

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ЗЕРНОВЫХ СЕЯЛОК МЕТОДАМИ ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ

**Мударисов Салават Гумерович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительно-дорожные, коммунальные и сельскохозяйственные машины»

**Рахимов Зиннур Саатович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительно-дорожные, коммунальные и сельскохозяйственные машины»

**Гареев Руслан Тагирович**, ассистент кафедры «Строительно-дорожные, коммунальные и сельскохозяйственные машины»

ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ

г. Уфа, 50-летия Октября, 34, к. 206/1, тел. (347) 228-91-66, e-mail: salavam@gmail.com

**Ключевые слова:** посевная машина, пневматическая распределительная система, моделирование технологического процесса, двухфазное течение.

Целью исследования является обоснование параметров двухфазных гетерогенных потоков «газ – частицы» («воздух – семена») посредством математического моделирования технологического процесса работы пневматических систем зерновых сеялок. Для теоретического описания технологического процесса образования, перемещения и распределения твердых частиц в пневматических системах предложено использовать методы механики двухфазных течений «газ – частицы». Установлена возможность применения методов двухфазных течений применительно к зерновым сеялкам с пневматическими распределительными системами. Установлены режимы течения смеси «воздух – семена», определяемые числом Рейнольдса и объемной концентрацией частиц. Приведена методика определения скорости движения воздушного потока и семян различных культур, объемной концентрации семян, числа Рейнольдса и коэффициента сопротивления семян, которые необходимы для реализации математических моделей технологического процесса работы пневматических систем зерновых сеялок методами механики двухфазных течений.

### Введение

В современных зерновых сеялках и посевных комплексах все большее применение находят пневматические распределительные системы [1]. Однако такие системы имеют существенные отклонения в равномерности распределения семян по сошникам, что объясняется несовершенством конструкций пневматических систем ввиду отсутствия теоретических методов обоснования их конструктивных параметров [2, 3].

Для теоретического описания технологического процесса перемещения и распределения семян пневматической системой сеялки мы предлагаем использовать методы механики двухфазных течений «газ – частицы» [4]. Необходимо в систему уравнений Навье-Стокса при описании течения воздуха с частицами включить уравнения сохранения массы и неразрывности образованной смеси, а также сохранения импульса.

Для математического описания действия пневматической системы зерновых сеялок необходимо обосновать возможность применения методов двухфазных течений. Для этого требуется установить режим течения смеси «газ – частицы» (воздух – семена), определяемый числом Рейнольдса  $Re_p$  и объемной концентрацией

частиц  $\alpha_c$ . Для определения этих параметров нужно, в свою очередь, знать количество транспортируемого материала и скорость движения воздушного потока и частиц, а также коэффициент их аэродинамического сопротивления.

### Объекты и методы исследований

В двухфазных течениях несущей фазой является газ, а дисперсной фазой – частицы. Физико-механические свойства этих фаз отличаются, что ведет к отставанию семян от воздуха. При этом траектория движения семян отличается от траектории движения воздуха.

В связи с этим в воздушном потоке под действием силы гидродинамического сопротивления семена начинают перемещаться. Сила сопротивления возникает из-за разности скоростей семян и воздуха.

Силу сопротивления определяют по выражению [5]

$$f_D = \frac{1}{2} C_D \rho_g S_m |v_g - v_p| (v_g - v_p), \quad (1)$$

где  $C_D$  – коэффициент сопротивления;  $\rho_g$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $S_m$  – площадь миделева сечения семян, м<sup>2</sup>;  $v_g$  – скорость воздуха, м/с;  $v_p$  – скорость семян, м/с.

Семена ускоряются, если  $v_g > v_p$  или, наоборот, замедляются при  $v_g < v_p$ .

