

ANALIZA STANÓW NIERÓWNOWAGOWYCH W PROCESIE SEPARACJI SITOWEJ

ANALYSIS OF NONEQUILIBRIUM STATES IN THE SIEVE SEPARATION PROCESS

Proces separacji sitowej można potraktować jako pewnego rodzaju doświadczenie losowe, w którym to czy cząstka (o wielkości mniejszej od wielkości separacyjnej sita) w danym miejscu na sicie przejdzie przez jego szczelinę określamy za pomocą prawdopodobieństwa. Inaczej można powiedzieć, że podczas klasycznej separacji sitowej istnieją obszary na sicie, dla których prawdopodobieństwo separacji jest większe, no i obszary z mniejszą miarą prawdopodobieństwa. Jeśli założymy, że proces separacji przebiega stabilnie w aspekcie czynników zewnętrznych, to można powiedzieć, że wartości wspomnianych prawdopodobieństw w danych obszarach nie ulegają zasadniczym zmianom. Niewielkie odchylenia od wartości średnich nazywamy fluktuacjami i są one zjawiskiem zupełnie normalnym. Jednakże, jeśli warunki zewnętrzne (np. zmiana składu granulometrycznego nadawy, zmiana kąta nachylenia powierzchni sita itp.) ulegną zmianie, to zmienić się powinna również konfiguracja opisanych wyżej prawdopodobieństw.

Słowa kluczowe: proces separacji, sito żaluzjowe, materia granulowana.

The process of sieve separation might be treated as some kind of random experience, in which the fact that a particle (of a size smaller than the sieve separation size) will pass through its slot in a given place, is to be determined by probability. It could be alternatively said that during classic sieve separation, there are areas at the sieve for which the probability of separation is higher and, in consequence, areas with the lower probability measure. If we assume that the separation process runs stable in regard of the external conditions, then we could say that values of the mentioned probabilities in given areas are not varying significantly. Relatively small deviations from average values are called fluctuations, and are considered to be perfectly normal. However, when the external conditions (e.g. a change in the granulometric composition of a mechanically fed material, a change in the sieve inclination, etc.) are changing, then the configuration of the above mentioned probabilities should also change.

Keywords: process of separation, slotted sieve, granulated matter.

1. Wprowadzenie

Separacja materiałów granulowanych jest jednym z podstawowych procesów występujących w przemyśle: górnictwym, farmaceutycznym, chemicznym, rolno-spożywczym i wielu innych. Proces separacji dotyczy materii granulowanej składającej się z co najmniej dwóch zbiorów cząstek zróżnicowanych geometrycznie. Procesy separacji możemy generalnie podzielić na proste i złożone. W pierwszym przypadku mamy do czynienia z rozdzieleniem mieszaniny na dwie frakcje na jednej płaszczyźnie sitowej. W separacji złożonej liczba płaszczyzn separacyjnych jest większa, a proces separacyjny może być realizowany w układzie szeregowym, równoległym lub mieszanym [2].

W literaturze przedmiotu podejmowano wiele prób ujęcia procesu separacyjnego w ramy matematyczne [5, 6, 7, 8]. Najczęściej stosowany jest deterministyczny opis układu sito-cząstka, gdzie analizuje się współzależność częstości drgań sita i jego amplitudy na ruch cząstki na powierzchni sita. Ten stosunkowo prosty sposób odwzorowania procesu został niezwykle mocno rozwinięty i szeroko stosowany w podczas konstruowania ustrojów separacyjnych [13, 14]. Niedostatek wiedzy dla takiego modelu uzupełniano w kolejnych pozycjach książkowych danymi empirycznymi w postaci różnego rodzaju nomogramów, które w praktyce inżynierskiej są niezwykle użyteczne.

Można sobie w tym momencie zadać proste pytanie: czy możliwy jest inny sposób opisu materii granulowanej poddanej separacji na sicie? Jeśli wyjdziemy od natury procesu separa-

1. Introduction

Separation of granulated materials is one of the basic processes performed in industries such as: mining, pharmaceutical, chemical, food and agriculture, and many others. The process of separation concerns granulated matter composed of at least two particle sets varying geometrically. In general, the separation processes could be divided to simple and complex ones. In the first case we are dealing with dividing a mixture into two fractions at one sieve plane. In complex separation the number of separation planes is higher and the process of separation may be conducted in the series, parallel or mixed arrangements [2].

Numerous attempts of defining the separation process mathematically have been undertaken in the subject bibliography [5,6,7,8]. Most frequently a deterministic description of the sieve-particle system is applied, where the correlation of sieve vibration frequency and its amplitude at the move of a particle at the sieve surface is analysed. That relatively simple method of a process representation has been extensively developed and widely used in designing of separation structures [13,14]. Lack of knowledge for such a model was supplemented in the subsequent publications with empiric data in the form of various nomograms, extremely useful in the engineering practice.

A simple question could be asked at that time: is another description of granulated matter being separated at sieve possible? If we consider the nature of a separation process, then we easily state that attempts of deterministic generalization will

cyjnego, to łatwo stwierdzimy, że próby deterministycznego uogólnienia nigdy nie dadzą możliwie dokładnego opisu. Separacja, podobnie jak rzut kostką do gry, jest klasycznym przykładem doświadczenia losowego, a jego wynik możemy uznać za realizację zmiennej losowej. Losowość analizowanego procesu powinna nas skłonić do poszukiwania opisu, który odejdzie od determinizmu, co słusznie podkreśla D. Dudek w pracy [1].

