



Исследование физико-механических свойств семян тыквы как объекта сушки

Александр Геннадиевич Пастухов,
доктор технических наук, профессор кафедры,
e-mail: pastukhov_ag@mail.ru;
Александр Александрович Добрицкий,
кандидат технических наук, доцент кафедры,
e-mail: dobrickiy_aa@bsaa.edu.ru;

Дмитрий Николаевич Бахарев,
доктор технических наук, доцент кафедры,
e-mail: baharevdn_82@mail.ru;
Сергей Федорович Вольвак,
кандидат технических наук, профессор кафедры,
e-mail: volvak.s@yandex.ru

Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, Российская Федерация

Реферат. Отметим роль процесса сушки в технологии послеуборочной обработки семян бахчевых культур. Для повышения эффективности сушки высоковлажных семян предложили конструкцию установки, в которой реализован принцип дифференцированного подвода тепла к принудительно перемешиваемому слою семян. Обосновали необходимость уточнения размерных, фрикционных и аэродинамических свойств семян тыквы для определения рациональных режимов работы предложенной сушилки. *(Цель исследования)* Установить физико-механические свойства семян тыквы по результатам определения их размерных, фрикционных и аэродинамических характеристик. *(Материалы и методы)* Использовали методы однофакторного экспериментального исследования с последующей статистической обработкой массива данных. Экспериментально изучались физико-механические свойства семян тыквы сорта Волжская серая с кондиционной влажностью 9,3-9,7 процентов. При определении угла естественного откоса и уточнении коэффициентов трения применялись общеизвестные лабораторные установки типа «коническая емкость» и «наклонная плоскость». При изучении аэродинамических свойств семян был использован парусный классификатор *K-293 Petkus*. *(Результаты и обсуждение)* Разработали методики исследования и описали экспериментальные установки. Установили, что с доверительной вероятностью 0,95 статические коэффициенты трения семян тыквы по сплошному стальному полотну, перфорированному стальному решетку и по резине составляют 0,473, 0,418, 0,481, соответственно, а динамические коэффициенты трения в этих же условиях – 0,331, 0,293, 0,337. Среднее значение угла естественного откоса семян – 22 градуса, миделево сечение – 97,94 миллиметров квадратных, скорость витания – 7,083 метра в секунду, коэффициент парусности – 0,196 и коэффициент аэродинамического сопротивления – 0,136. *(Выводы)* Подтвердили предположение, что повысить эффективность сушки семян бахчевых культур возможно путем дифференцированного подвода тепловой энергии к непрерывно перемещающейся массе внутри установки, при условии исключения слипания семян в слои, блокирующие прохождение теплоносителя. Разработали усовершенствованную конструкцию сушилки и для обоснования ее оптимальных конструктивно-технологических параметров исследовали размерные, фрикционные и аэродинамические свойства семян.

Ключевые слова: сушилка, конструкция, дифференцированный подвод тепла, семена тыквы, физико-механические, аэродинамические свойства.

■ **Для цитирования:** Пастухов А.Г., Добрицкий А.А., Бахарев Д.Н., Вольвак С.Ф. Исследование физико-механических свойств семян тыквы как объекта сушки // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №1. С. 52-59. DOI 10.22314/2073-7599-2024-18-1-52-59. EDN: HXSFXP.

Scientific article

Physico-Mechanical Properties of Pumpkin Seeds in the Context of Drying Processes

Alexander G. Pastukhov,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: pastukhov_ag@mail.ru;
Alexander A. Dobritskiy,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: dobrickiy_aa@bsaa.edu.ru

Dmitriy N. Bakharev,
Dr.Sc.(Eng.), associate professor,
e-mail: baharevdn_82@mail.ru;
Sergey F. Volvak,
Ph.D.(Eng.), professor,
e-mail: volvak.s@yandex.ru

Belgorod State Agricultural University named after V.Ya. Gorin, Mayskiy, Belgorod region, Russian Federation

