

---

---

УДК 631.362.3

**Оценка соответствия модели процесса выделения зерновых примесей из фракции легких отходов в осадочной камере результатам эксперимента**

**Assessment of model adequacy of the process of grain impurities separation from the fraction of light waste in settling chamber to experimental results**

**В. Е. САИТОВ<sup>1</sup>**, д-р техн. наук  
**А. Н. СУВОРОВ<sup>2</sup>**, канд. техн. наук

<sup>1</sup> Зональный научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого, Киров, Россия, vicsait-valita@e-kirov.ru

<sup>2</sup> Центр дистанционного образования детей, Киров, Россия, suvorov-alex@mail.ru

**V. E. SAITOV<sup>1</sup>**, DSc in Engineering  
**A. N. SUVOROV<sup>2</sup>**, PhD in Engineering

<sup>1</sup> N. V. Rudnitskiy Zonal Research Institute of Agriculture of the North-East, Kirov, Russia, vicsait-valita@e-kirov.ru

<sup>2</sup> Center for Distance Education of Children, Kirov, Russia, suvorov-alex@mail.ru

Максимально полное использование собранного зерна — актуальная задача сельскохозяйственного производства. При выделении семенного зерна из зернового вороха в отходы попадает большое количество зерновых примесей (щуплое и дробленое зерно), которые могут служить ценным кормом для животных. Один из эффективных способов выделения зерновых примесей из легких отходов — фракционирование по аэродинамическим свойствам. При разработке и совершенствовании устройств для фракционирования легких отходов воздушным потоком требуется проведение большого количества экспериментов, что связано с временными, энергетическими и материальными затратами. Минимизировать количество экспериментов можно с помощью математического моделирования. Перед применением математической модели в проектировании технических устройств необходимо оценить ее адекватность. В статье проводится оценка соответствия результатов математического моделирования процесса фракционирования легких отходов результатам экспериментов. Качественная проверка соответствия проводится по попаданию результатов моделирования в поле допуска экспериментальных данных, количественная — путем проверки статистических гипотез. Результаты теоретических расчетов образуют одну выборку, результаты экспериментов — вторую. Рассматриваются две статистические гипотезы. Каждая из них проверяется на уровне значимости 0,05. С помощью критерия знаков проверяется гипотеза о том, что обе полученные выборки принадлежат одной генеральной совокупности. По результатам исследования на выбранном уровне значимости гипотеза принимается. Затем по каждой из выборок строится регрессионная модель, и с помощью теста Чоу проверяется гипотеза о совпадении построенных регрессионных моделей. По результатам исследований и вторая гипотеза на уровне значимости 0,05 принимается. Рассмотренная математическая модель может использоваться при проектировании технических устройств для фракционирования легких отходов.

**Ключевые слова:** зерновой материал; воздушный поток; осадочная камера; пневматический сепаратор; зерноочистительная машина; пневмосепарирующий канал; статистическая гипотеза; генеральная совокупность.

The fullest utilization of harvested grain is an important task of agricultural production. During separation of seed grain from grain heap a large amount of grain impurities (feeble and crushed grain) being a valuable animal feed is lost. One of the effective methods of separation of grain impurities from light waste is the fractionation on aerodynamic properties. When developing and improving the devices for fractionation of light waste by means of airflow, it is necessary to carry out a large number of experiments, which is associated with time, energy and material consumption. Mathematical modeling allows to minimize the number of experiments. Before applying a mathematical model in designing of technical devices, it is necessary to assess its adequacy. The article presents the assessment of adequacy of the results of mathematical modeling of light waste fractionation process to the experimental results. Qualitative assessment of adequacy is carried out by determining whether the results of mathematical modeling are within the tolerance range of experimental data; quantitative assessment is carried out by means of statistical hypotheses testing. The results of theoretical calculations draw one sample, the results of experiments draw another. Two statistical hypotheses are considered. Each of the hypotheses is tested at 0.05 of significance level. The hypothesis that both of received samples belong to the same parent population is tested with the use of the sign test. As a result of research, the hypothesis is accepted on the selected significance level. Then a regression model is developed for each of the samples, and using the Chow test the hypothesis about the coincidence of constructed regression models is tested. As a result of research, the second hypothesis is also accepted at 0.05 of significance level. The considered mathematical model can be used in the design of technical devices for fractionation of light waste.

**Keywords:** grain material; airflow; settling chamber; pneumatic separator; grain-cleaning machine; aspirating channel; statistical hypothesis; parent population.