Proces separacyjny w danej chwili czasu t możemy w sposób makroskopowy scharakteryzować poprzez podanie kilku parametrów, wśród których najważniejszymi są czystość oraz straty frakcji podsitowej. Wartość tych parametrów jest ściśle skorelowana z warunkami zewnętrznymi procesu. Jeśli spojrzymy na proces poprzez pryzmat statystyczny, to stan procesu w danej chwili czasu t jest odwzorowany poprzez konfigurację zdarzeń na sicie polegających na separacji cząstek. Probabilistyczna interpretacja takiego stanu rzeczy w odniesieniu do pojedynczej cząstki znajdującej się na sicie pozwala nam dostrzec proces w skali „mikro”. Można tu dostrzec analogię do gazu, dla którego stan makroskopowy opisany za pomocą pewnych parametrów (ciśnienie, objętość) można odwzorować poprzez mikroskopową analizę ruchu pojedynczych cząstek. W niniejszym artykule podjęto próbę przeanalizowania stanu procesu separacyjnego w układzie nierównowagowym, gdy przynajmniej jeden z istotnych czynników zewnętrznych ulega zmianie. Do analizy wykorzystano entropię statystyczną, jako funkcję stanu procesu.

2. Wprowadzenie do teorii pól losowych

W klasycznej teorii rachunku prawdopodobieństwa zajmujemy się badaniem zmiennych losowych X , to znaczy takich funkcji, które przyporządkowują zdarzeniom elementarnym $\omega \in \Omega$ układ n liczb $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$. Inaczej można powiedzieć, że realizacjami zmiennej losowej X są układy n liczb.

Często rozważa się zmienną losową $X(t)$, gdzie t jest pewnym parametrem jedno lub wielowymiarowym. Rozważa się więc pewnego rodzaju funkcje losowe $X(t)$, $t \in T$, gdzie T jest zbiorem wartości parametru t . Opisuje się w ten sposób przebieg pewnego procesu losowego (docelowo separacyjnego) przyjmującego wartości w R^n . Funkcja $X(t)$ będzie w dalszym toku określana mianem funkcji losowej. W przypadku szczególnym, jeśli $X(t)$ przyjmuje wartości z R^1 i $t \in R^1$, to taka funkcja opisuje proces stochastyczny. Jeśli zaś $X(t)$ przyjmuje wartości z R^1 , a $t \in R^n$, to funkcja losowa nosi nazwę pola losowego n -wymiarowego [16, 17].

Proces stochastyczny (pole losowe) możemy również zdefiniować jako funkcję określoną na przestrzeni zdarzeń elementarnych, której wartościami są funkcje rzeczywiste zmiennej rzeczywistej, to znaczy $X(t) = X(\omega, t)$. Dla ustalonej wartości t_0 wartość procesu (pola losowego) $X(\omega, t_0)$ jest zmienną losową. Realizacją procesu stochastycznego (pola losowego) nazywamy wartość $X(\omega_0, t)$ procesu dla ustalonego zdarzenia elementarnego $\omega_0 \in \Omega$.

Wartości parametru t mogą mieć charakter ciągły lub dyskretny. W przypadku wartości dyskretnych proces $X(t)$ nazywany bywa w literaturze łańcuchem stochastycznym.

3. Pojęcie wektora losowego

Niech będzie dana przestrzeń probabilistyczna (Ω, A, P) . Wektorem losowym lub n -wymiarową zmienną losową nazywamy funkcję:

never give a possibly exact description. Separation, similarly as a cube throw, is a classic example of a random experience, and its result may be considered as realisation of a random variable. Randomness of the analyzed process should direct us for seeking a description, which will depart from determinism, as justly stressed by D. Dudek in work [1].

In a given moment in time t the separation process may be characterised macroscopically by providing several parameters, where the most important among them are purity and loss in the sub-sieve fraction. Value of these parameters is tightly correlated with external conditions of the process. If we look at the process statistically, then the state of the process at a given instant t is represented by configuration of events at a sieve consisting in particle separation. Probabilistic interpretation of such a status in relation to a single particle at a sieve enables us to see the process in the „micro” scale. An analogy to gas can be seen here, for which the macroscopic state described using certain parameters (pressure, volume) may be represented through microscopic analysis of single particles move. In the article, an attempt of analyzing the separation process in the nonequilibrium state was undertaken, when at least one of the essential external conditions is changing. Statistical entropy as a function of the process state has been used for analysis.

2. Introduction into the random field theory

In the classical theory of probability we study random variables X , i.e. such functions, which assign the elementary event $\omega \in \Omega$ with a system of n numbers $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$. In other words, we can say that the realizations of random variable X are systems of n numbers.

Frequently a random variable $X(t)$ is being considered, where t is a certain one- or multidimensional parameter. Thus, random functions of a certain type $X(t)$, $t \in T$ are considered, where T is a set of the t parameter values. That way a course of certain random process (separation) assuming values within R^n is being described. The $X(t)$ function will be called further a random function. In the particular case, if $X(t)$ assumes values from R^1 and $t \in R^1$, then such function defines a stochastic process. However, if $X(t)$ assumes values from R^1 , and $t \in R^n$, then the random function is called a random n -dimension field [16, 17].

