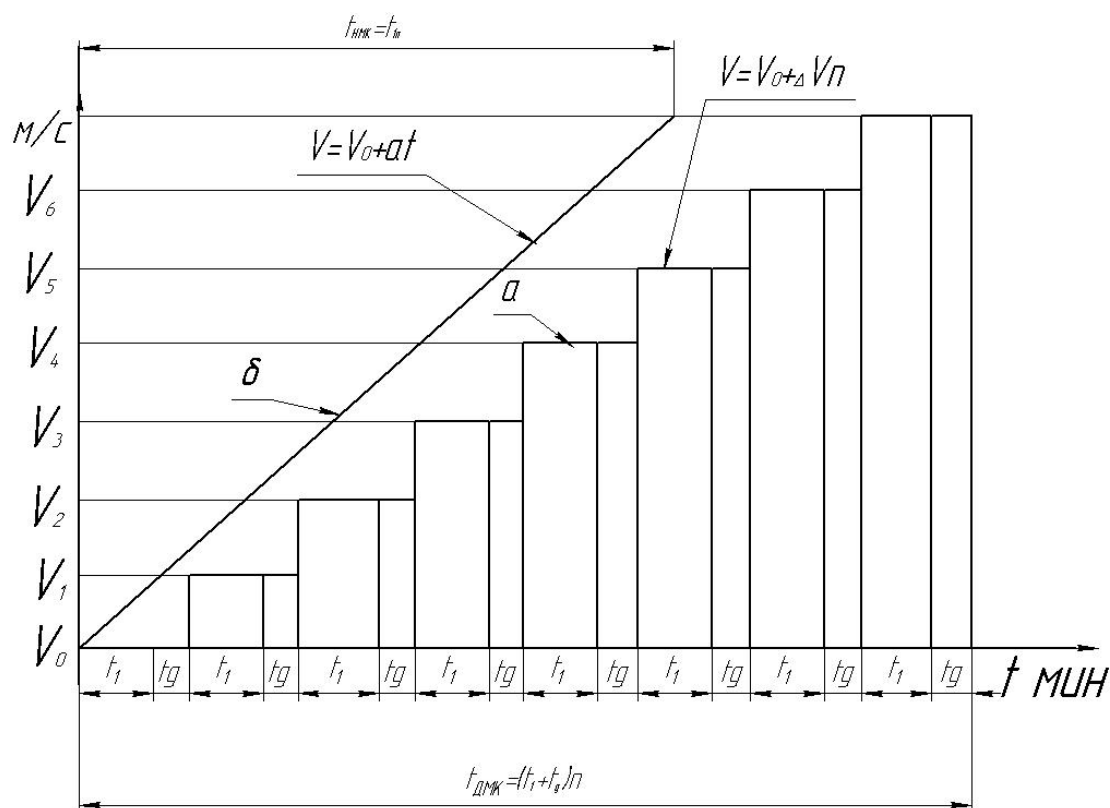


Рис. 1. Графики изменения скорости воздушного потока:

а — при дискретном методе классификации (ДМК) — $V = V_0 + \Delta Vn$,

где V_0 — начальная скорость воздушного потока, м/с;

ΔV — классовой интервал скорости воздушного потока, м/с;

n — количество классов, шт.;

t_d — дополнительное время, с;

б — при непрерывном методе классификации (НМК) — $V = V_0 + at_1$,

где a — ускорение воздушного потока, м/с²;

