УДК 631.303

DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-52-58

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПНЕВМОСЕПАРИРОВАНИЯ ЗЕРНА

¹Тишанинов Константин Николаевич¹ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Реферат. Рассмотрены теоретические вопросы пневмосепарирования зерна. Используются методы математического моделирования, расчетно-конструктивной и статистической обработки. Установлено, что эмпирические исследования процессов сепарирования зерна существенно разнятся с теоретическими. В частности, по закону Стокса сила сопротивления среды прямопропорциональна скорости тела, а не квадрату скорости - согласно эмпирической формуле. Из эмпирической формулы для определения силы сопротивления среды следует, что она прямопропорциональна миделеву сечению тела, при отклонении форм от шарообразной вычисляют приведенный диаметр. Установлено, что сила сопротивления среды прямопропорциональна площади поверхности тела, на которое происходит воздействие среды, а не миделеву сечению, взаимодействие зерна с воздушным потоком определяется не вязкостью среды (согласно закону Стокса), а зависит от кинетической энергии воздуха, часть которой передается зерну. Подтверждено, что эффективность процесса сепарирования зерна экспоненциально растет вместе с шириной канала (в рекомендуемом диапазоне) и квадратом скорости воздушного потока, линейно падает с увеличением загрузки пневмоканала. На основе выявленных зависимостей построена математическая модель эффективности процесса пневмосепарирования зерна. Построенная математическая модель не противоречит известным результатам исследований процесса, а выдвинутые новые гипотезы уточняют наблюдаемые закономерности – экспоненциальный закон распределения зерна по вертикали пневмоканала.

Ключевые слова: процесс пневмосепарирования, зерно, закон Стокса, эксперимент, эмпирические закономерности

THEORETICAL JUSTIFICATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE PROCESS FOR GRAIN PNEUMOSEPARATION

¹Tishaninov Konstantin¹FSBSI "All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture"

Abstract. Theoretical issues of pneumatic separation of grain are considered. The methods of mathematical modeling, calculation and structural and statistical processing are used. It is established that the empirical studies of grain separation processes differ significantly from the theoretical ones. The resistance force of the medium, in particular, according to the Stokes law, is directly proportional to the speed of the body, and not to the square of the speed - according to the empirical formula. It follows from the empirical formula for determining the resistance force of the medium that it is directly proportional to the mid-section of the body, and when the forms deviate from the spherical shape, the reduced diameter is calculated. It was established that the resistance force of the medium is directly proportional to the surface area of the body, on which the medium acts, and not the mid-section, the interaction of the grain with the air flow is determined not by the viscosity of the medium (according to Stokes law), but depends on the kinetic energy of the air, part of which is transferred to the grain. It is confirmed that the efficiency of the grain separation process increases exponentially along with the channel width (in the recommended range) and the square of the air flow velocity, and decreases linearly with increasing loading of the pneumatic channel. The constructed mathematical model does not contradict the known results of the process studies, and the proposed new hypotheses clarify the observed patterns - the exponential law of grain distribution along the vertical of the pneumatic channel.

Keywords: pneumoseparation process, grain, Stokes' law, experiment, empirical regularities.

Введение. Теоретические основы сепарирования зерна воздушным потоком были созданы еще в 1930-х годах [1]. Большинство исследований было направлено на изучение аэродинамических свойств зерна, конструкций пневмосепараторов и процесса пневмосепарирования [2]. Были установлены основные характеристики движения воздушного потока, определены режимы работы пневмосепараторов, обосновано взаимодействие зернового материала с воздушным потоком. Тем не менее, теория пневмосепарирования зерна содержит недостатки, которые определяются неустойчивостью взаимосвязей результативных показателей процесса с традиционными характеристиками рабочей среды. Поэтому пополнение базы знаний по процессу пневмосепарирования зерна с учетом возможностей вариативности оценки свойств рабочей среды является актуальной задачей.

Целью исследований является теоретическое обоснование эффективности процесса пневмосепарирования зерна.

Материалы и методы. В работе использованы методы математического моделирования, расчетно-конструктивный истатистической обработки.