Stochastic process (random field) may also be defined as a function determined at the elementary event space, the values of which are real-valued functions of the real variable, that means $X(t) = X(\omega, t)$. For the fixed value t_0 the value of process (random field) $X(\omega, t_0)$ is a random variable. Realization of a stochastic process (random field) is the value $X(\omega_0, t)$ of a process for the fixed elementary event $\omega_0 \in \Omega$.

Values of the t parameter may be continuous or discrete in character. In case of discrete values the process $X(t)$ is frequently being called in publications a stochastic chain.

3. A concept of random vector

Let be given the probabilistic space (Ω, A, P) . A random vector, or the n -dimensional random variable is a function:

$$X: \Omega \rightarrow R^n, \quad n \geq 2 \quad (1)$$

Tak zdefiniowany wektor losowy można również zapisać w postaci ciągu n jednowymiarowych zmiennych losowych:

$$X_i: \Omega \rightarrow R, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

które spełniają dla każdego zdarzenia elementarnego $\omega \in \Omega$ warunek:

$$X_i(\omega) = x_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

Zmienne losowe X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) nazywa się składowymi wektora losowego. Rozkład wektora losowego jest łącznym rozkładem jego zmiennych losowych X_i , natomiast rozkłady poszczególnych jego składowych są określane mianem rozkładów brzegowych [4].

4. Entropia

Przyjmijmy, że mamy do czynienia z dyskretnym i skończonym układem prawdopodobieństw p_i , gdzie indeks $i = 1, 2, \dots, n$. Miarę niepewności rozkładu oznaczmy przez $S_n(p_1, p_2, \dots, p_n)$. Załóżmy przede wszystkim, że jest to funkcja ciągła. Jeżeli wszystkie wielkości p_i , z wyjątkiem jednej, są równe zero, wtedy nie mamy żadnej niepewności i wówczas:

$$S_n(1, 0, \dots, 0) = S_n(0, 1, \dots, 0) = \dots = S_n(0, 0, \dots, 1) = 0 \quad (4)$$

W szczególności, w warunkach najmniej określonych, gdy wszystkie prawdopodobieństwa są identyczne, niepewność jest maksymalna:

$$S_n(p_1, p_2, \dots, p_n) \leq S_n\left(\frac{1}{n}, \frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n}\right) \equiv S_{\max}(n) \quad (5)$$

Opisane wyżej niektóre własności pozwalają jednoznacznie określić postać funkcji niepewności rozkładu:

$$S_n(p_1, p_2, \dots, p_n) = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \quad (6)$$

z dokładnością do ogólnej multiplikatywnej stałej, którą możemy ukryć pod postacią podstawy logarytmu. Wielkość S_n (6) zapisana jest w literaturze pod nazwą twierdzenia Shannona i nosi nazwę entropii informacyjnej [12,15]. Wyraża ona ilościowo niepewność jaka zawarta jest w rozkładzie prawdopodobieństwa p_i .

5. Stan procesu separacyjnego

Proces separacji możemy potraktować jako doświadczenie losowe, którego celem jest „wylosowanie” cząstek mniejszych od wielkości podziałowej sita (wielkość oczka sitowego, szczeliny sita w sitach żaluzjowych) z mieszaniny ziarnistej. Na powierzchni sita możemy zdefiniować dwuwymiarową zmienną losową, która będzie związana z ilością „wylosowanych” cząstek w danym miejscu na sicie. Tak określoną zmienną losową możemy przedstawić w postaci wektora losowego:

$$(X, Y): \Omega \rightarrow R^2 \quad (7)$$

gdzie: (X, Y) wektor losowy związany z realizacją procesu separacyjnego odpowiednio na długości sita (X) i jego szerokości (Y). Graficznie postać takiego wektora losowego przedstawiono na rys. 1.

$$X: \Omega \rightarrow R^n, \quad n \geq 2 \quad (1)$$

A random vector defined that way may also be written in a form of a sequence of n one-dimensional random variables:

$$X_i: \Omega \rightarrow R, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

fulfilling for each elementary event $\omega \in \Omega$ the condition:

$$X_i(\omega) = x_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

Random variables X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) are called components of a random vector. Decomposition of a random vector is a joint decomposition of its random variables X_i , and decompositions of its particular components are called the marginal distributions [4].