t_1 — время, определяющее границу i -го класса

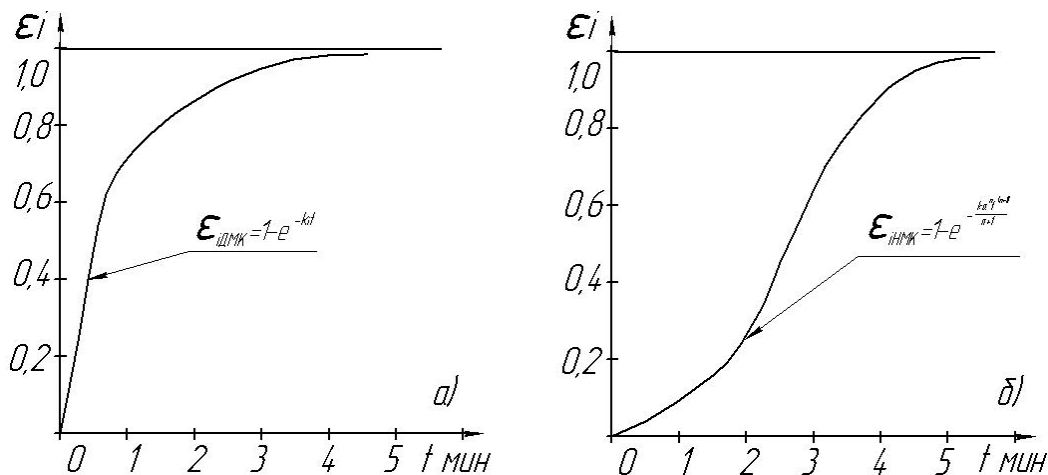


Рис. 2. Полнота выделения зерновых частиц i -го класса:

а — при ДМК $\epsilon_{\text{ДМК}} = 1 - e^{-Ki t}$,

где Ki — коэффициент сепарирования,

t — время сепарирования, с;

б — при НМК $\epsilon_{\text{НМК}} = 1 - e^{-\frac{ka^n t^{n+1}}{n+1}}$,

где a — ускорение воздушного потока, с;

n — коэффициент сепарирования при НМК

При НМК (рис. 1 б) скорость воздушного потока изменяется непрерывно по зависимости вида:

$$V = V_{Bmin} + at_1, \text{ м/с} \quad (3)$$

где V_{Bmin} – минимальная скорость витания частиц навески, м/с;

a – ускорение воздушного потока м/с²;

t_2 – интервал времени для выноса зерновых частиц данного класса, с.

Тогда общая продолжительность процесса пневмокласификации при НМК будет равна:

$$t_{НМК} = t_1 n, \text{ с} \quad (4)$$

где t_1 – время определяющее изменение скорости воздушного потока на классовый интервал, с;

n – количество классовых интервалов.

При НМК в остаточное устройство классификатора зерновые частицы выносятся непрерывно в соответствии их распределению по скоростям витания, а так как скорость воздушного потока возрастает непрерывно, то отпадает необходимость в измерении и установке скоростных режимов для классов. Границы классов при этом методе могут определяться секундомером, для чего необходимо знать закон изменения скорости воздушного потока. Этот метод значительно повысит точность установления границ классов. При НМК следует ожидать снижение неравномерности потока воздуха по сечению канала и повышения ориентирующей способности зерновых частиц за счет ускорения движения потока, что повысит точность распределения зерна по скорости витания и позволит сократить общую продолжительность классификации. Кроме того, НМК значительно упрощает возможность автоматизации всего лабораторного анализа, что позволит использовать этот метод для настройки и контроля процессов пневмосепарирования при поточной технологии обработки зерна.

Для обоснования основных параметров НМК проведем теоретический анализ процесса воздушной классификации навески зерна. Как указывал академик В.П. Горячкин, «...всякая теория, какова она не была, дает по крайней мере основные величины, которые управляют процессом, а последующие опыты дадут указания, в каком направлении должна быть исправлена теория» [1].

Пусть в воздушный классификатор помещена навеска зерна в количестве Q_0 . Зерновые частицы этой навески имеют

скорости витания от V_{smin} до V_{smax} . В момент времени $t = 0$ на зерно начинает действовать вертикальный воздушный поток, скорость которого возрастает линейно по следующей зависимости:

$$V = V_{Bmin} + at, \quad (3)$$

где a – приращение скорости потока воздуха частицах времени, т.е. ускорение воздушного потока, м/с².

В дальнейших выкладках, говоря о зерновых частицах в единицу определенного класса, подразумеваются те частицы, скорость витания которых заключается в интервале от V_B до $V_B + dV_B$.