Коэффициент сопротивления для сфери-

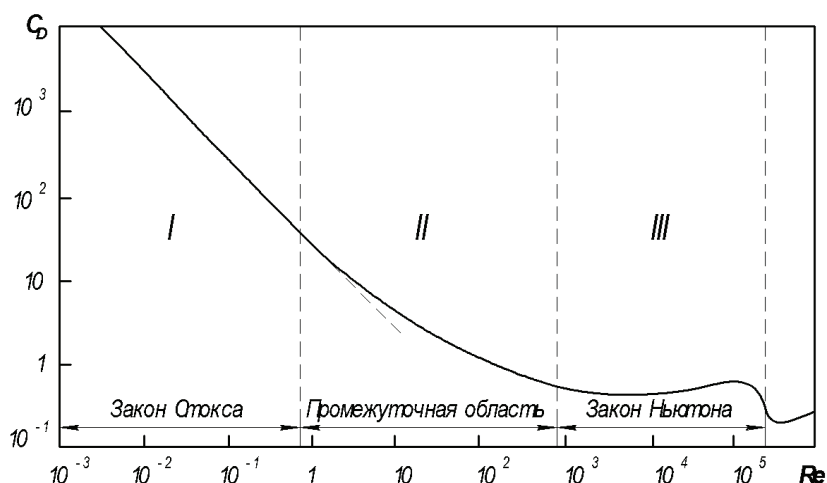
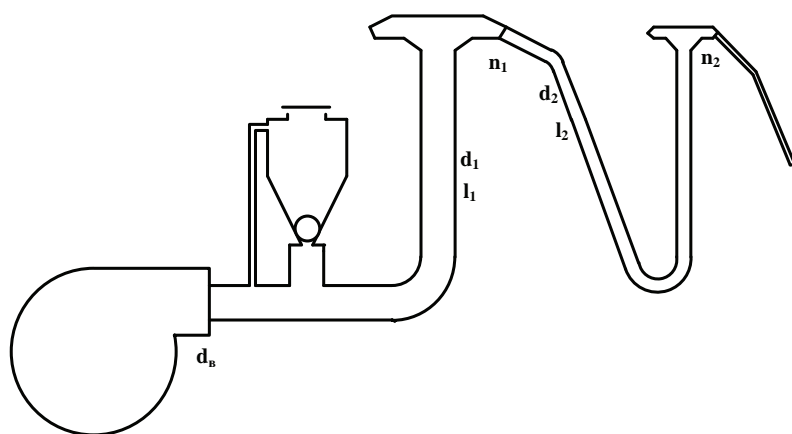


Рис. 1 – Зависимость коэффициента сопротивления  $C_{D0}$  частицы шарообразной формы от  $Re$  (кривая Рэлея)



Е-16

Рис. 2 – Схема двухступенчатой пневматической системы зерновой сеялки

Таблица 1

Необходимые скорости воздуха для перемещения семян различных культур и удобрений

Культура	Средняя скорость витания, м/с	Необходимая скорость воздушного потока, м/с
Гречиха	6,2	17,1
Просо	7,8	18,1
Овес	8,6	18,7
Чечевица	9,1	19,0
Ячмень	9,6	19,4
Пшеница	10,2	19,8
Кукуруза	13,3	21,9
Горох	16,5	24,1
Удобрения	7,4	17,9

ческих частиц в двухфазных средах в зависимости от числа Рейнольдса  $Re$  определяют согласно кривой Рэлея, ( $C_D = f(Re)$ ) [5] (рис. 1). При этом число Рейнольдса вычисляют по относительному запаздыванию

$$Re_p = \frac{d_p \rho_g |v_g - v_p|}{\eta} \quad (2)$$

где  $d_p$  – диаметр частиц, м;  $\rho_g$  – плотность воздуха ( $\rho = 1,188 \text{ кг/м}^3$  при  $20^\circ\text{C}$  и давлении  $100 \text{ кПа}$ );  $\eta$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с (при  $20^\circ\text{C}$   $\eta = 1,82 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ).

При наличии потока частиц коэффициент сопротивления меняется от значения  $C_{D0}$  для единичной частицы, т.к. взаимодействие частиц в стеснённых условиях и стенки ограничивают течение. В этом случае

$$C_D = \Psi(\alpha_c) C_{D0} \quad (3)$$

где  $\Psi(\alpha_c)$  – поправочный множитель;  $\alpha_c$  – объёмная концентрация.

Поправочный множитель меняется в зависимости от характера взаимодействия частиц. При малых концентрациях примеси ( $\alpha_c < 10^{-6}$ ) частицы на течение воздуха практически не влияют.