Результаты и их обсуждение. Из классической теории пневмосепарирования зерна следует, что сила сопротивления среды (R) пропорциональна миделеву сечению ($S_{\text{мид}}$) и квадрату скорости зерна (V^2):

$$R = K \cdot S_{\text{мид}} \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2}, \quad (1)$$

где K – коэффициент аэродинамического сопротивления;

$S_{\text{мид}}$ – миделево сечение зерна, м^2 ;

ρ – плотность воздуха, кг/м^3 .

Согласно законам движения тела в жидкости или газе (закон Стокса, уравнение Эйлера) ламинарное движение жидкости окажет силу сопротивления на шар с радиусом r , равную:

$$R = 6\pi r \eta V, \quad (2)$$

где η – коэффициент динамической вязкости газа (жидкости), $\text{Па} \cdot \text{с}$;

То есть сила сопротивления среды прямопропорциональна скорости V , а не квадрату скорости, и определяется вязкостью среды (η).

Примем, что зерно гороха имеет шарообразную форму радиусом (R) 3 мм, массой (m) 0,2 г. На зерно действует восходящий воздушный поток с вязкостью (η) $18 \cdot 10^{-6}$ $\text{Па} \cdot \text{с}$. Тогда значение скорости витания ($V_{\text{вит}}$) примет неадекватно большое значение:

$$V_{\text{вит}} = \frac{mg}{6\pi R \eta} = \frac{200 \cdot 10^{-6} \cdot 10}{6 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 18 \cdot 10^{-6}} = 1,81 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Очевидно, что процесс витания зерна (тел) в воздушном потоке нельзя описать через формулу Стокса и объяснить вязкостью воздушной среды (которая существенно мала для газов).

Рассмотрим известный пример [3]: выравненные по размерам горошины витают по высоте пневмоканала так, что концентрация горошин с ростом высоты убывает (Рисунок 2). Хотя «причины такого распределения до сих пор не вскрыты» Н.И. Сыромятников предлагает экспоненциальный закон распределения зерна по вертикали:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot e^{-Ah},$$

где ε – концентрация зерна на высоте h ;

ε_0 – концентрация зерна на сетке; A – коэффициент пропорциональности, м^{-1} ; h – высота слоя зерна, м.

Рисунок 2 – Схема распределения горошин в вертикальном пневмоканале

Рассмотрим этот случай более подробно. Воздух в вертикальном пневмоканале движется с одинаковой скоростью (v_b). Возьмем элементарный участок высоты канала (Δh - один слой), тогда кинетическая энергия воздуха ($\Delta E_{кв}$) элементарного участка высоты канала (Δh) будет одинаковой на протяжении всего канала:

$$\Delta E_{кв} = \Delta m_b \cdot v_b^2 = \rho_b \cdot s \cdot v_b^2 \cdot \Delta h, (3)$$

где Δm_b - масса одного слоя воздуха, кг;

ρ_b - плотность воздуха, кг/м³;

s - площадь сечения канала, м²;

Предположим, что частицы воздуха ударяясь о горошину будут отдавать ей кинетическую энергию, поэтому часть кинетической энергии воздуха ($K_1 < 1$) сообщается зерну, которая увеличивает его потенциальную энергию ($\Delta E_{пз}$):

$$\Delta E_{пз} = K_1 \cdot \Delta E_{кв} \quad (4)$$

А это означает, что потенциальная энергия каждого слоя зерна будет одинаковой на всем протяжении пневмоканала. С другой стороны, потенциальная энергия слоя зерна зависит от массы слоя (M) и высоты слоя (h):

$$M \cdot g \cdot h = \Delta E_{пз} \quad (5)$$

При одинаковой массе частиц

$$M = n \cdot m_0,$$

где m_0 - масса горошин, кг; n - число горошин, шт;

Тогда

$$n \cdot m_0 \cdot g \cdot h = \Delta E_{пз}$$

или

$$n = \frac{\Delta E_{пз}}{m_0 \cdot g} \cdot h^{-1}.$$

То есть количество частиц в слое зерна обратно пропорционально высоте слоя. Мы получили более точную формулу, которая объясняет изложенный выше эффект. Важно отметить, что мы выдвинули гипотезу о том, что зерно взвешивается частью кинетической энергии воздуха. А значит, масса выделенного зерна ($m_{выд}$) на участке пневмоканала (B) прямо пропорциональна кинетической энергии воздуха этого участка:

$$m_{выд} = K_2 \cdot E_{кв} = K_2 \cdot m_b \cdot v_b^2 = K_3 \cdot B \cdot v_b^2.$$