Как только скорость потока превысит скорость витания частиц i -того класса, так сразу будет происходить их вынос в осадочное устройство. За время dt количество dq_{iB} вынесенных зерен i -того класса будет пропорционально количеству q_i зерен i -того класса, находящихся в навеске в данный момент и интервалу времени dt :

$$dq_{iB} = q_i k_i dt, \quad (5)$$

где k_i – коэффициент воздушного сепарирования частиц i -того класса. Выражая q_i через исходное количество q_{i0} и количество внесенных зерен q_{iB} , дифференциальное уравнение (5) запишем в виде:

$$dq_{iB} = (q_{i0} - q_{iB}) k_i dt. \quad (6)$$

При ДМК $V = \text{const}$ и k_i не зависит от времени. В этом случае, интегрируя уравнение (6), получим

$$q_{iB} = q_{i0} (1 - e^{-k_i t}), \quad (7)$$

а полнота выделения зерен i -того класса определится следующим образом:

$$E_i = \frac{q_{iB}}{q_{i0}} = 1 - e^{-k_i t}, \quad (8)$$

Коэффициент сепарации k_i i -того класса является функцией разности скорости воздушного потока V и скорости витания зерен V_B i -того класса, т.е.

$$k_i = f(V - V_{iB}). \quad (9)$$

На рисунке 2 а приведен график изменения полноты выделения зерновых частиц i -того класса при ДМК. Анализируя график выделения зерновых частиц i -того класса, можно сделать вывод, что при ДМК основная масса зерновых частиц выносятся в первый момент воздействия воздушного потока и возможен вынос зерновых частиц других классов

При НМК скорость воздушного потока определяется управлением (3). Дифференцируя его, получим $dv = a dt$, откуда при $a \neq 0$ получили $dt = \frac{dv}{a}$. Подставляя

это значение в уравнение (6), и с учетом зависимости (9) получим:

$$\frac{dq_{iB}}{dv} = \frac{q_{i0}}{a} f(V - V_{iB}) - \frac{q_{iB}}{a} f(V - V_{iB}), \quad (10)$$

Уравнение (10) является линейным дифференциальным уравнением вида:

$$y' + P(x)y = q(x),$$

где для нашего случая $y = q_{iB}$, $x = v$;

$P(x) = \frac{f(V - V_{iB})}{a}$, $q(x) = \frac{q_{i0}}{a} f(V - V_{iB})$. Общим решением уравнения (10) будет:

$$q_{iB} = e^{-\int_{v_0}^v f(V - V_{iB}) \frac{dv}{a}} \left(\int_{v_0}^v \frac{q_{i0}}{a} e^{\int_{v_0}^v \frac{1}{a} f(V - V_{iB}) dv} dv + c \right). \quad (11)$$

Начальный момент процесса сепарирования наступает при $V_0 = V_{iB}$. В этот момент вынос частиц i -того класса $q_0 = q_{i0} = 0$ и поэтому постоянная интегрирования $c = y_0 = 0$.

Так как при $V = V_{iB}$ выноса частиц нет, то из исходного уравнения (5) следует, что коэффициент сепарации k_i есть функции разности скоростей $V - V_{iB}$, и величину его можно выразить формулой:

$$k_i = f(V - V_{iB}) = k(V - V_{iB})^n, \quad (9)$$

где k и n – коэффициенты, численные значения которых можно определить по экспериментальным данным и в первом приближении можно принять их постоянными величинами.