## Введение

Поступающий на послеуборочную обработку зерновой ворох кроме биологически полноценного зерна содержит также щуплое, дробленое и битое зерно, семена сорных растений, органические и минеральные примеси. Зерновой ворох, засоренный сорными и зерновыми примесями, — благоприятная среда для развития и размножения микроорганизмов, которые ухудшают семенные, продовольственные, кормовые и технические качества зерна.

Зерновой ворох, доставленный от комбайнов, необходимо сразу очищать от примесей для повышения стойкости зерна к факторам порчи. Уже на стадии предварительной обработки эффективна очистка зернового вороха с интенсификацией пневмосепарации и фракционированием легких отходов по аэродинамическим признакам на зерновые и сорные примеси. При этом зерновые примеси служат ценным кормовым продуктом для с.-х. животных. Своевременное и качественное выполнение данной технологической операции способствует повышению семенных и продовольственных качеств зерна, снижению его потерь и увеличению пропускной способности поточных линий.

Математический анализ процесса разделения легких отходов на фуражную и сорную фракции с помощью статистического метода и получение аналитических выражений для выбора условий эффективного разделения

легких отходов на фракции позволяют обосновать рациональные конструктивно-технологические параметры пневмосистемы зерноочистительных машин.

## Цель исследования

Цель исследования состоит в проверке соответствия результатов статистического анализа фракционирования легких отходов в осадочной камере зерноочистительной машины экспериментальной регрессионной модели.

## Материалы и методы

Для сравнительного анализа получены расчетные данные с использованием математической модели движения частицы зернового вороха. Для получения расчетных и опытных данных по выделению зерновых примесей из легких отходов в осадочной камере использована экспериментальная установка, изготовленная в продольно-вертикальной плоскости в натуральную величину (соответствует размерам машины предварительной очистки зерна МПО-50) с шириной проточной части 0,2 м [1].

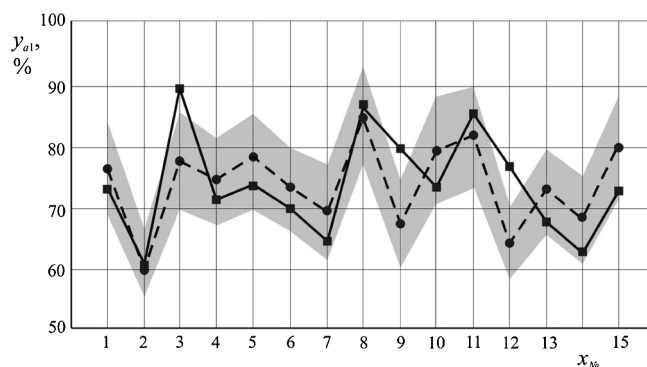
Проверку гипотезы о соответствии результатов теоретических исследований экспериментальным данным осуществляли по методу проверки статистической гипотезы о принадлежности двух выборок одной генеральной совокупности по критерию знаков и методу статис-

тической гипотезы о совпадении регрессионных моделей, полученных теоретически и экспериментально, с помощью теста Чоу [2]. Для качественной оценки соответствия результатов статистического анализа экспериментальным данным рассматривалось попадание расчетных данных в поле допуска экспериментальных.

## Результаты и их обсуждение

Математическая модель процесса фракционирования легких отходов в осадочной камере в зоне выходного окна пневмотранспортирующего канала (ПТК), описанная в работе [3], позволяет получить теоретические значения величины содержания  $a_1$  зерновых примесей в фуражной фракции для любых значений координат  $x$  и  $y$  установки верхней кромки разделительной стенки отсеков осаждения фуражной и сорной фракций и скорости  $v_B$  истечения воздушного потока из перепускного канала зерноочистительной машины [1, 4].

Для оценки соответствия математической модели фракционирования легких примесей в осадочной камере полученным результатам практического эксперимента, приведенного в работе [5], данные теоретического расчета и эксперимента сведены в таблицу. При проведении практического эксперимента реализован трехфакторный почти ротатбельный план Бокса—Бенкина второго порядка как наиболее выгодный в данном случае по количеству опытов и получаемой информации. Нижний (-1), средний (0) и верхний (+1) уровни исследованных факторов составляли: для координат  $x(x_1)$  и  $y(x_2)$  — 0,2 и 0,12; 0,24 и 0,16; 0,28 и 0,2 м соответственно с интервалом варьирования 0,04 м; для скорости  $v_B(x_3)$  истечения воздушного потока из перепускного канала — 7,6; 8,5 и 9,5 м/с с интервалом варьирования 1 м/с.