Abstract. The paper highlights the significance of the drying process in post-harvest cucurbit seed treatment technology. To improve the effectiveness of drying high-moisture seeds, a plant construction design was introduced, incorporating the concept of providing varied heat distribution to a vigorously agitated seed layer. The paper validates the necessity of refining the dimensional, frictional, and aerodynamic properties of pumpkin seeds to determine the optimal operating modes for the proposed dryer. (*Research purpose*) To identify the physical and mechanical properties of pumpkin seeds by defining their dimensional, frictional and aerodynamic characteristics. (*Materials and methods*) The study employs one-factor experimental research methods with subsequent statistical data processing. An experimental study was conducted on the physical and mechanical properties of Volzhskaya Grey pumpkin seeds possessing a standard moisture content ranging between 9.3 and 9.7 percent. Well-known laboratory apparatuses, namely the «conical tank» and the «inclined plane», were used to determine the natural repose angle and to enhance the accuracy of friction coefficients determination. For analyzing the aerodynamic properties of the seeds, the K-293 Petkus air separator was employed. (*Results and discussion*) Research methods were developed and experimental plants were described. It was established that with a probability confidence level of 0.95, the static friction coefficients of pumpkin seeds on a solid steel sheet, a perforated steel sieve and on rubber are 0.473, 0.418, 0.481, respectively, and the dynamic friction coefficients under the identical conditions are measured as 0.331, 0.293, 0.337. The average angle of natural repose is found to be 22 degrees, the midsection area is 97.94 square millimeters, the soaring velocity is 7.083 meters per second, the windage coefficient stands at 0.196 and the aerodynamic drag coefficient is 0.136. (*Conclusions*) The assumption that enhancing the drying efficiency of vegetable seeds can be achieved by implementing a diverse thermal energy supply to continuously moving mass inside the apparatus is confirmed, provided that the seeds do not stick together in layers resulting in blockage of the coolant flow. An improved design of the dryer configurations has been developed and, to validate its optimum design and technological specifications, an in-depth analysis of the seeds' dimensional, frictional, and aerodynamic attributes has been conducted.

Keywords: dryer, design, differentiated heat supply, pumpkin seeds, physical and mechanical properties, aerodynamic properties.

■ **For citation:** Pastukhov A.G., Dobritskiy A.A., Bakharev D.N., Volvak S.F. Physico-mechanical properties of pumpkin seeds in the context of drying processes. *Agricultural machinery and technologies*. 2024.Vol. 18. N1. 52-59 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2024-18-1-52-59. EDN: HXSFXP.

Среди технологических процессов послеуборочной обработки бахчевых культур сушка семян наиболее сложная и ответственная, так как определяет качество и сроки хранения семян [1, 2]. Сложность заключается в трех проблемных явлениях. Во-первых, влажность свежесобранных семян, которая в зависимости от технологии выделения может достигать 90%. Во-вторых, поверхность неотмытого семени покрыта паро- и влагонепроницаемой пленкой, препятствующей тепломассообмену при сушке. В-третьих, семена во время сушки слипаются в слои, блокирующие прохождение теплоносителя.

Для решения данных проблем разработан экспериментальный образец сушильной установки (рис. 1). В ней семена опускаются сверху вниз, теряя влагу, а теплоноситель (нагретый воздух) движется противотоком снизу вверх, передавая тепловую энергию семенам, поглощает их влагу и отводится в атмосферу [3]. Более влажные семена, находящиеся в верхних секциях сушилки, обдуваются теплоносителем с наименьшей температурой, а к более сухим в нижних секциях сушильный агент поступает наиболее теплый, что исключает растрескивание оболочки семян. В результате формируется принцип дифференцированного подвода тепловой энергии к семенам [4].

Принцип действия установки показан на рисунке 2. Подробное описание приведено в [5].

Влажные семена через дозатор 1 поступают в секционную сушильную камеру 2. В состав установки входят: измерительный комплект 3 К-505, блок снятия энергетических показаний 4, автотрансформатор 5, мультиметр 6, пульт управления 7 и манометр 8. Температура теплоносителя в камере регулируется через блок контроля 9, показания с датчиков температуры выводятся на монитор 10.

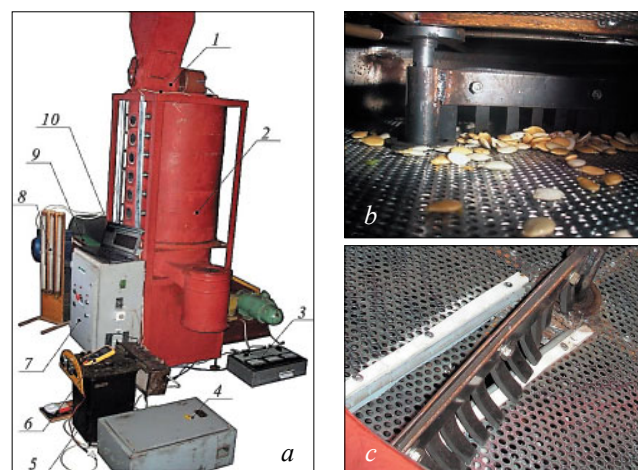


Рис. 1. Экспериментальное оборудование для сушки семян бахчевых культур: а – общий вид; б – внутренняя часть сушильной секции; в – гибкий элемент ворошилки слоя семян
Fig. 1. Experimental cucurbit seed dryer: a – general view of the experimental equipment; b – inner part of the drying section; c – flexible element of the seed layer tedder

