

М.М. Петренко, проф., канд. техн. наук, І.О. Скриннік, ас., М.О. Скриннік, ас.,
Д.В. Богатирьов, ст. викл., канд. техн. наук, О. А. Кислун, доц. канд. техн. наук
Кіровоградський національний технічний університет

Модель зміни шпаруватості псевдорозрідження шару насіння на каскадах зерносушарки

В статті розглянуто гідродинамічну модель псевдорозрідження насіння в зерносушарці каскадного типу. Наведені дослідження, які дозволяють теоретично визначити закономірності зміни порозністості псевдорозрідженого шару відносно крупних частинок в залежності від зміни швидкості газу в апараті

каскад, псевдорозріджений шар насіння, агент сушіння, поверхня каскаду

Однією з першочергових задач дослідження параметрів процесу сушіння зернових культур в стані псевдорозрідження є вивчення впливу швидкості агента сушіння. Аналіз наукових праць А.В. Ликова, С.Д. Птіцина, А.П. Гержоя [1, 2, 3] показує значний вплив швидкості агента сушіння на параметри, структуру та гідродинаміку процесу. На сьогоднішній день псевдорозрідження крупних частинок (діаметром $d=0,32$ мм) вивчені не достатньо [4].

На кафедрі сільськогосподарського машинобудування Кіровоградського національного технічного університету розроблено конструкцію зерносушарки каскадного типу, на якій було проведено ряд експериментів, на основі яких побудовано гідродинамічну модель псевдорозрідження середовища крупних частинок [5].

Мета дослідження полягає у визначенні положення насінини при відомих параметрах каскадів, установки в цілому, шару насіння та режиму сушіння.

Відомо, що для всього об'єму псевдорозрідженого середовища в цілому характерна тенденція руху повітряних бульбашок від поверхні каскаду апарату до центру шару. Незначна концентрація бульбашок поблизу поверхні каскаду апарату обумовлена рухом насіння в цій зоні. Насіння, перенесене бульбашкою в надшарову зону каскаду (після руйнування бульбашки) деякий час залишається на поверхні, а потім занурюється в шар зворотнім циркуляційним напором. Основна роль бульбашок – сприяння руху насіння, результатом якого є інтенсивне їх переміщення. Поглинання агента сушіння відбувається інтенсивніше при діаметрі бульбашок більше за робочу товщину псевдорозрідженого шару. При цьому процес утворення бульбашок проходить інтенсивніше [6], ніж у псевдорозрідженому шарі дрібних частинок.

Розглянемо шар відносно крупних сферичних частинок, псевдорозріджених однорідним потоком агента сушки. Псевдорозрідження відбувається на каскадах [5] під кутом $3-9^\circ$ у вертикальному апараті прямокутної форми з площею F_a .

В результаті аналізів дослідження Ю.А. Буєвича, І. Девідсона, А.П. Баскакова, С.І. Дворецкого, В.Н. Корольова [7-9] запропоновано гідродинамічну модель псевдорозрідження насіння, в основу якої покладено наступні припущення:

а) псевдорозріджене середовище представлено як суміш безперервної (однорідної) фази насіння та бульбашок газу, які здійснюють рух в своїх шлейфах. Бульбашки з'являлися одночасно з початком псевдорозрідження;

б) параметри $W_{ан}$ – швидкість агента сушки в неперервній фазі, ε_n – порозність в неперервній фазі, $D_{об}$ – діаметр одиночної бульбашки, $W_{пб}$ – швидкість піднімання

бульбашки агента сушки, та $\varepsilon_{ш}$ – порозність шару залежать від числа псевдорозрідження N , характеру зміни величини сили гідростатичного тиску псевдорозрідженого шару $P_{ш}$ та відрізняються в кожній з трьох зон режимом псевдорозрідження: прикаскадної (зони формування та росту бульбашок), основної (зони стабілізуючих параметрів середовища) та надшарової (зони росту та руйнування бульбашок);

в) до початку псевдорозрідження шар крупних насінин попередньо не розширювався, а після переходу у псевдорозріджений стан товщина шару насіння поступово збільшувалась. При цьому відносно розширення шару $H_{ш}$ (статична висота шару H_o з ростом числа псевдорозрідження N безпосередньо пов'язана із збільшенням висоти надшарової зони), може суттєво (2 і більше раз) перевищувати висоту цільного шару H_o ;