Объёмную концентрацию  $\alpha_c$  определяют как отношение объёма частиц к объёму воздуха за единицу времени

$$\alpha_c = \frac{W_p}{W_g} \quad (4)$$

где  $W_p$  – объём частиц в элементарном объёме воздуха за единицу времени,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $W_g$  – элементарный секундный объём воздуха,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

#### Результаты исследований

Объём частиц (семян)  $W_p$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$  для зерновых сеялок можно получить по расходу семян за единицу времени [3]:

$$W_p = \frac{B_p \cdot V_c \cdot Q}{10000 \cdot \rho_s} \quad (5)$$

где  $B_p$  – ширина захвата сеялки, м;  $V_c$  – рабочая скорость сеялки, м/с;  $Q$  – норма высева семян, кг/га;  $\rho_s$  – насыпная плотность семян,  $\text{кг/м}^3$ .

Объём семян, проходящий за единицу времени через семяпроводы сошников

$$W_{pc} = \frac{W_p}{n_c}, \quad (6)$$

где  $n_c$  – количество сошников.

На промежуточных семяпроводах объем семян при двухступенчатой системе распределения (рис. 2), которая используется в большинстве современных посевных комплексов, определяют как

$$W_{pi} = \frac{W_p}{n_c} \cdot n_2, \quad (7)$$

где  $n_2$  – количество обслуживаемых данным распределителем сошников.

Расход воздуха в семяпроводах рассчитывают с использованием уравнений неразрывности или постоянства расходов воздуха. [6].

Обозначим количество выходов распределителей II ступени для двухступенчатой системы распределения семян -  $n_2$ . Тогда

$$v_{gv} \cdot d_v^2 = v_{gI} \cdot d_I^2 = v_{gII} \cdot d_{II}^2 \cdot n_1 = v_{gc} \cdot d_c^2 \cdot n_1 \cdot n_2 = v_{gc} \cdot d_c^2 \cdot n_c, \quad (8)$$

где  $d_v$ ,  $d_I$ ,  $d_{II}$  и  $d_c$  – соответственно диаметр выходного отверстия вентилятора, диаметр семяпровода I ступени, диаметр семяпроводов II ступени и диаметр семяпроводов, подходящих к сошникам, м;  $v_{gv}$ ,  $v_{gI}$ ,  $v_{gII}$  и  $v_{gc}$  – соответственно скорость воздуха на выходе из вентилятора, в семяпроводе I ступени, в семяпроводах II ступени и в семяпроводах, подходящих к сошникам, м/с;  $n_1$  и  $n_2$  – количество выходов на I и на II распределителях соответственно.

По выражению (8) определяют изменение скорости воздуха на местах перехода:

$$\frac{v_{gv}}{v_{gI}} = \frac{d_I^2}{d_v^2}, \quad \frac{v_{gI}}{v_{gII}} = \frac{d_{II}^2 \cdot n_1}{d_I^2}, \quad \frac{v_{gII}}{v_{gc}} = \frac{d_c^2 \cdot n_2}{d_{II}^2}. \quad (9)$$

Для устойчивой работы пневматической сеялки без забивания семяпроводов скорость воздушного потока в вертикальных трубах должна быть больше скорости витания семян [6]:

$$v_g = k_3(10,5 + 0,57v_{вит}), \quad (10)$$

где  $v_{вит}$  – скорость витания семян, м/с;  $k_3 = 1,2...1,5$  – коэффициент запаса.

Результаты расчетов по формуле (10) скорости воздуха для перемещения семян различных культур представлены в таблице 1, а графическая интерпретация результатов – на рисунке 3.

Как следует из полученных данных (рис. 3), только в зависимости от высеваемой культуры скорость воздушного потока (соответственно, и производительность вентилятора) должны меняться в 1,4 раза.

Объемная концентрация семян  $\alpha_c$  в зависимости от конструктивно-технологических

Таблица 2

Объемная концентрация семян в зависимости от конструктивно-технологических параметров сеялок

Марка сеялки	Ширина захвата, м	Ширина междурядья, см	Количество сошников	Скорость воздуха в семяпроводе сошника, м/с	Скорость воздуха на выходе из вентилятора, м/с	Объем воздуха, подаваемого вентилятором, м <sup>3</sup> /с	Изменение скорости	Объемная концентрация
	$B_p$	$b$						
ППА-5,4	5,4	22,8	24	9,8	20	0,190	0,49	0,0011
ППА-7,2	7,2	22,8	32	7,4	20	0,190	0,37	0,0015
ССНП-16	1,6	12,5	12	19,7	20	0,190	0,98	0,0003
СПН-8	4	12,5	32	7,4	20	0,190	0,37	0,0008