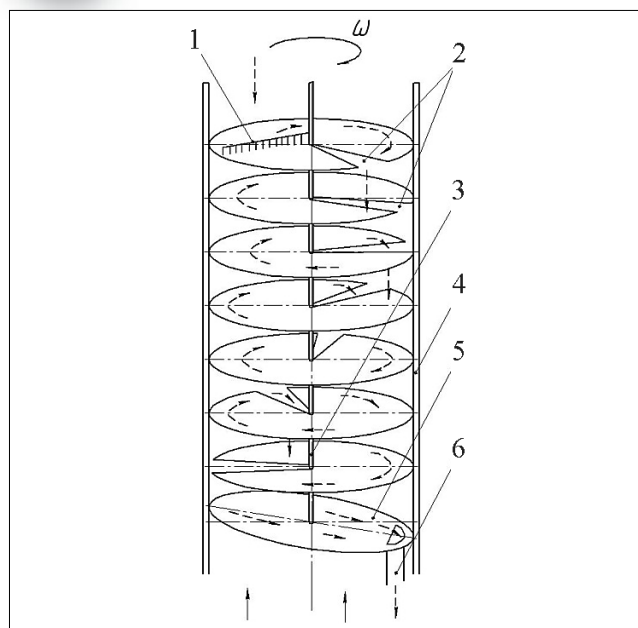


Рис. 2. Схема движения семян по неподвижным решетам сушилки: 1 – ворошилки; 2 – загрузочно-разгрузочные окна решета; 3 – вертикальный приводной вал ворошилок; 4 – цилиндрическая рама; 5 – наклонное газораспределительное решето; 6 – разгрузочный короб

Fig. 2. Movement path of seeds across stationary dryer screens: 1 – tedder; 2 – sieve loading and unloading ports; 3 – vertical tedder drive shaft; 4 – cylindrical frame; 5 – inclined gas distribution sieve; 6 – unloading box

Режим непрерывного движения семян по секциям сушилки, постоянно продуваемых восходящим потоком теплоносителя, и пересыпание семян с верхних на нижние решета под действием силы тяжести можно обеспечить, учитывая ряд физико-механических характеристик [6].

Для бахчевых культур важно знать: размерные характеристики семян, влажность, угол естественного откоса, статические и динамические коэффициенты трения по поверхностям из различных конструкционных материалов, скорость витания семян, коэффициент парусности и коэффициент аэродинамического сопротивления [7]. Важно отметить, что в данной области сформирована определенная база знаний, информативно и практически ценная для конструкторов сушилок и исследователей процесса сушки высоковлажных семян бахчевых культур [8]. Однако необходимо ее расширять путем исследований физико-механических свойств культур каждого вида и сорта, районированного в конкретной природно-климатической зоне. Это позволит отойти от практики весьма приближенных усреднений численных значений конкретного параметра сушки [9].

В рамках исследования изучались физико-механические свойства семян тыквы сорта Волжская серая, хорошо себя зарекомендовавшей в южных засушливых регионах России.

Цель исследований. Установить физико-механические свойства семян тыквы по результатам определения их размерных, фрикционных и аэродинамических характеристик. Поставлены задачи: определить статические и динамические коэффициенты трения по сплошной, перфорированной стальной поверхности и резине; установить угол естественного откоса; определить скорость витания и коэффициент парусности; рассчитать миделево сечение и коэффициент сопротивления семян тыквы Волжская серая.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Использованы методы однофакторного эксперимента с последующей статистической обработкой массива данных. Изучались физико-механические свойства семян с кондиционной влажностью 9,3-9,7%, которую контролировали влагомером Wile-55. При определении угла естественного откоса и уточнении коэффициентов трения использовались типовые лабораторные установки «коническая емкость» и «наклонная плоскость», а при исследовании аэродинамических свойств семян применялся парусный классификатор К-293 Petkus.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Коэффициенты статического и динамического трения семян тыквы сорта Волжская серая были определены на лабораторной установке типа «наклонная плоскость» (рис. 3).

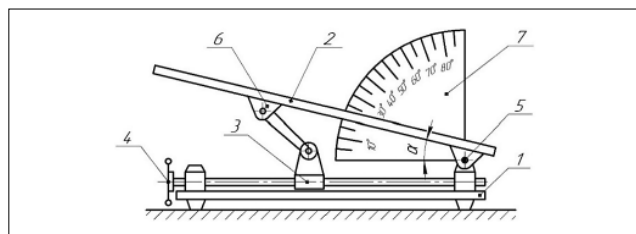


Рис. 3. Схема лабораторной установки для определения коэффициентов статического и динамического трения: 1 – плита; 2 – подвижная поверхность; 3 – механизм управления подвижной плоскостью; 4 – рукоятка винтового механизма; 5 – ось; 6 – опора; 7 – шкала