4. Entropy

Let's assume that we deal with discrete and finite system of probabilities p_i , where the index $i = 1, 2, \dots, n$. Let's mark the measure of decomposition uncertainty by $S_n(p_1, p_2, \dots, p_n)$. But first of all, let's assume that this is a continuous function. If all quantities p_i , except for the one, are equal zero, then we have no uncertainty and then:

$$S_n(1, 0, \dots, 0) = S_n(0, 1, \dots, 0) = \dots = S_n(0, 0, \dots, 1) = 0 \quad (4)$$

In particular, in the least determined conditions, when all probabilities are identical, the uncertainty assumes the maximum value:

$$S_n(p_1, p_2, \dots, p_n) \leq S_n\left(\frac{1}{n}, \frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n}\right) \equiv S_{\max}(n) \quad (5)$$

Some of the properties described above enable unequivocal determination of the distribution uncertainty function form:

$$S_n(p_1, p_2, \dots, p_n) = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \quad (6)$$

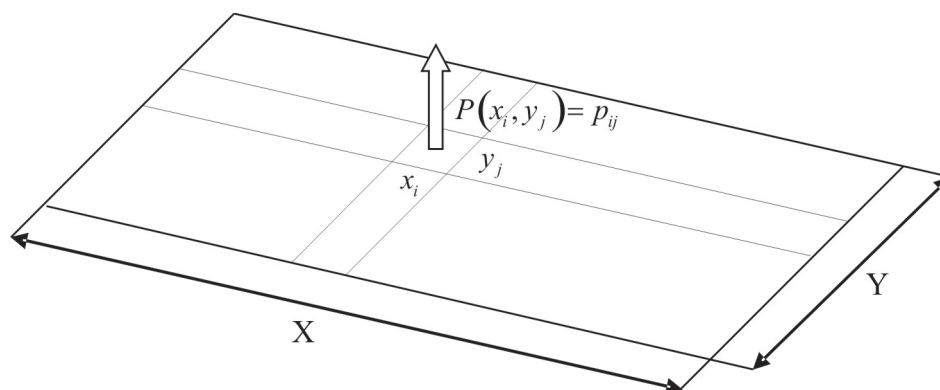
with the accuracy to the general multiplicative constant, which could be hidden under the form of a radix. The quantity S_n (6) has been recorded in the literature as the Shannon theorem, and is named the information entropy [12,15]. It expresses quantitatively the uncertainty contained in the probability distribution p_i .

5. Separation process state

A separation process might be treated as random experience, the aim of which is „sampling” of particles smaller than the sieve scale (size of a sieve mesh, a gap in the blade sieves) from a grained mixture. At a sieve surface we can define a two-dimensional random variable, to be related to the number of „sampled” particles in a given sieve location. A random variable determined that way may be presented in the form of a random vector:

$$(X, Y): \Omega \rightarrow R^2 \quad (7)$$

where: (X, Y) a random vector related to accomplishing the separation process at the sieve length (X) and its width (Y). Graphic form of such random vector is presented in fig. 1.



Rys. 1. Wektor losowy na sicie związany z prawdopodobieństwem $P(x_i, y_j) = p_{ij}$ separacji cząstek na powierzchni opisanej współrzędnymi (x_i, y_j)
 Fig. 1. Random vector at sieve related to probability $P(x_i, y_j) = p_{ij}$ of separating particles at surface defined by co-ordinates (x_i, y_j)

Stan procesu separacyjnego w danej chwili czasu t możemy opisać za pomocą rozkładu wektora losowego zmiennej losowej (X, Y) . Pojawia się jednak pewna trudność. Jeśli dwuwymiarowa zmienna losowa ma charakter dyskretny, to taki opis sprowadza się do tablicy wartości p_{ij} o wymiarze $X \times Y$. W przypadku dwuwymiarowej zmiennej losowej ciągłej sprawa komplikuje się jeszcze bardziej, ponieważ łączną wartość prawdopodobieństwa możemy opisać za pomocą dwuwymiarowej funkcji gęstości prawdopodobieństwa $f(x, y)$. Z uwagi na zmieniające się warunki realizacji procesu parametry takiej funkcji są wartościami chwilowymi (zmieniającymi się w czasie).

Stan procesu separacyjnego możemy wyrazić w prostszy sposób poprzez wyznaczenie miary entropii informacyjnej Shannona, która agreguje wartości łącznego prawdopodobieństwa dwuwymiarowej zmiennej losowej. W przypadku procesu separacji wygodnie jest przyjąć, że mamy do czynienia ze zmienną losową dwuwymiarową dyskretną. Ma to też uzasadnienie fizyczne – separowane cząstki mają skończone wielkości ziaren, stąd nie ma potrzeby przechodzenia w granicy do przedziału separacyjnego o szerokości nieskończonej. Entropia dla tak określonej dwuwymiarowej zmiennej losowej (7) może być zapisana w postaci formuły:

$$S = -\sum_i \sum_j p_{ij} \log p_{ij} \quad (8)$$

Maksymalna wartość entropii odpowiada stanowi, w którym wartość prawdopodobieństwa separacji cząstek w każdym miejscu na powierzchni sita jest jednakowa. Zróżnicowanie prawdopodobieństw skutkuje zmniejszeniem wartości entropii i w granicy $S = 0$ jeśli tylko w jednym miejscu na sicie $p_{ij} = 1$. Oczywiście i jeden i drugi z opisanych przypadków w praktyce nie mają miejsca z uwagi na mnogość czynników, które mają wpływ na rozkład prawdopodobieństwa separacyjnego.