**Зависимости теоретических и экспериментальных значений содержания  $y_{a_1}$  зерновых примесей в фуражной фракции от номера  $x_{N_0}$  проведенного опыта при разделении легких отходов в осадочной камере в зоне выходного окна ПТК:**

— теоретические значения; - - - - экспериментальные значения; ■■■■ — область поля допуска различия экспериментальных данных

На рисунке приведены зависимости теоретических и экспериментальных значений содержания  $y_{a_1}$  зерновых примесей в фуражной фракции от номера  $x_{N_0}$  проведенного опыта при разделении легких отходов в осадочной камере в зоне выходного окна ПТК.

Оценим степень совпадения теоретических данных с экспериментальными. Теоретические значения  $a_1$  образуют одну выборку объемом  $n_1 = 15$ , а экспериментальные — другую выборку объемом  $n_2 = 15$ . Проверим гипотезу о том, что эти выборки взяты из одной генеральной совокупности. Воспользуемся критерием знаков [2].

Найдем разности экспериментальных и теоретических значений ( $a_{1\text{теор}} - a_{1\text{эксп}}$ ), из которых количество

**Результаты теоретического расчета и эксперимента по разделению легких отходов в осадочной камере в зоне выходного окна ПТК**

№ опыта	Кодированное обозначение факторов			Значения содержания $a_1$ зерновых примесей в фуражной фракции, %		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	Теоретические данные	Экспериментальные данные	По регрессионной модели
1	+	+	0	73,39	76	74,88
2	+	-	0	61,46	60	61,88
3	-	+	0	89,53	78	75,13
4	-	-	0	71,9	74	75,13
5	0	0	0	73,19	78	79
6	+	0	+	70,52	73	72,25
7	+	0	-	64,89	69	68
8	-	0	+	86,26	85	86
9	-	0	-	79,12	67	67,75
10	0	0	0	73,19	79	79
11	0	+	+	85,11	82	83,88
12	0	+	-	76,76	64	66,13
13	0	-	+	67,42	73	70,88
14	0	-	-	62,88	68	66,13
15	0	0	0	73,19	80	79

положительных разностей  $m = 6$ . По таблице [6] найдем критическое значение количества испытаний  $N_{\text{крит}}$ , соответствующее заданному уровню значимости 0,05 и  $m$ :  $N_{\text{крит}}(0,05; 6) = 21$ . Вследствие того, что объем выборки  $n_1 = n_2 = 15 < N_{\text{крит}}$ , гипотеза о принадлежности выборок одной генеральной совокупности принимается.

По результатам эксперимента регрессионная модель второго порядка, определенная методом наименьших квадратов, задается выражением:

$$y_{a_1 \text{эксп}} = 79 - 3,25x_1 + 3,125x_2 + 5,625x_3 + 3x_1x_2 - 3,5x_1x_3 + 3,25x_2x_3 - 2,625x_1^2 - 4,375x_2^2 - 2,875x_3^2. \quad (1)$$

Сумма квадратов  $S_{\text{эксп}}^2$  отклонений экспериментальных данных от вычисленных по регрессионной модели (1) составляет 34,75.

По результатам теоретических расчетов также построим регрессионную модель второго порядка методом наименьших квадратов:

$$y_{a_1 \text{теор}} = 73,19 - 7,069x_1 + 7,641x_2 + 3,208x_3 - 1,425x_1x_2 - 0,378x_1x_3 + 0,953x_2x_3 + 1,518x_1^2 - 0,638x_2^2 + 0,49x_3^2. \quad (2)$$

Сумма квадратов  $S_{\text{теор}}^2$  отклонений теоретических данных от вычисленных по регрессионной модели (2) составляет 1,943 325.

Проверим гипотезу о том, что регрессионные модели (1) и (2) совпадают. Для проверки этой гипотезы воспользуемся тестом Чоу [2]. Объединим совокупности теоретических и экспериментальных данных в одну и для нее методом наименьших квадратов построим регрессионную модель второго порядка:

$$y_{a_1} = 76,095 - 5,159x_1 + 5,383x_2 + 4,416x_3 + 0,788x_1x_2 - 1,939x_1x_3 + 2,101x_2x_3 - 0,554x_1^2 - 2,506x_2^2 - 1,193x_3^2. \quad (3)$$

Найдем сумму квадратов отклонений  $S^2 = 337,51$ . Вычислим значение статистики теста Чоу по выражению:

$$F = \frac{S - S_{\text{эксп}} - S_{\text{теор}}}{S_{\text{эксп}} + S_{\text{теор}}} \frac{n_1 + n_2 - 2m - 2}{m + 1}, \quad (4)$$

где  $n_1, n_2$  — объемы выборок,  $n_1 = n_2 = 15$ ;  $m$  — количество коэффициентов в уравнении регрессии, для уравнения второго порядка от трех переменных  $m = 10$ .