Используя выражение (9) и вычисляя входящие в уравнение (11) интегралы с учетом начальных условий и при $V \geq V_{iB}$, получим:

$$q_B = \sum q_{iB} = \int_{V_{Bmin}}^{V_B} Q_0 \left[1 - e^{-\frac{k(V - V_0)^{n+1}}{a(n+1)}} \right] \varphi(V_B) d(V_B). \quad (16)$$

Если принять плотность $\varphi(V_B)$, подчиняющуюся нормальному закону распределения по скоростям витания с параметрами M_V и δ_V , то общее количество зерен, выносимых за время t при возрастании скорости потока от V_{Bmin} до V_B равно:

$$q_B = \frac{Q_0}{\sqrt{2\pi}\delta_V} \int_{V_{Bmin}}^{V_B} \left[1 - e^{-\frac{k(V - V_0)^{n+1}}{a(n+1)}} \right] e^{-\frac{(V_B - M_V)^2}{2\delta_V^2}} dV_B. \quad (17)$$

Проанализируем полученные уравнения. При $V = V_{iB}$ из (12) следует, что вынос $q_{iB} = 0$, а из () при $V = V_{Bmin}$ получим $q_B = 0$; при $V = V_{max} \rightarrow \infty$ из (12) получим, $q_{iB} = q_{ic}$ а из (17) при $V \rightarrow \infty$ получим $q_B = Q_0$, что и соответствует физическому смыслу.

Анализ уравнения (17) показывает, что процесс воздушной классификации при НМК зависит от коэффициента пневмосенарирования K , показывает n , учитывающего динамику изменения скорости воздушного потока, ускорение воздушного потока a и численных характеристик M_V и G_V процесса разделения навески по скоростям витания.

Так как интеграл в уравнении (17) не выражается в элементарных функциях, то определение основных параметров НМК (n , k и a) приходится производить по величине выноса зерен данного класса, т.е. по уравнению (12).

$$q_{iB} = q_{i0} \left(1 - e^{-\frac{k(V - V_{iB})^{n+1}}{a(n+1)}} \right). \quad (12)$$

Полнота выделения зерновых частиц i -того класса определится из выражения:

$$E_i = \frac{q_{iB}}{q_{i0}} = \left(1 - e^{-\frac{k(V - V_{iB})^{n+1}}{a(n+1)}} \right). \quad (13)$$

На рисунке 2 б приведен график изменения полноты выделения зерновых частиц i -того класса при НМК. Анализируя график полноты выделения классов при НМК, можно сделать вывод, что вынос зерновых частиц за классовой интервал происходит более равномерно в соответствии со скоростями их витания.

Переходя к переменной $t = \frac{V - V_{iB}}{a}$ в (9), получим уравнение кинетики процесса выноса зерен i -того класса:

$$q_{iB} = q_{i0} \left(1 - e^{-\frac{ka^n t^{n+1}}{n+1}} \right). \quad (14)$$

Общее количество зерновых частиц, выносимых воздушным потоком за время t , равно сумме выносов каждого класса, т.е. $Q_{iB} = \sum q_{iB}$. Если через $\varphi(V_B)$ обозначить плотность распределения зерен по скоростям витания, то в исходной навеске Q_0 масса зерна i -того класса будет равна:

$$q_{i0} = Q_0 \varphi(V_B) dV_B. \quad (15)$$

Подставляя это значение q_{i0} , в уравнение (12) и суммируя выносы зерен всех классов (при $V_B \leq V$), получим общее количество зерен, вынесенное воздушным потоком при увеличении скорости воздуха от V_{Bmin} до V_B

$$q_B = \sum q_{iB} = \int_{V_{Bmin}}^{V_B} Q_0 \left[1 - e^{-\frac{k(V - V_0)^{n+1}}{a(n+1)}} \right] \varphi(V_B) d(V_B). \quad (16)$$

Если принять плотность $\varphi(V_B)$, подчиняющуюся нормальному закону распределения по скоростям витания с параметрами M_V и δ_V , то общее количество зерен, выносимых за время t при возрастании скорости потока от V_{Bmin} до V_B равно:

$$q_B = \frac{Q_0}{\sqrt{2\pi}\delta_V} \int_{V_{Bmin}}^{V_B} \left[1 - e^{-\frac{k(V - V_0)^{n+1}}{a(n+1)}} \right] e^{-\frac{(V_B - M_V)^2}{2\delta_V^2}} dV_B. \quad (17)$$

Проанализируем полученные уравнения. При $V = V_{iB}$ из (12) следует, что вынос $q_{iB} = 0$, а из () при $V = V_{Bmin}$ получим $q_B = 0$; при $V = V_{max} \rightarrow \infty$ из (12) получим, $q_{iB} = q_{ic}$ а из (17) при $V \rightarrow \infty$ получим $q_B = Q_0$, что и соответствует физическому смыслу.