W mechanice statystycznej z procesami równowagowymi mamy do czynienia wówczas gdy spełnione jest równanie różniczkowe:

$$\frac{dS}{dt} = 0 \quad (9)$$

Inaczej mówiąc zmiana wartości entropii (8) w odniesieniu do zmiany czasu określa zmianę stanu procesu separacyjnego. Procesy o charakterze równowagowym są tylko i wyłącznie treścią niniejszej teorii, w praktyce czynniki zewnętrzne

State of a separation process in the instant t may be described by random vector decomposition of the random variable (X, Y) . However, a difficulty arises here. If a two-dimensional random variable is discrete in its character, then such description is brought to a table of p_{ij} values of the $X \times Y$ size. In case of a continuous random variable the issue is even more complicated, as the total value of probability may be described by a two-dimensional probability density function $f(x, y)$. Considering the changing conditions of the process the parameters of such function are the instantaneous values (changing in time).

A state of separation process may be expressed in a simpler way by determining the measure of the Shannon information entropy, aggregating the values of total probability of a two-dimensional random variable. In case of a separation process it is comfortable to assume that we deal with a discrete two-dimensional random variable. It has also physical justification – the separated particles have finite grain sizes, thus there is no need to pass in the limit to a separation range of unlimited width. Entropy for such defined two-dimension random variable (7) may be written in the form of:

$$S = -\sum_i \sum_j p_{ij} \log p_{ij} \quad (8)$$

Maximum entropy value correspond to a state, in which the value of particles separation probability is equal for each location of the sieve surface. Differentiation in probabilities results in drop in the entropy value, and at the limit $S = 0$, if only in one sieve location $p_{ij} = 1$. Of course, the first and the second of the discussed cases have no place in practice, as there is a set of factors influencing the separation probability distribution.

In the statistical mechanics we encounter the equilibrium processes when the differential equation is fulfilled:

$$\frac{dS}{dt} = 0 \quad (9)$$

In other words, entropy value change (8) in relation to time change determines a state change in the separation process. That theory deals exclusively with equilibrium type processes,

wpływają na przebieg procesu separacji i zaburzają wspomnianą równowagę.

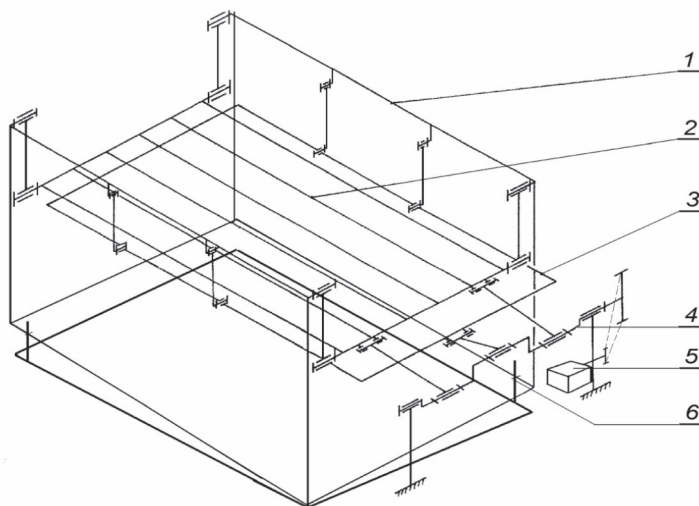
6. Analiza stanów nierównowagowych w warunkach zmiany kąta nachylenia sita

Kąty nachylenia powierzchni (wzdłużny i poprzeczny do kierunku ruchu separowanych cząstek) sita są jednym z tych czynników, które decydują o przebiegu procesu separacji i o jego jakości. Zmiany wartości tych kątów wpływają na stan procesu, który możemy określić za pomocą miary entropii statystycznej.

Do analizy doświadczalnej przebiegu procesu rozdzielenia mieszaniny ziarnowej wykorzystano stanowisko pomiarowe (rys. 2). Główną częścią składową wymienionego stanowiska jest sito żaluzjowe. Sito wyposażone jest w mechanizm regulacyjny ustawienie kąta pochylenia żaluzji, dzięki czemu uzyskuje się szczelinę roboczą sita w zakresie od 0 do 8 mm. Konstrukcja kosza sitowego umożliwia ustawienie kąta nachylenia poprzecznego i wzdłużnego powierzchni sita w granicach 0 - 15°.

Stanowisko badawcze umożliwiło symulację pracy sita w różnych warunkach (oznaczenia kątów roboczych: α - kąt nachylenia poprzecznego sita, β - kąt nachylenia wzdłużnego sita):

- $\alpha=0^\circ, \beta=0^\circ$ - sito w poziomie,
- $\alpha=5^\circ, 10^\circ$ i $15^\circ, \beta=0^\circ$ - nachylenie poprzeczne $5^\circ, 10^\circ$ i 15° ,
- $\alpha=0^\circ, \beta=5^\circ, 10^\circ$ i 15° - nachylenie wzdłużne $5^\circ, 10^\circ$ i 15° .



Rys. 2. Schemat kinematyczny stanowiska badawczego: 1 – układ zawieszenia, 2 – sito, 3 – przeciwwaga, 4 – wał napędowy, 5 – silnik elektryczny, 6 – słupek ustalający kąt ustawienia ramy [5]

Fig. 2. Kinematic diagram of the test stand: 1 – suspension system, 2 – sieve, 3 – counterbalance, 4 – drive shaft, 5 – electrical motor, 6 – a post fixing the frame inclination angle [5]

as in practice the external factors influence the separation process course and disturb the mentioned equilibrium.