г) опір, що долає агент в ході взаємодії з насінням та стінками апарату, обумовлює падіння тиску на висоті $H_{ш}$: $\Delta P_{ш} = \Delta P_n + \Delta P_{ст}$;

д) рух агента сушки по мірі його підйому уверх через шар насінин супроводжується перерозподілом об'ємної витрати агента сушки в апараті $V_{аа}$ між неперервною $V_{ан}$ та дискретною $V_{ао}$ фазами, в результаті чого порозність шару буде оптимальна $\varepsilon_{ш} \rightarrow opt$, а $H_{ш} \rightarrow min$, тобто при $V_{ан} / V_{ао} \rightarrow opt$ шар прагне до меншого значення потенціальної енергії. При цьому кінетична енергія агента сушіння, що рухається у вигляді бульбашок, визначає енергію виникаючих у псевдорозрідженому середовищі флуктуацій швидкості газового потоку.

Стан ідеалізованої системи для заданого числа псевдорозрідження N характеризувався значеннями ефективної порозності шару $\varepsilon_{ш}$ в цілому та порозності його неперервної фази ε_n , діаметра $D_{об}$ сфери рівновеликої бульбашки по об'єму, а також постійністю [10]:

– робочої висоти шару

$$\partial H_{ш} / \partial \tau = 0, \text{ або } H_{ш} = const;$$

– маси насінин

$$\int_{v_{ш}} \rho_n (1 - \varepsilon_{ш}) dv = m_n = const;$$

– витрати агента сушки

$$\int_{F_a} \rho_a \varepsilon_{ш} (W_a n) dF = W_a F_a = V_{аа} = const;$$

– перепадом тиску агента сушки в шарі

$$\Delta p_{ш} = g m_n / F_a = g (\rho_n - \rho_a) (1 - \varepsilon_{ш}) H_{ш} = g (\rho_n - \rho_a) (1 - \varepsilon_o) H_o;$$

– потенціальної та кінетичної енергії руху твердої фази

$$\int_{v_{ш}} (1 - \varepsilon_o) \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_n W_n^2 / 2) dv = \int_{v_n} (1 - \varepsilon_{ш}) \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_n g z) dv = 0.$$

Побудуємо гідродинамічну модель вільного псевдорозрідженого середовища з урахуванням його ділення на вищевказані зони.

Розширення псевдорозрідженого шару $H_{ш} / H_o$ визначалось рівнянням [6]

$$\frac{H_{ш}}{H_o} = \frac{1 - \varepsilon_o}{1 - \varepsilon_{ш}}, \quad (1)$$

де $H_{ш}$ – висота псевдорозрідженого шару, м;

H_o – статична висота шару, м;

ε_o – початкова порозність; $\varepsilon_{ш}$ – порозність шару.

Рівняння (1) дозволяє визначити розширення псевдорозрідженого шару з зростанням його порозності $\varepsilon_{ш}$ у порівнянні з початковою порозністю ε_o . Але з нього неможливо визначити, як саме будуть змінюватись висота псевдорозрідженого шару $H_{ш}$ та порозність шару $\varepsilon_{ш}$ зі збільшенням швидкості агента сушіння W_a . Тому виникла задача визначення закономірності розширення псевдорозрідженого шару від зміни параметрів процесу (швидкості агента сушіння та утворення бульбашок, частоти виникнення та розмірів бульбашок, площі шлейфу) та насіння (товщина, ширина, довжина, зведений діаметр та густина), тобто знайти залежність

$$\varepsilon_{ш} = f(W_a, W_o, D_{об}, \rho_n, f_{шл}, d, \omega_{нб}). \quad (2)$$

Розглянемо порозність шару $\varepsilon_{ш}$ як середню об'ємну концентрацію газу в псевдорозрідженому шарі. Загальну порозність бульбашки в неперервній фазі ε_n представимо як середню об'ємну концентрацію сферичних включень (бульбашок), котрі мають порозність шлейфа $\varepsilon_{шл}$, частинки об'єму бульбашки, зайнятого шлейфом $f_{шл}$ [7]

$$\varepsilon_{ш} = \varepsilon_n (1 - \varphi_n) + \varphi_n \varepsilon_o = \varepsilon_n (1 - \varphi_n) + \varphi_n (1 - f_{шл}) + \varphi_n \varepsilon_{шл} f_{шл}, \quad (3)$$

де $\varepsilon_{шл}$ – порозність шлейфа;

$f_{шл}$ – площа шлейфа, м²;

φ_n – об'ємна концентрація бульбашок;

ε_n – порозність в неперервній фазі;

ε_o – порозність бульбашок.