Таблица 3

Число Рейнольдса для высеваемых семян

Культура	Скорость витания семян (средняя), м/с	Скорость воздушного потока, м/с	Скорость движения семян (средняя), м/с	Эквивалентный диаметр семян, мм			Число Рейнольдса		
				мин.	макс.	средн.	мин.	макс.	средн.
Гречиха	6,2	17,1	9,3	3	3,5	3,25	1581	2476	2006
Просо	8,5	18,7	8,7	2	2,3	2,15	982	1516	1236
Овес	8,6	18,7	8,6	2,5	4	3,25	1221	2622	1859
Чечевица	9,1	19,0	8,5	5	5	5	2393	3213	2803
Рожь	9,5	19,3	8,4	3	3,5	3,25	1429	2238	1813
Ячмень	9,6	19,4	8,4	3,5	4,2	3,85	1658	2671	2136
Пшеница	10,2	19,8	8,2	4	4,5	4,25	1856	2804	2310
Кукуруза	13,3	21,9	7,4	8	8,5	8,25	3326	4744	4017
Горох	16,5	24,1	6,5	6,2	6,5	6,35	2278	3206	2733

Таблица 4

Изменения коэффициентов сопротивления семян  $C_D$  от числа Рейнольдса

Числа Рейнольдса $Re_p$	Коэффициент сопротивления $C_D$		
	по С.Т. Hammond	по P.W. James	по Stein Schmehl
980	0,472797	0,46449	0,490368
1000	0,470343	0,464	0,48866
1500	0,426745	0,456	0,458962
2000	0,401432	0,452	0,442354
2500	0,384448	0,4496	0,43151
3000	0,372062	0,448	0,423769
3500	0,362524	0,446857	0,417911
4000	0,354892	0,446	0,413293
4500	0,348608	0,445333	0,40954
5000	0,343319	0,4448	0,406417

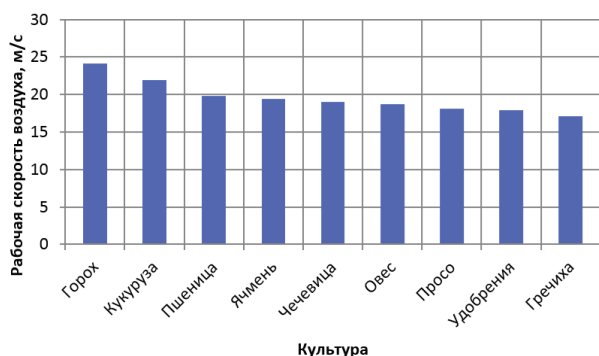
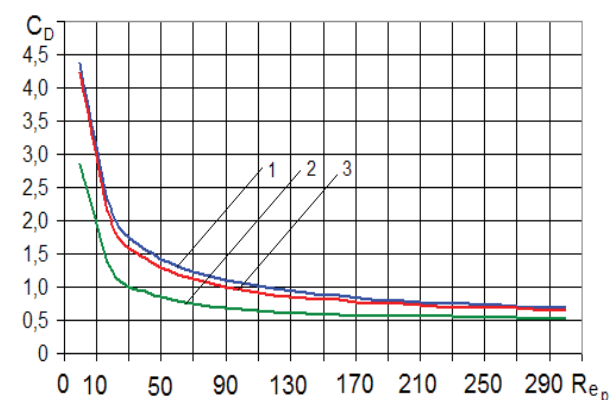


Рис. 3 – Зависимость необходимых скоростей воздушного потока от высеваемой культуры



1 – по С.Т. Hammond; 2 – по P.W. James; 3 – по Stein Schmehl

Рис. 4 – Зависимости коэффициента сопротивления  $C_D$  от числа Рейнольдса  $Re_p$

параметров различных сеялок и посевных комплексов российского производства представлены в табл. 2.

Как показывают расчёты, при рекомендованных конструктивно-технологических параметрах сеялок и посевных комплексов объёмная концентрация семян в пневматических распределительных системах незначительная ( $\alpha_c < 0,0015$ ). В связи этим для математического описания работы пневматической системы сеялок и посевных комплексов можно использовать методы механики двухфазных сред. При этом взаимодействием семян между собой можно пренебречь.