В книге [4] Гортинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А. приводят результаты многофакторного эксперимента, где функцией отклика была степень выделения зерна (E) при вертикальном пневмосепарировании, а факторами варьирования были: удельная нагрузка на канал (q), скорость воздушного потока (v_b), физико-механические свойства вороха ($K_3, K_{пр}, \omega, A$), выравнивание воздушного потока (Φ_b), конструктивные параметры пневмосепарирующего канала (B, H_1, H_2, K_k, K_n), условия ввода зерна в пневмоканал (C_0, α, ψ_p) и другие.

$$E = f(q, v_b, K_3, K_{пр}, \omega, A, \Phi_b, B, H_1, H_2, K_k, K_n, C_0, \alpha, \psi_p).$$

В результате многофакторного эксперимента были выделены наиболее значимые факторы, для остальных факторов были даны рекомендации по их оптимальным значениям. В итоге регрессионного анализа функция отклика (E) приняла следующий вид:

$$E = 0,5018 - 0,0031 \cdot q + 0,0631 \cdot v_b + 0,0008 \cdot B.$$

где $B = 130 \dots 200$ мм; $v_b = 4,5 \dots 6,25$ м/с; $q = 50 \dots 200$ кг/(см·ч).

В результате экспериментов они получили следующие данные (Таблица 1). Полученная линейная модель вызывает сомнение, поэтому для получения более точной математической модели примем следующее:

а) Зерно уносится частью кинетической энергии воздуха, а значит, масса выделенного зерна ($m_{выд}$) на участке пневмоканала шириной B прямо пропорциональна кинетической энергии ($E_{кв}$) воздуха этого участка;

б) Степень выделения зерна (E) экспоненциально растет вместе с шириной сепарирования и линейно падает с увеличением удельной загрузки пневмоканала (q) (Аналогично выделению зерна решетом [5]).

Таблица 1 – Эффективность выделения зерна в вертикальном пневмоканале при различном сочетании фактором (q, v_B, B).

B , мм	$q \setminus v_B$	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25
130	50	0,72	0,74	0,76	0,77	0,79	0,80	0,82	0,83
	100	0,57	0,59	0,60	0,62	0,63	0,65	0,66	0,68
	150	0,41	0,43	0,45	0,46	0,48	0,49	0,51	0,52
	200	0,26	0,27	0,29	0,29	0,32	0,34	0,35	0,37
140	50	0,73	0,75	0,76	0,78	0,79	0,81	0,82	0,84
	100	0,58	0,59	0,61	0,62	0,64	0,65	0,67	0,69
	150	0,42	0,44	0,45	0,47	0,48	0,50	0,51	0,53
	200	0,27	0,28	0,30	0,31	0,33	0,34	0,36	0,37
150	50	0,74	0,76	0,77	0,79	0,80	0,82	0,83	0,85
	100	0,59	0,60	0,62	0,63	0,65	0,66	0,68	0,69
	150	0,43	0,45	0,46	0,48	0,49	0,51	0,52	0,54
	200	0,28	0,29	0,31	0,32	0,34	0,35	0,37	0,38
160	50	0,75	0,77	0,78	0,80	0,81	0,83	0,84	0,86
	100	0,58	0,61	0,62	0,64	0,66	0,67	0,69	0,70
	150	0,42	0,45	0,47	0,48	0,50	0,52	0,53	0,55
	200	0,27	0,30	0,31	0,33	0,34	0,36	0,38	0,39
170	50	0,76	0,77	0,79	0,80	0,82	0,83	0,85	0,86
	100	0,60	0,62	0,63	0,65	0,66	0,68	0,69	0,71
	150	0,45	0,46	0,48	0,49	0,51	0,52	0,54	0,55
	200	0,29	0,31	0,32	0,34	0,35	0,37	0,38	0,39
180	50	0,77	0,78	0,80	0,81	0,83	0,84	0,86	0,87
	100	0,61	0,63	0,64	0,67	0,67	0,69	0,70	0,72
	150	0,45	0,47	0,49	0,50	0,52	0,53	0,55	0,56
	200	0,30	0,31	0,33	0,35	0,36	0,38	0,39	0,41
190	50	0,77	0,79	0,80	0,82	0,83	0,85	0,87	0,88
	100	0,62	0,63	0,65	0,66	0,68	0,69	0,71	0,73
	150	0,46	0,48	0,49	0,51	0,52	0,54	0,55	0,57
	200	0,31	0,32	0,34	0,35	0,37	0,38	0,40	0,41
200	50	0,78	0,80	0,81	0,83	0,84	0,86	0,87	0,89
	100	0,63	0,64	0,66	0,67	0,69	0,70	0,72	0,73
	150	0,47	0,49	0,50	0,52	0,53	0,55	0,56	0,58
	200	0,32	0,33	0,35	0,36	0,38	0,39	0,41	0,42