Умова збереження сумарного потоку агента сушки в псевдорозрідженому шарі (середній потік в шарі) отримаємо у вигляді

$$W_a = W_{ан} \varepsilon_n (1 - \varphi_n) + \varphi_n (W_{нб} + W_{кнб}), \quad (4)$$

де $W_{ан}$ – швидкість агента сушки в неперервній фазі, м/с;

$W_{нб}$ – швидкість під'єму бульбашки агента сушки, м/с;

$W_{кнб}$ – швидкість наскрізного потоку відносно бульбашки агента сушки, м/с.

Дослідами доведено [6], що у псевдорозрідженому шарі відносно крупних частинок бульбашки піднімаються одна за одною зі швидкістю одиничної бульбашки, (що практично і характеризує відсутність взаємодії їх між собою).

Швидкість руху бульбашок газу W_o , (згідно [7]), покажемо у вигляді

$$W_o = \left(1 - \frac{f_{шл} \varphi_n}{1 - \varphi_n} \frac{1 - \varepsilon_{шл}}{1 - \varepsilon_n} \right) W_{об}, \quad (5)$$

де $W_{об}$ – швидкість руху одиничної бульбашки, м/с.

Для визначення величини $W_{об}$ використовуємо формулу Девіса-Тейлора [8]

$$W_{об} = 0,711 \sqrt{g D_{об}}, \quad (6)$$

де $D_{об}$ – еквівалентний діаметр одиничної бульбашки [7-8].

$$D_{об} = 1.4 \rho_n d N z + D_{нб}, \quad (7)$$

де z – змінна координата (висота), м;

ρ_n – густина насіння, кг/м³;

N – число псевдорозрідження;

d – діаметр насінини, м;

$D_{n\bar{o}}$ – початковий діаметр бульбашки, м ($D_{n\bar{o}} = 0$).

Оскільки прийнято $\varepsilon_{шл} = \varepsilon_n$, то $W_{\bar{o}} = \left(1 - \frac{f_{шл}\Phi_n}{1 - \Phi_n}\right) W_{об}$ і вираз (4) представимо у

вигляді

$$W_{ca} = W_{ан} \varepsilon_n (1 - \Phi_n) + \Phi_n \left(1 - \frac{f_{шл}\Phi_n}{1 - \Phi_n}\right) W_{об}. \quad (8)$$

Використовуючи принцип рівнорозподілення енергії по степеням вільності (кінетична енергія хаотичного руху однієї частинки складається з складових рухів (трьох поступальних та трьох обертальних степенів вільності) [9], вважаємо, що при рівності поступальної та обертальної енергії частинки приймають найбільшу рухомість, що, в свою чергу, обумовлює максимальну інтенсивність процесів теплопереносу у псевдорозріджених середовища [11]. З іншого боку, гетерогенна система «агент сушіння – насіння» є стійкою при мінімумі енергії, тобто в проміжках між двома послідовними ударами кожна насінини прагне до стану, при якому відносна кутова швидкість дорівнює нулю, а відносна лінійна така, що, сила опору, яка виникає при обтіканні насінини потоком газу, зрівноважує і силу тяжіння, і архімедову (тобто рівна швидкості витання частинок в середовищі з густиною $\rho_a = \rho_n (1 - \varepsilon_n) + \rho_a \varepsilon_n$). Тоді рівняння рівноваги сил, діючих на частинку, з урахуванням вищевказаного, приймає вигляд

$$\varepsilon_n (\rho_n - \rho_c) g \frac{\pi d^3}{6} = C_x \frac{\pi d^2}{4} \rho_a \frac{W_{нчн}^2}{2}, \quad (9)$$

де C_x – коефіцієнт лобового опору, $C_x = 0,44$ [12];

$W_{нчн}$ – швидкість падіння насіння (частинок) в неперервній фазі, м/с;

ρ_a – густина агента сушки, кг/м³.