При подстановке в формулу (4) найденных значений получим  $F = 5,96$ . По таблице [6] найдем критическое значение  $F$ -распределения для заданного уровня значимости 0,05 и количества степеней свободы  $k_1 = m + 1 = 11$ ;  $k_2 = n_1 + n_2 - 2m - 2 = 8$ . Оно составляет  $F_{\text{крит}} = 7,1$ . Вследствие того, что  $F_{\text{крит}} > F$ , гипотеза о совпадении регрессионных уравнений (1) и (2) принимается.

## Выводы

Теоретические исследования по статистическому анализу процесса выделения зерновых примесей из легких отходов в осадочной камере в зоне выходного окна ПТК, приведенные в работе [3], согласуются с полученными результатами практических экспериментов. Примененная методика анализа может успешно использоваться при создании новых технологических схем пневматических сепараторов зерна.

## Литература и источники

1. **Сайтов В. Е.** Инновации в послеуборочной обработке зернового материала: Монография. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 152 с.
2. **Бардасов С. А.** Эконометрика: Учеб. пособие. Тюмень: Изд-во Тюменского ГУ, 2010. 264 с.
3. **Сайтов В. Е., Суворов А. Н.** Моделирование рабочего процесса пневмосистем комбикормовых агрегатов и зерноочистительных машин // В кн.: Проблемы интенсификации животноводства с учетом охраны окружающей среды и производства альтернативных источников энергии, в том числе биогаза / Под науч. ред. проф. докт. В. Романюка. Фаленты-Варшава: GIMPO, 2014. С. 256—264.
4. **Сайтов В. Е., Фарафонов В. Г., Суворов А. Н.** и др. Пневматический сепаратор сыпучих материалов. Патент РФ № 2525557, 2014.
5. **Сайтов В. Е.** Повышение эффективности функционирования зерноочистительных машин путем совершенствования их основных рабочих органов и пневмосистем с фракционной сепарацией: Дис. ... д-ра техн. наук. Чебоксары, 2014. 519 с.
6. **Большев Л. Н., Смирнов Н. В.** Таблицы математической статистики. М: Наука, 1983. 416 с.

## References

1. Saitov V. E. *Innovatsii v posleuborochnoy obrabotke zernovogo materiala* [Innovations in post-harvest processing of grain material]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012, 152 p. (in Russ.).
2. Bardasov S. A. *Ekonometrika* [Econometrics]. Tyumen, Tyumen State University Publ., 2010, 264 p.
3. Saitov V. E., Suvorov A. N. Modeling the working process of pneumatic systems of feed-processing units and grain cleaners. *Problemy intensifikatsii zhivotnovodstva s uchetom okhrany okruzhayushchey sredy i proizvodstva alternativnykh istochnikov energii, v tom chisle biogaza* [In: Issues of intensification of livestock breeding, taking into account the environmental protection and the production of alternative energy sources, including biogas]. Under the editorship of V. Romanyuk. Falenty-Warsaw, GIMPO Publ., 2014, pp. 256—264 (in Russ.).
4. Saitov V. E., Farafonov V. G., Suvorov A. N., Saitov A. V. *Pnevmaticheskiy separator sypushikh materialov* [Pneumatic separator for loose materials]. RF patent no. 2525557, 2014.
5. Saitov V. E. *Povyshenie effektivnosti funktsionirovaniya zernoochistitel'nykh mashin putem sovershenstvovaniya ikh osnovnykh rabochikh organov i pnevmosistem s fraktsionnoy separatsiei* [Increasing the efficiency of operation of grain cleaning machines by improving their basic working bodies and pneumatic systems with fractional separation]. DSc in Engineering thesis. Cheboksary, 2014, 519 p.
6. Bol'shev L. N., Smirnov N. V. *Tablitsy matematicheskoy statistiki* [Tables of mathematical statistics]. Moscow, Nauka Publ., 1983, 416 p.