Чтобы получить адекватную математическую модель процесса пневмосепарирования зернового вороха, рассмотрим участок пневмоканала шириной (ΔB), тогда степень выделения на этом участке будет – p . На второй участок сепарирующего канала $b_2 = \Delta b$ попадет ворох в процентном содержании – $(1-p)$. На этом участке (b_2) зерно выделится также с вероятностью p . Аналогично получим таблицу 2:

Таблица 2 – Содержания вороха на i -ом участке пневмоканала

Номер участка пневмоканала	Содержание вороха после i -го участка ширины пневмоканала в процентах от исходного содержания
$b_1 = \Delta b$	$P_1 = 1 - p$
$b_2 = \Delta b$	$P_2 = (1 - p)^2$
$b_3 = \Delta b$	$P_3 = (1 - p)^3$
...	...
$b_n = \Delta b$	$P_n = (1 - p)^n$

Сход с n -го участка пневмоканала будет содержать ворох в процентном соотношении от исходной массы:

$$P_B = (1 - p)^n,$$

Тогда степень выделения зерна (E):

$$E = 1 - P_B = 1 - (1 - p)^n,$$

С ростом ширины пневмоканала (n) растет кинетическая энергия воздуха (E_{KB}), которая и определяет выделение зерна:

$$n = \frac{E_{KB}}{\Delta E_{KB}}.$$

Тогда

$$E = 1 - (1 - p)^{\frac{E_{KB}}{\Delta E_{KB}}} = 1 - K_p \cdot (1 - p)^{Bv_B^2}.$$

$$E = 1 - a \cdot c^{\frac{B \cdot v_B^2}{d}}. \quad (6)$$

Чтобы найти численные значения коэффициентов a , c и d примем: $q = 50 \text{ кг}/(\text{см} \cdot \text{ч})$, $v_B = 4,5 \text{ м}/\text{с}$, $d = v_B^2$, тогда формула (6) примет следующий вид:

$$E = 1 - a \cdot c^B. \quad (7)$$

Используя данные таблицы 1 в первом приближении получим: $a=0,5$, $c=0,15$, или:

$$E = 1 - 0,5 \cdot 0,15^{\frac{B \cdot v_B^2}{4,5^2}}.$$

Используя данные таблицы 1 окончательно получим:

$$E = 1 - 0,5 \cdot 0,15^{\frac{B \cdot v_B^2}{4,5^2}} + \left(0,155 - 0,155 \frac{q}{50}\right). \quad (8)$$

Для подтверждения адекватности полученной математической модели сравним теоретические данные с экспериментальными (таблица 3):

Таблица 3 – Сравнение расчетной и экспериментальной эффективности выделения зерна (E)