Швидкість частинок $W_{нчн}$ в безперервній фазі псевдорозрідженого шару приймає вигляд

$$W_{нчн} = 1,741 \frac{v_a}{d} \sqrt{Ar \varepsilon_n}, \quad (10)$$

де v_a – кінематична в'язкість агента сушки, Пуаз;

Потік насінин має середню швидкість

$$W_{нчн} = \frac{f_{шл} (1 - \varepsilon_{шл}) \Phi_n}{(1 - \varepsilon_n)(1 - \Phi_n)} W_{об} \approx \frac{f_{шл} \Phi_n}{(1 - \Phi_n)} 0,711 \sqrt{g D_{об}}. \quad (11)$$

Прирівнявши вираз (10) та (11) після нескладних перетворень отримаємо відношення для визначення частки об'єму бульбашки, зайнятого шлейфом

$$f_{шл} = K_{ш} \frac{(1 - \Phi_n)}{\Phi_n} \frac{v_a}{d} \sqrt{\frac{Ar \varepsilon_n}{g D_{об}}}, \quad (12)$$

де $K_{ш}$ – коефіцієнт, що враховує діаметр насіння та їх форму, $K_{ш} = 0,014$ [7].

З умови зберігання сумарного потоку газу в псевдорозрідженому шарі виразимо об'ємний потік газу в бульбашках через відомі параметри

$$V_{\bar{o}} = V_{aa} - V_{ан} = W_a F_a - W_{ан} \varepsilon_n (1 - \Phi_n) F_a, \quad (13)$$

де V_{aa} – об’ємна витрата агента сушки в апараті, м³/с;

V_{an} – витрата агента сушки у неперервній фазі, м³/с;

W_a – швидкість агента сушки, м/с;

F_a – площа апарату, м²;

З іншої сторони вираз для V_o представимо у вигляді

$$V_o = \omega_{no} (1 - f_{шл}) v_{oo}. \quad (14)$$

де ω_{no} – частота проходження газових бульбашок в основній зоні, с⁻¹;

v_{oo} – об’єм одиничної бульбашки, включаючи її шлейф, м³

$$v_{no} = \frac{\pi D_{ob}^3}{6} (1 - f_{шл}) \quad (15)$$

Після перетворень (13) та (14) отримаємо вирази для об’ємної концентрації бульбашок

$$\varphi_n = 1 - \frac{W_a F_a - \omega_{no} (1 - f_{шл}) v_{oo}}{W_{an} F_a \varepsilon_n}. \quad (16)$$

Порозності в основній зоні псевдорозрідженого шару в цілому (в безперервній фазі, бульбашках та їх шлейфах)

$$\varepsilon_{ш} = \varepsilon_n + (1 - \varepsilon_n) (1 - f_{шл}) \left(1 - \frac{W_a F_a - \omega_{no} (1 - f_{шл}) v_{oo}}{W_{an} F_a \varepsilon_n} \right). \quad (17)$$

Частоту проходження бульбашок ω_{no} , пов’язану з основною частиною пульсацій тиску приймаємо згідно [12]

$$\omega_{no} = \frac{1}{\tau_{no}},$$

де τ_{no} – час (період) проходження бульбашок основної зони псевдорозрідженого шару (висоту якої умовно прийняли рівною H_o), $\tau_{no} = H_o / W_{ob}$.

Оскільки $W_{ob} = 0.711 \sqrt{g D_{ob}}$

то

$$\omega_{no} = \frac{W_{ob}}{H_o} = 0,711 \frac{\sqrt{g D_{ob}}}{H_o}. \quad (18)$$

Залежність між порозністю в неперервній фазі ε_n та швидкістю агента сушки в неперервній фазі W_{an} виразимо з формули Ергана [12], справедливої при $\varphi_n \geq 0,3$, у вигляді

$$W_{an} = W_{en} \left(\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_o} \right)^{1,5} \left(\frac{1 - \varepsilon_o}{1 - \varepsilon_n} \right)^{0,5}, \quad (19)$$

де W_{en} - швидкість витання насіння, м/с.