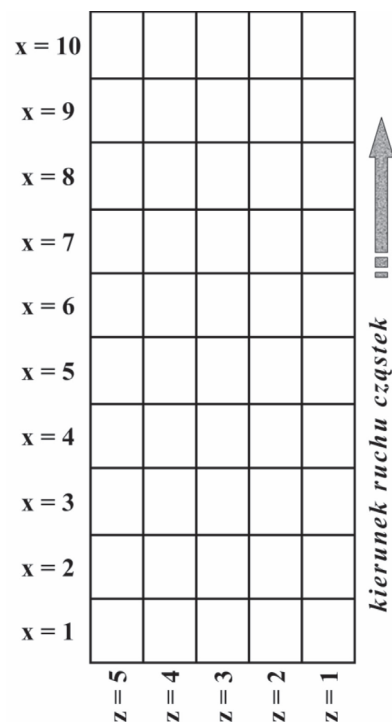
6. Analysis of nonequilibrium states in the variable sieve inclination angle conditions

Sieve surface inclination angles (longitudinal and transverse to the separated particles move direction) are one of those factors, which decide on the separation process run and on its quality. Changes in the angle value influence the process state, which can be determined by the measure of statistical entropy.

For the experimental analysis of grain mixture separation process a measurement stand was used (fig. 2). Main part of the mentioned stand is a blade sieve. It is equipped with adjustment mechanism for blade inclination angle change, due to which a working slot width within 0 to 8 mm range is achieved. Structure of the sieve basket enables adjustment of the longitudinal and transverse sieve surface inclination angle within the range of 0 - 15°.

Research stand enabled simulation of the sieve operation in various conditions (working angle markings: α - transverse sieve inclination angle, β - longitudinal sieve inclination angle):

- $\alpha=0^\circ, \beta=0^\circ$ - sieve levelled,
- $\alpha=5^\circ, 10^\circ$ i $15^\circ, \beta=0^\circ$ - transverse inclination $5^\circ, 10^\circ$ and 15° ,
- $\alpha=0^\circ, \beta=5^\circ, 10^\circ$ i 15° - longitudinal inclination $5^\circ, 10^\circ$ and 15° .



Rys. 3. Sposób podziału (i oznaczeń) sekcyjnego elementu dyskretnego na strefy pomiarowe

Fig. 3. Partition (and markings) of the sectional discrete element into measurement zones

Do napędu zespołu wykorzystano silnik elektryczny, którego prędkość obrotowa była sterowana bezstopniowo za pomocą przebiegu częstotliwości. Dało to możliwość precyzyjnego doboru parametrów kinematycznych elementów czynnych zespołu.

Podczas wykonywania prób zmieniano ustawienia kątów nachylenia powierzchni sita α , β oraz dokonywano pomiaru masy przesianej w określonych strefach pomiarowych (3) oraz prowadzono pomiar czasu trwania procesu t . Podstawowy przyrząd pomiarowy stanowiła waga laboratoryjna o wysokiej klasie dokładności. Wszystkie pomiary wykonano przy stałym (optymalnym dla danego materiału) otwarciu żaluzji sitowych oraz ustalonych kinematycznych warunkach pracy całego zespołu czyszczącego [3, 5, 9, 10, 11].

Aby uniezależnić się od czynników niekontrolowanych (zmienna wilgotność materiału czyszczonego w czasie trwania badań, różny stopień zanieczyszczeń zmieniający się zgodnie z pewnym gradientem) przyjęto układ eksperymentu całkowicie stochastyczny, w którym o kolejności pomiarów (dla poszczególnych ustawień kątów) zdecydował generator liczb losowych.

7. Wyniki badań. Dyskusja

Badania przeprowadzono na materiale biologicznym (ziarno zbóż), w każdym przypadku zmiany nachylenia zespołu czyszczącego mierzono masę separowanych cząstek w 50 punktach pomiarowych pod sitem (rys. 3). Uzyskane wyniki posłużyły do estymacji prawdopodobieństwa realizacji procesu w punktach pomiarowych (estymacja w oparciu o wartość częstości). Obliczone wartości prawdopodobieństw dla poszczególnych kątów nachylenia zespołu czyszczącego wykorzystano do wyznaczenia parametru stanu procesu – entropii (wg zależności 8). Wyniki badań zestawiono w tabeli 1.

Graficzną ilustrację otrzymanych wartości entropii przedstawiono na rys. 4. Łatwo zauważyć, że wartość entropii ściśle koresponduje ze zmianami kąta nachylenia kosza sitowego. Największy spadek wartości entropii następuje dla nachyleń powyżej 10° . W takim przypadku mamy również do czynienia z dużymi stratami cząstek, których wymiary są mniejsze niż wymiar separacyjny sita.

Dla kątów nachylenia poprzecznego 0° oraz $2,5^\circ$ widoczny jest wzrost wartości entropii przy wzroście kąta nachylenia wzdłużnego do 5° . Taki wynik potwierdza wzrost skuteczności zespołu czyszczącego przy takich wartościach kątów nachylenia poprzecznego (są to zazwyczaj wartości kątów przyjętych podczas konstruowania zespołu czyszczącego).

An electrical motor was used for the assembly driving, the rotational speed of which was controlled step-less, using the frequency converter. It enabled precise selection of kinematic parameters for the active parts of the system.