Кроме того, для определения режима течения воздушно-зерновой смеси необходимо установить числа Рейнольдса, а для этого - скорость движения частиц и воздушного потока.

Известно, что при движении семян в вертикальном потоке воздуха скорость семян стремится к  $v'_p = v_g - v_{вит}$ , но не достигает этой величины. На основании многочисленных опытов Дзядзио А.М. и Кеммера А.С. установлены величины отставания скорости семян от максимальной возможной [6]:

$$\frac{v_p}{v_g - v_{вит}} = 0,73 \div 0,98.$$

С учетом этого можно написать формулу для определения относительной скорости частиц:

$$v_p = (0,730,98) \cdot (v_g - v_{вит}). \quad (16)$$

По формуле (2) с учетом выражения (16) рассчитаны числа Рейнольдса для высеваемых семян (табл. 3).

Как видно из таблицы 3, для пневматических систем зерновых сеялок число Рейнольдса колеблется от 980 до 4800.

Коэффициент сопротивления семян  $C_D$  в полученном интервале нельзя описывать только зависимостями Ньютона или Стокса (рис. 1). Наиболее подходящими являются зависимости (17) С.Т. Hammond [7], (18) P.W. James [8], (19) Stein Schmehl [9]:

$$C_D = \frac{21,12}{Re} + 6,3Re^{-0,5} + 0,25; \quad (17)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} + 0,44; \quad (18)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} + 5,48Re^{-0,573} + 0,36. \quad (19)$$

Коэффициенты сопротивления семян  $C_D$  в воздушном потоке, рассчитанные по этим зависимостям, приведены в таблице 4.

Ниже приведены графические зависимости коэффициентов сопротивления семян от числа

Рейнольдса (рис. 4).

Как видно из представленных данных, коэффициент сопротивления семян в пневматической системе посевной машины по данным трех выражений изменяется в пределах от 0,5 до 0,35.

#### Выводы

Проведенные исследования позволили обосновать следующие параметры воздушно-зерновой смеси в пневматической системе распределения сеялок и посевных комплексов:

- скорость движения воздуха для обеспечения транспортирования семян различных культур до сошников  $v_g = 17...24$  м/с;

- объёмная концентрация семян  $\alpha_c = 0,0003...0,0015$ ;

- число Рейнольдса семян  $Re_p = 980...4800$ ;

- коэффициент сопротивления семян  $C_D = 0,35...0,50$ .

Малая объёмная концентрация семян обеспечивает возможность использования методов механики двухфазных сред для математического описания работы пневматических систем посевных комплексов. Число Рейнольдса семян позволяет определить коэффициент их сопротивления в уравнениях динамики частиц для любой точки пневматической системы. Расчетные значения скорости движения воздушного потока позволяют подобрать вентилятор и обосновать частоту вращения его лопастей для обеспечения транспортирования и качественного распределения семян.

#### Библиографический список

1. Разработка системы машин для реализации инновационных технологий в растениеводстве Республики Башкортостан / И.И. Габитов, С.Г. Мударисов,

Р.Р. Исмагилов, И.Г. Асылбаев, И.Д. Гафуров, А.М. Аблева // Достижения науки и техники АПК. - 2014. - № 5. - С. 57-62.

2. Мударисов, С.Г. Обоснование параметров двухфазного течения «воздух - семена» при математическом описании работы пневматической системы зерновой сеялки / С.Г. Мударисов, З.С. Рахимов // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. - 2014. - № 4(32). - С. 85-91.

3. Рахимов, Зиннур Саатович. Разработка противозерозионных технологий и технических средств обработки почвы и посева на склоновых агроландшафтах: дис. ... д-ра технических наук: 05.20.01 / З.С. Рахимов. - Уфа, 2013. - 373с.

4. Мударисов, С.Г. Моделирование пневматической системы зерновой сеялки / С.Г. Мударисов, И.Д. Бадретдинов, А.В. Шарафутдинов // Механизация сельского хозяйства. - 2010. - № 3. - С. 9-10.

5. Волков, К.Н. Течения газа с частицами / К.Н. Волков, В.Н. Емельянов. - М.: Физматлит, 2008. - 600 с.

6. Дзядзио, А.М. Пневматический транспорт на зерноперерабатывающих предприятиях / А.М. Дзядзио, А.С. Кеммер. - М.: Колос, 1967. - 295 с.