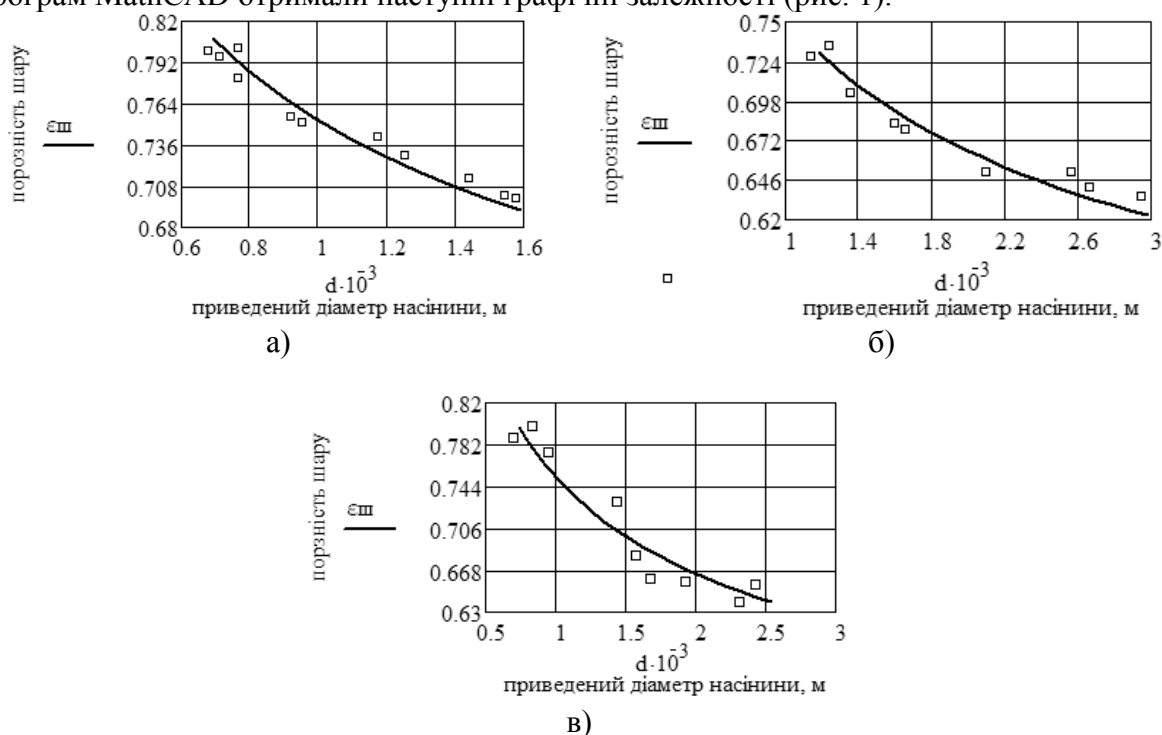
Оскільки розглядається неперервна фаза псевдорозрідженого шару, котра знаходиться в однорідному стані, то величину ε_n прийmemo з [11]

$$\varepsilon_n = \left(\frac{18 Re + 0.36 Re^2}{Ar} \right)^{0.25}. \quad (20)$$

Закономірність зміни порозності псевдорозрідженого шару відносно крупних насінин в залежності від зміни швидкості агента сушки в апараті $\varepsilon_{ш} = f(W_a)$ для невеликих чисел псевдорозрідження N ($2 \leq N \leq 7$) має вираз

$$\varepsilon_{ш} \leq \frac{1 + 2 \left(\varepsilon_n + (1 - \varepsilon_n)(1 - f_{шл}) \left(1 - \frac{W_a F_a - \omega_{нб} (1 - f_{шл}) v_{бo}}{W_{ан} F_a \varepsilon_n} \right) \right)}{3}. \quad (21)$$

Якщо проаналізувати складові формули (21), то можна прийти до висновку, що більшість з них, а саме W_a (4), $W_{ан}$ (19), $f_{шл}$ (12), $\omega_{нб}$ (18) залежні від еквівалентного діаметру одиничної бульбашки $D_{об}$ (7), який в свою чергу залежить від приведенного діаметру насінини d . Проводячи дослідження за допомогою пакету прикладних програм MathCAD отримали наступні графічні залежності (рис. 1).



а – пшениця; б – соняшник; в – соя

Рисунок 1 – Залежність порозності шару ($\varepsilon_{ш}$) від приведеного діаметра (d) насінини

Для оцінювання тісноти зв'язку між теоретичними та експериментальними даними визначили коефіцієнти кореляції [13]

$$K_k = \frac{M \cdot \sum_{i=1}^n (E_m \cdot E_e) - \sum_{i=1}^n E_m \cdot \sum_{i=1}^n E_e}{\sqrt{\left[M \cdot \sum_{i=1}^n E_m^2 - \left(\sum_{i=1}^n E_m \right)^2 \right] \cdot \left[M \cdot \sum_{i=1}^n E_e^2 - \left(\sum_{i=1}^n E_e \right)^2 \right]}}$$

де M – кількість дослідів;

n – порядковий номер дослідів;

E_m, E_e – відгук за теорією та експериментом [5].