During tests the α , β sieve surface inclination angles were changed, measurements of sieved mass in the defined measurement zones were performed (3), and the process duration time t was measured. Basic measuring instrument was a laboratory weight of a high accuracy class. All measurements were made at the constant (optimal for a given material) blade opening and fixed kinematic operation conditions for the whole purifying assembly [3, 5, 9, 10, 11].

In order to eliminate the influence of uncontrolled factors (variable humidity of the cleaned material during tests, various degree of impurities changing according to a certain gradient), a fully stochastic experiment arrangement was adopted, in which a random number generator determined the sequence of measurements (for particular inclination angles).

7. Test results. Discussion

The tests were performed at biological material (corn grains), where in each case of the purifying assembly inclination a mass of the separated particles was measured in 50 measuring locations under the sieve (fig. 3). The results obtained were used for estimating probability of the process accomplishment in the measurement locations (estimation based at the frequency value). The calculated probability values for various inclination angles of the purifying system were used for determining the process state parameter – the entropy (according to relationship 8). The test results have been presented in table 1.

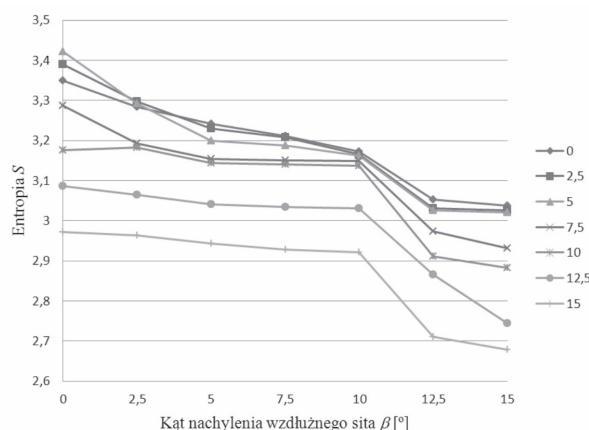
Graphic illustration of the obtained entropy values is presented in fig. 4. It is easy to observe that entropy is tightly related to changes in inclination angles of the sieve basket. The highest drop in entropy value takes place for inclinations above 10° . In such a case we also encounter high particle losses, the size of which is smaller than the sieve separation size.

For the transverse inclination angles equal to 0° and $2,5^\circ$ an increase in entropy value is visible at an increase of the longitudinal inclination angle to 5° . Such result confirms an increase in effectiveness of the purifying assembly at these transverse inclination angles (usually they are angles assumed at the stage of designing the purifying assembly).

Tab. 1. Wartości entropii Shannona dla procesu separacji zdeteminowanego kątami nachylenia zespołu czyszczącego

Tab. 1. The Shannon entropy values for separation processs determined by the purifying assembly inclination angles

Angle α [°] \ Angle β [°]	0,0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
0,0	3,350	3,284	3,241	3,211	3,172	3,053	3,038
2,5	3,389	3,297	3,230	3,208	3,165	3,031	3,025
5,0	3,421	3,292	3,200	3,187	3,163	3,026	3,020
7,5	3,287	3,192	3,154	3,151	3,148	2,974	2,932
10,0	3,176	3,183	3,143	3,141	3,137	2,911	2,883
12,5	3,087	3,065	3,041	3,034	3,031	2,865	2,745
15,0	2,972	2,963	2,943	2,928	2,922	2,711	2,679



Rys. 4. Wartości entropii Shannona dla różnych wartości kątów nachylenia wzdłużnego (oś pozioma) i kątów nachylenia poprzecznego (legenda) kosza sitowego

Fig. 4. The Shannon entropy values for various longitudinal inclination angles (horizontal axis) and transverse inclination angles (legend) of the sieve basket

8. Podsumowanie

Wartość entropii może być uznana jako parametr stanu w procesie separacyjnym. Jest ona ściśle związana ze skutecznością separacji cząstek na powierzchni sita. Entropia może być obliczona tylko wówczas jeśli potraktujemy proces separacji na równi z doświadczeniem losowym, w którym na sicie losujemy cząstki o wymiarze mniejszym niż wymiar separacyjny sita. Wektor losowy w określonym miejscu na powierzchni sita można estymować w oparciu o wartość wskaźnika częstości.

Entropia, jako parametr stanu jest funkcją czasu, w aspekcie zmiennych warunków separacyjnych. Jeśli warunki realizacji procesu byłyby ustalone to wartość opisywanego parametru entropii powinna być stała ($S(t) = const \Rightarrow \frac{dS}{dt} = 0$). Rozkład

prawdopodobieństwa dla dowolnego stanu nierównowagowego różni się od rozkładu w równowadze podaniem pewnych parametrów dodatkowych, tzn. dokładniejszą znajomością odpowiednich wielkości fizycznych. Dzięki temu można powiedzieć, że nierównoważone zespoły statystyczne zawierają więcej informacji o układzie (procesie) niż równowagowe i na tym polega główna różnica między nimi. Jednakże zespołom nierównowagowym zawsze odpowiada mniejsza entropia niż równowagowym.