В, мм	q\ v_B	4,50		4,75		5,00		6,25	
		Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.
130	50	0,72	0,71	0,74	0,73	0,76	0,75	0,77	0,76
	100	0,57	0,56	0,59	0,57	0,60	0,59	0,62	0,61
	150	0,41	0,40	0,43	0,42	0,45	0,44	0,46	0,45
	200	0,26	0,25	0,27	0,26	0,29	0,28	0,29	0,30
140	50	0,73	0,72	0,75	0,74	0,76	0,76	0,78	0,78
	100	0,58	0,57	0,59	0,59	0,61	0,60	0,62	0,62
	150	0,42	0,41	0,44	0,43	0,45	0,45	0,47	0,47
	200	0,27	0,26	0,28	0,28	0,30	0,29	0,31	0,31
150	50	0,74	0,73	0,76	0,75	0,77	0,77	0,79	0,79
	100	0,59	0,58	0,60	0,60	0,62	0,62	0,63	0,63
	150	0,43	0,42	0,45	0,44	0,46	0,46	0,48	0,48
	200	0,28	0,27	0,29	0,29	0,31	0,30	0,32	0,32
160	50	0,75	0,74	0,77	0,76	0,78	0,78	0,80	0,80
	100	0,58	0,59	0,61	0,61	0,62	0,63	0,64	0,64
	150	0,42	0,43	0,45	0,45	0,47	0,47	0,48	0,49
	200	0,27	0,28	0,30	0,30	0,31	0,32	0,33	0,33
170	50	0,76	0,76	0,77	0,77	0,79	0,79	0,80	0,81
	100	0,60	0,60	0,62	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66
	150	0,45	0,44	0,46	0,46	0,48	0,48	0,49	0,50
	200	0,29	0,29	0,31	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35
180	50	0,77	0,76	0,78	0,78	0,80	0,80	0,81	0,82
	100	0,61	0,61	0,63	0,63	0,64	0,65	0,67	0,67
	150	0,45	0,46	0,47	0,47	0,49	0,49	0,50	0,51
	200	0,30	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36
190	50	0,77	0,77	0,79	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83
	100	0,62	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,66	0,68
	150	0,46	0,46	0,48	0,48	0,49	0,50	0,51	0,52
	200	0,31	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,35	0,37
200	50	0,78	0,78	0,80	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84
	100	0,63	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,67	0,69
	150	0,47	0,47	0,49	0,49	0,50	0,51	0,52	0,53
	200	0,32	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,36	0,38

Таблица 3 – Сравнение расчетной и экспериментальной эффективности выделения зерна (E) (продолжение)

В, мм	q/v_B	5,50		5,75		6,00		6,25	
		Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.
130	50	0,78	0,79	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,83
	100	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,66	0,67	0,68
	150	0,47	0,48	0,48	0,49	0,50	0,51	0,52	0,52
	200	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,35	0,36	0,37
140	50	0,79	0,79	0,81	0,81	0,82	0,82	0,84	0,84
	100	0,64	0,64	0,65	0,65	0,67	0,67	0,68	0,69
	150	0,48	0,48	0,50	0,50	0,51	0,51	0,53	0,53
	200	0,33	0,33	0,34	0,34	0,36	0,36	0,37	0,37
150	50	0,80	0,80	0,82	0,82	0,84	0,83	0,85	0,85
	100	0,65	0,65	0,67	0,66	0,68	0,68	0,70	0,69
	150	0,49	0,49	0,51	0,51	0,53	0,52	0,54	0,54
	200	0,34	0,34	0,36	0,35	0,37	0,37	0,39	0,38
160	50	0,82	0,81	0,83	0,83	0,85	0,84	0,86	0,86
	100	0,66	0,66	0,68	0,67	0,69	0,69	0,71	0,70
	150	0,51	0,50	0,52	0,52	0,54	0,53	0,55	0,55
	200	0,35	0,34	0,37	0,36	0,38	0,38	0,40	0,39
170	50	0,83	0,82	0,84	0,83	0,86	0,85	0,87	0,86
	100	0,67	0,66	0,69	0,68	0,70	0,69	0,72	0,71
	150	0,52	0,51	0,53	0,52	0,55	0,54	0,56	0,55
	200	0,36	0,35	0,38	0,37	0,39	0,38	0,41	0,39
180	50	0,84	0,83	0,85	0,84	0,87	0,86	0,88	0,87
	100	0,68	0,67	0,70	0,69	0,71	0,70	0,73	0,72
	150	0,53	0,52	0,54	0,53	0,56	0,55	0,57	0,56
	200	0,37	0,36	0,39	0,38	0,40	0,39	0,42	0,41
190	50	0,85	0,83	0,86	0,85	0,88	0,87	0,89	0,88
	100	0,69	0,68	0,71	0,69	0,72	0,71	0,74	0,73
	150	0,54	0,52	0,55	0,54	0,57	0,55	0,58	0,57
	200	0,38	0,37	0,40	0,38	0,41	0,40	0,43	0,41
200	50	0,86	0,84	0,87	0,86	0,89	0,87	0,90	0,89
	100	0,70	0,69	0,72	0,70	0,73	0,72	0,75	0,73
	150	0,55	0,53	0,56	0,55	0,58	0,56	0,59	0,58
	200	0,39	0,38	0,41	0,39	0,42	0,41	0,44	0,42