Коефіцієнт кореляції для порозності ($\varepsilon_{ш}$) по культурам становить: пшениця (E_1) – $K_{к1}=0,86$; соняшник (E_2) – $K_{к2}=0,84$; для соя (E_3) – $K_{к3}=0,86$.

Аналіз отриманих коефіцієнтів вказує, що математична модель достатньо точно описує спостережуване явище.

Побудована гідродинамічна модель вільного псевдорозрідженого середовища крупних частинок враховує вплив на розширення шару не тільки швидкості агента сушки в сушарці, але і основних параметрів неперервної та дискретної фази псевдорозрідженого шару. Із нерівності (21) випливає, що розмір бульбашок, частота їх проходження та обмін між фазами у псевдорозрідженому середовищі взаємопов'язані і залежать від параметрів процесу (швидкості агента сушіння та утворення бульбашок, частоти виникнення, розмірів бульбашок, площі шлейфу), а також насінини (товщина, ширина, довжина, зведений діаметр і густина).

Список літератури

1. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 471 с.
2. Птицын С.Д. Зерносушилки. – М.: Машгиз, 1966. – 240 с.
3. Гержой А.П., Самочетов В.Д. Зерносушение и зерносушилки. М.: Хлебоиздат, 1967. – 250 с.
4. Дворецкий С.И., Королёв В.Н., Ногорнов С.А., Таров В.П. Техника и технологии псевдоожижения: гидродинамика и теплообмен с погружёнными телами. Тамбов: Изд.-во Тамб. гос. тех. ун.-та, 2005. – 168 с.
5. Петренко М.М., Скриннік М.О., Скриннік І.О., Д.В. Богатирьов Результати експериментальних досліджень впливу основних параметрів на процес сушіння зернових культур у зерносушарці каскадного типу Вісник ТДТУ Випуск 3. – Тернопіль: ТДТУ, 2007. – С. 53-58.
6. Кувшинов Г.Г. Скорость подъема газовых пузырей в развитом псевдоожиженном слое / Г.Г.Кувшинов, Ю.И. Могильных // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1989. Вып. 4. – С. 88 - 95.
7. Бувич Ю.А. Взаимодействие пузырей в псевдоожиженном слое и двухфазная теория псевдоожижения / Ю.А. Бувич // Проблемы тепло- и массообмена: современное состояние и перспективы : сб.науч. ст. Минск, 1985.– С. 122-139.
8. Дэвидсон И. Псевдоожижение твердых частиц / И. Дэвидсон, Д. Харрисон. М.: Химия, 1965.184с.
9. Гольдштик М.А. Элементарная теория кипящего слоя / М.А. Гольдштик // Прикладная математика и теоретическая физика. 1972. № 6. – С. 106 - 112.
10. Теплофизика механической обработки: Учеб. пособие // А.В. Якимов, П.Т. Слободяник, А.В. Усов. – К.; Одесса: Лыбидь, 1991. – С.28-29.
11. Нагорнов С.А. К вопросу об интенсификации внешнего теплообмена в неоднородном псевдоожиженном слое / С.А. Нагорнов, И.М. Цырульников, Б.В.Панков // Тепломассообмен-VII : матер. VII Всесоюз. конф. по тепломассообмену. Т. V: Теплообмен в реологических и дисперсных системах. Ч. 1:Тепломассообмен в дисперсных системах. Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова. 1984.– С. 87-92.
12. Тупоногов В.Г. Равномерность псевдоожижения и пульсации давления в аппарате с колпачковыми решетками: автореф. дис. ... канд. техн. наук/В.Г. Тупоногов. Свердловск. 1983.– 21 с.
13. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментальных исследования и обработки опытных данных. – М.: Колос, 1973. – 196 с.

В статье рассмотрено гидродинамическую модель псевдоожиженного зернового потока на каскадах зерносушильной установки. Приведены исследования, которые позволяют теоретически определить закономерности порозности псевдоожиженного слоя относительно крупных частиц в зависимости от изменения скорости агента сушки в агрегате.

In the article motion of seed is considered for to the cascades of the installation for dry grain in the booling layer. Researches which allow in theory to define the structural parameters of dryer taking into account the features of motion of seed are resulted.