Przedstawiona w artykule zmiana warunków nachylenia kosza sitowego zmienia stan procesu, a co za tym idzie wpływa na wartość entropii. W szczególności:

- zmiana kąta nachylenia wzdłużnego sita do wartości ok. 5° wpływa korzystnie na wartość entropii oraz (co potwierdzono empirycznie) na skuteczność separacji cząstek;
- zmiana kąta nachylenia poprzecznego (względem kierunku ruchu separowanych cząstek) w sposób niekorzystny zmienia wartość entropii;
- wysokie wartości kątów nachylenia w sposób drastyczny powodują obniżenie wartości entropii oraz skuteczności procesu separacyjnego.

Obserwowana podczas eksperymentu zmiana skuteczności procesu separacyjnego determinuje wzrost strat cząstek, a co za tym idzie wzrost zanieczyszczenia frakcji nad-sitowej.

8. Summary

Value of entropy may be considered as a state parameter in the separation process. It is closely related with the particles separation effectiveness at the sieve surface. Entropy may be calculated only when we treat the separation process equally to the random experience, in which particles of a size smaller than the sieve separation size are being sampled. A random vector at a determined location of a sieve surface may be estimated basing at the frequency factor value.

Entropy, as a parameter of the state is a function of time, when the changing separation conditions are considered. If the process conditions could be fixed, then the value of that entropy parameter should be constant ($S(t) = const \Rightarrow \frac{dS}{dt} = 0$). Distri-

bution of probability for any nonequilibrium state differs from the distribution in equilibrium state by providing certain additional parameters, i.e. better acquaintance of the proper physical quantities. Due to that, it can be said that the unequilibrium (unbalanced) statistic assemblies contain more information on the system (process) than the equilibrium ones, and that constitutes the main difference between them. However, always the less entropy corresponds to the unequilibrium ones.

The change in the sieve basket inclination conditions presented in the article changes the process state, thus influencing the entropy value. In particular:

- a change in the longitudinal inclination angle of the sieve to about 5° positively influences the entropy value, and (what was confirmed empirically) the effectiveness of particles separation;
- a change in the transverse inclination angle (in relation to the move direction of the separated particles) negatively influences the entropy value;
- high values of inclination angles drastically reduce the entropy value and the separation process effectiveness.

A change in separation process effectiveness observed in the experiment determines the increase in particle loses, and in consequence, an increase in the impurity of the over-sieve fraction.

9. References

1. Augustynowicz J., Dudek D., Rezonans threats in basic machine structures. III International Congress „Brown coal mining”, Belchatów, 2002.
2. Bieniek J., Banasiak J., Lewandowski B., Detyna J. 2001: Analysis of a sectional blade sieve capacity in the variable inclination conditions. *Agricultural Engineering* 2001; 1: 27-32.
3. Bieniek J., Banasiak J., Lewandowski B., Detyna J. 2001: Wheat grain purifying results in the simulated conditions of sectional sieve inclination. *Agricultural Engineering* 2001; 12: 39-43.
4. Bobrowski D., Probabilistics in engineering applications. Warszawa: WNT, 1986.
5. Detyna J., Analysis of Influence of the Geometry of Blade Sieve on the Course of the Grain Cleaning Process in Combine Harvester. PhD Thesis, Wrocław 2000.
6. Detyna J., Bieniek J., Methods of Statistical Modeling in the Process of Sieve Separation of Heterogeneous Particles. *Applied Mathematical Modeling* 2008; 6 (32): 992-1002; Elsevier.
7. Detyna J., Bieniek J., Banasiak J., Selected Constructional Aspects of Sectional Sieves with Variable Geometry, Destined for Combines-Harvesters. *Systems* 2004; 2(8): 141-152.
8. Detyna J., Bieniek J., Banasiak J., Lewandowski B., Clearing the Grain on Adjustable Section Sieve under Changeable Inclination Conditions. *Operation and Reliability* 2002; 3(15): 43-48.
9. Detyna J., Bieniek J., Banasiak J., Current issues relating to the use of agricultural machinery. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2002; 2(14): 63-72.
10. Detyna J., Bieniek J., Banasiak J., The influence of the slope on the process sieve separation in the combine harvester to the class of grain. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2004; 3(23): 33-39.
11. Detyna J., Bieniek J., Banasiak J., The state of tension and internal friction of material being sieved as the determinants of forceful sieve separation process. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2003; 4(20): 71-78.
12. Nowak R., Statystyka dla fizyków. Warszawa: Wyd. Naukowe PWN, 2002.
13. Rusiński E., Czmochoński J., Kowalczyk M., Construction of diagnostic models of the states of developing fault for working parts of the multi-bucket excavator. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2009; 2(42): 17-24.
14. Rusiński E., Harnatkiewicz P., Bobyr M., Yakhno B., Caterpillar drive shaft damage causes analysis. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2008; 3(8): 117-130.
15. Shannon C. E., A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal* 1948; 27.
16. Szczepankiewicz E., Zastosowania pól losowych. Warszawa: PWN, 1985.
17. Zubrzycki S., Remarks on Random, Stratified and Systematic Sampling in a Plane. *Colloquium Mathematicum* 1958; 6: 251-264.

Prof. dr hab. inż. Jerzy DETYNA

Wrocław University of Technology

Institute of Materials Science and Mechanical Engineering

Smoluchowskiego 25, 50-379 Wrocław, Poland

e-mail: jerzy.detyna@pwr.wroc.pl