Анализ уравнения (17) показывает, что процесс воздушной классификации при НМК зависит от коэффициента пневмосенарирования K , показывает n , учитывающего динамику изменения скорости воздушного потока, ускорение воздушного потока a и численных характеристик M_V и G_V процесса разделения навески по скоростям витания.

Так как интеграл в уравнении (17) не выражается в элементарных функциях, то определение основных параметров НМК (n , k и a) приходится производить по величине выноса зерен данного класса, т.е. по уравнению (12).

Показатель n можно определить из отношения величин экспериментальных интенсивностей сепарации зерна двух классов (обозначенных индексами 1 и 2), т.е. по величинам

$$Q'_{1B} = \frac{dq_{1B}}{dt} \text{ и } Q'_{2B} = \frac{dq_{2B}}{dt}.$$

Используя выражение (5) с учетом зависимости (9), беря отношение интенсивностей Q'_{1B} и Q'_{2B} после логарифмирования получим:

$$n = \lg \frac{Q'_{1B}(V-V_{2B})}{Q'_{2B}(V-V_{1B})}. \quad (18)$$

Вычислив величину показателя n по уравнению (18), можно определить по уравнениям (12) или (13) величину показателя k , зная из условий опыта величину ускорения воздушного потока a .

С увеличением ускорения a снизится общее время анализа зерновой навески, но возрастет его погрешность. Поэтому величина a не должна превышать допустимую. Значение допустимой величины ускорения потока можно выбрать исходя из приемлемой величины отклонения вариационной кривой распределение зерна по скоростям витания, полученных при ДМК и НМК. Степень этого отклонения можно характеризовать величиной отклонения полоты выделения зерен одного и того же класса при ДМК и НМК:

$$\alpha = \frac{E_{\text{НМК}}}{E_{\text{ДМК}}}. \quad (19)$$

Выразив из (19) полноту выделения $E_{\text{НМК}}$ и используя уравнение (13), после преобразований получим выражение для определения величины допустимого ускорения воздушного потока:

$$a_g = \frac{k(V-V_{1B})^{n+1}}{(n+1)E_{\text{ДМК}}^{1-\alpha E_{\text{ДМК}}}}. \quad (20)$$



Выводы

1. На основании теоретического анализа процесса воздушной классификации проб зерна получены уравнения, позволяющие определить основные параметры непрерывного метода классификации проб зерна: n , k и a .

2. Непрерывный метод классификации позволит уменьшить продолжительность и трудоемкость лабораторного анализа проб зерна, повысить точность установления границ классов по скоростям витания частиц и упрощает возможность автоматизации процесса классификации, что позволяет использовать этот метод для настройки и контроля воздушного сепарирования при почтовой технологии обработки зерна.

Библиографический список

1. Горячкин В.П. Собрание сочинений / В.П. Горячкин. – М.: Колос, 1965. – Т. 1.
2. Горячкин В.П. Собрание сочинений / В.П. Горячкин. – М.: Колос, 1965. – Т. 3.
3. Летошнев М.Н. Применение вариационной статистики к задачам сепарирования сыпучего тела / М.Н. Летошнев // Труды Московского дома ученых. – Вып. 2. Изд-во АН СССР, 1937.
4. Тиц З.Л. Исследование работы порционного парусного классификатора / З.Л. Тиц // Механизации и электрификации социалистического сельского хозяйства. – 1936. – № 6. – С. 31-34.
5. Тиц З.Л. Машины для после уборочной поточной обработки семян / З.Л. Тиц и др. – М.: Машиностроение, 1967. – С. 88.
6. Турбин Б.Г. Вентиляторы сельхоз хозяйственных машин / Б.Г. Турбин. – М.; Л., 1968.