7. Hammond, C.T. The taskers pateson MKB fertispread / C.T. Hammond // Power Farm. - 1972. - № 3. - P. 45.

8. James, P.W. Droplet Motion in Two Phase Flow / P.W. James, G.F. Hewitt, P.B. Whalley // Proc. of the ANS/ASM/NRC Inst/ Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermohydraulics, Report NUREG/CP-0014. - P. 1484-1503.

9. CFD Analysis of Spray Propagation and Evaporation Including Wall Film Formation and Spray / R. Stein Schmehl, H. Roskamp, M. Willmann, S. Witting // Film Interaction, int. J. of Heat and Fluid Flow 20. - 1999. - P. 520-529.

## MODELING PNEUMATIC DISTRIBUTION SYSTEMS OF GRAIN SEED SOWING-MACHINES BY METHODS OF TWO-PHASE FLOWS

Mударисов S.G., Рахимов Z.S., Гареев R.T.  
FSBEI HE Bashkir SAU,

450001, Ufa, The 50th anniversary of October st., 34;  
tel.: 8-347-228-91-66, e-mail: salavam@gmail.com

Keywords: sowing machine, pneumatic distribution system, modeling of technological process, two-phase flow.

The aim of the research is to substantiate the parameters of two-phase heterogeneous gas-particle flows (air-seeds) by means of mathematical modeling of technological process of operation of pneumatic systems of grain seeders. For a theoretical description of technological process of formation, movement and distribution of solid particles in pneumatic systems it is proposed to use methods of two-phase gas-particle mechanics. The possibility of applying the methods of "two-phase flows" in relation to grain seeders with pneumatic distribution systems has been established. The flow regimes of the air-seed mixture determined by the Reynolds number and the bulk concentration of particles are determined. A method is presented for determining the speed of airflow and seeds of various crops, volume concentration of seeds, Reynolds number and seed resistance coefficient, which are necessary for the implementation of mathematical models of the technological process of operation of pneumatic systems of grain seeders using the methods of two-phase flows.

#### Bibliography

1. Development of a system of machines for the implementation of innovative technologies in crop production of the Republic of Bashkortostan / I.I. Gabitov, S.G. Mударисов, R.R. Ismagilov, I.G. Asylbaev, I.D. Gafurov, A.M. Ableeva // Achievements of science and technology of agrarian and industrial complex. - 2014. - № 5. - P. 57-62.

2. Mударисов, S.G. Justification of the parameters of the two-phase air-seed flow in the mathematical description of the operation of pneumatic system of a grain seeder / S.G. Mударисов, Z.S. Rakhimov // Vestnik of Bashkir State Agrarian University. - 2014. - № 4 (32). - P. 85-91.

3. Rakhimov, Zinur Saetovich. Development of anti-erosion technologies and technical means for tillage and seeding on sloping agricultural landscapes: dissertation of Doctor of Technical Sciences: 05.20.01 / Z.S. Rakhimov. - Ufa, 2013. - 373p.

4. Mударисов, S.G. Modeling of pneumatic system of a grain seeder / S.G. Mударисов, I.D. Badretdinov, A.V. Sharafutdinov // Agricultural Mechanization. - 2010. - № 3. - P. 9-10.

5. Volkov, K.N. Gas flow with particles / K.N. Volkov, V.N. Emelyanov. - M.: Fizmatlit, 2008. - 600 p.

6. Dzyadzio, A.M. Pneumatic transport at grain processing enterprises / A.M. Dzyadzio, A.S. Kemmer. - M.: Kolos, 1967. - 295 p.

7. Hammond, C.T. The taskers pateson MKB fertispread / C.T. Hammond // Power Farm. - 1972. - № 3.

8. James, P.W. Droplet Motion in Two Phase Flow / P.W. James, G.F. Hewitt, P.B. Whalley // Proc. of the ANS/ASM/NRC Inst/ Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermohydraulics, Report NUREG/CP-0014. - P. 1484-1503.

9. CFD Analysis of Spray Propagation and Evaporation Including Wall Film Formation and Spray / R. Stein Schmehl, H. Roskamp, M. Willmann, S. Witting // Film Interaction, int. J. of Heat and Fluid Flow 20. - 1999. - P. 520-529.