Результаты, приведенные в таблице 3, показывают, что выбранная нами математическая модель (формула 9) адекватна реальному технологическому процессу:

$$E = 1 - K_1 \cdot K_2^{B \cdot v_B^2} - K_3 \cdot q + C_1 \quad (9)$$

где K_1, K_2, K_3 - коэффициенты соответствия;

C_1 - значение начальной эффективности выделения.

Заключение. Известная формула для определения силы сопротивления среды в пневмоканале, полученная эмпирически, не объясняет характер взаимодействия среды с телом. Она содержит коэффициент соответствия, который может меняться в широком диапазоне и дополнять погрешности в расчете. Установлено, что взаимодействие воздушной среды с зерном в большей степени коррелирует с площадью поверхности тела, на которую воздействует воздушный поток, а не с площадью миделева сечения зерна. Предложенная математическая модель эффективности процесса пневмосепарирования зерна достаточно точно описывает известные результаты исследований.

Список литературы

1. Барков К.М. Основные элементы сепарирования семян воздушным потоком // Труды ВИМ. – М.: ВИМ, 1935. – Т.1.

2. Хамуев В.Г. Обоснование параметров глубокого пневмосепарирующего канала для очистки семян от трудноотделимых примесей: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 2008. – 150 с.
3. Тиц З.Л. Машины для послеуборочной поточной обработки семян: Москва, - 1967 г.
4. Гортинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. Москва, 1980.
5. Тишанинов К.Н. Исследование предельной скорости решета с помощью компьютерной модели грохота // Наука в центральной России. – 2017. – №5(29). – С. 12–21.

References

1. Barkov K.M. Osnovnye elementy separirovaniya semyan vozdushnym potokom // Trudy VIM. – M.: VIM, 1935. – Т.1.
2. Hamuev V.G. Obosnovanie parametrov glubokogo pnevmosepariruyushchego kanala dlya ochistki semyan ot trudnotdelimyh primesej: Dis. ... kand. tekhn. nauk. – M., 2008. – 150 s.
3. Tic Z.L. Mashiny dlya posleuborochnoj potochnoj obrabotki semyan: Moskva, - 1967 g.
4. Gortinskij V.V., Demskij A.B., Boriskin M.A. Processy separirovaniya na zernopererabatyvayushchih predpriyatiyah. Moskva, 1980.
5. Tishaninov K.N. Issledovanie predel'noj skorosti resheta s pomoshch'yu komp'yuternoj modeli grohota // Nauka v central'noj Rossii. – 2017. – №5 (29). – S. 12–21.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Тишанинов Константин Николаевич – кандидат технических наук старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: TishaninovKN@rambler.ru.

Author credentials

Affiliations

Tishaninov Konstantin – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: TishaninovKN@rambler.ru.

Поступила в редакцию (Received): 23.03.2020 Принята к публикации (Accepted): 24.04.2020

УДК (63.001.5:51-7):631.82

DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-58-64

ИЕРАРХИЧЕСКАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ И КООРДИНАЦИЯ В СЕВООБОРОТНОЙ ЗАДАЧЕ С РЕСУРСНЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ ПО УДОБРЕНИЯМ

¹Зазуля Александр Николаевич

²Бышов Николай Владимирович

³Макарова Ольга Владимировна

³Гаспарян Светлана Валентиновна

²Борычев Сергей Николаевич

²Макаров Валентин Алексеевич

¹ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

²ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева»

³ФКОУ ВО «Академия права и управления Федеральной службы исполнения наказаний»

Реферат. В системе земледелия для создания бездефицитного баланса гумуса обеспеченность органическими удобрениями составляет порядка 60%, поэтому при разработке экономико-математических моделей для севооборотных задач считается необходимым знать ресурсные ограничения. Для разработки иерархической декомпозиции с ресурсными ограничениями по удобрениям и создания экономико-математической модели рассматривали систему как блок «сельское хозяйство» состоящее из подблоков «растениеводство» и