Fig. 3. Diagram of a laboratory apparatus for determining static and dynamic friction coefficients: 1 – plate; 2 – movable surface; 3 – movable plane control mechanism; 4 – screw mechanism handle; 5 – axis; 6 – support; 7 – scale

Статический коэффициент трения f_c определяется по углу наклона подвижной плоскости α , при котором семена только начинают сдвигаться (скользить) по поверхности [10]:

$$f_c = \operatorname{tg} \alpha. \quad (1)$$

Динамический коэффициент трения f_d определяют по углу наклона плоскости α_1 , при котором семена непрерывно скользят, и скорости движения по эмпирической зависимости [11]:

$$f_d = \operatorname{tg} \alpha_1 - \frac{2 \cdot S}{g \cdot t^2 \cdot \cos \alpha_1}, \quad (2)$$

где S – путь образца, пройденный по наклонной плоскости, $S = 0,4$ м; t – время движения образца по наклонной плоскости, с; α_1 – угол наклона плоскости, град; для исследований принят $\alpha_1 = \alpha + 10^\circ$.

Статический и динамический коэффициенты трения семян тыквы изучали при использовании различных материалов поверхности наклонной плоскости (рис. 4).



Рис. 4. Скольжение семян (слева-направо): по шлифованной стали, перфорированному стальному решетку, резине

Fig. 4. Friction of pumpkin seeds (left to right) on polished steel, perforated steel sieve, rubber

Угол естественного откоса семян определяли на лабораторной установке типа «коническая емкость» (рис. 5). Суть эксперимента заключается в определении высоты насыпного конуса H и радиуса его основания R (рис. 5а), а затем расчета коэффициента внутреннего трения и угла естественного откоса семян по известным выражениям.

Коэффициент внутреннего трения [12]:

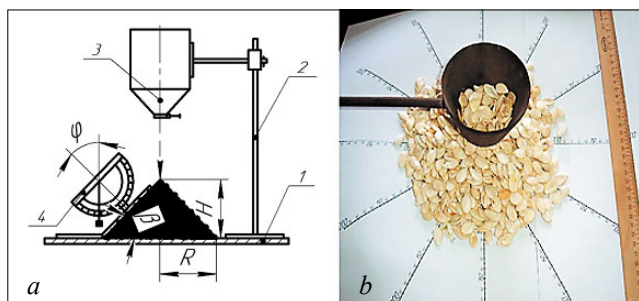


Рис. 5. Схема лабораторной установки для определения угла естественного откоса семян тыквы (а) и коэффициента внутреннего трения (б): 1 – плита; 2 – штатив; 3 – воронка; 4 – угломер

Fig. 5. Diagram of the laboratory plant for determining the angle of pumpkin seed natural repose (a) and internal friction coefficient (b): 1 – plate; 2 – tripod; 3 – funnel; 4 – goniometer

$$f = \operatorname{tg} \beta = H/R, \quad (3)$$

где β – угол естественного откоса, град; H – высота насыпного конуса семян, мм; R – радиус основания насыпного конуса, мм.

Угол естественного откоса [12]:

$$\varphi = \arctg f. \quad (4)$$

Скорость витания и коэффициент парусности семян тыквы определяли на парусном классификаторе $K-293$ Petkus (рис. 6).

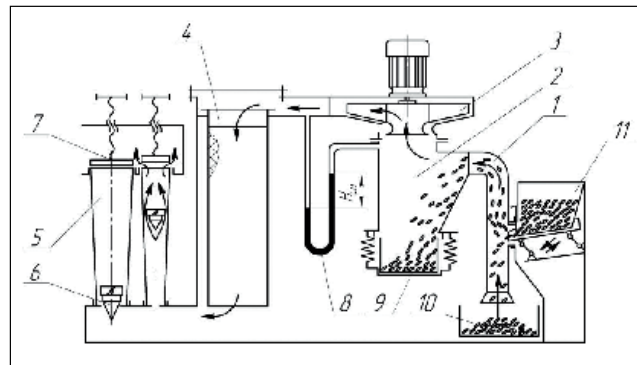


Рис. 6. Парусный классификатор $K-293$ Petkus: 1 – аэродинамическая труба; 2 – осадочная камера; 3 – вентилятор; 4 – фильтр; 5 – труба ротаметра; 6 – груз ротаметра; 7 – заслонка ротаметра; 8 – манометр гидростатический; 9 – приемник осадочной камеры; 10 – приемник аэродинамической трубы; 11 – бункер

Fig. 6. $K-293$ Petkus air separator: 1 – wind tunnel; 2 – sedimentary chamber; 3 – fan; 4 – filter; 5 – rotameter tube; 6 – rotameter load; 7 – rotameter flap; 8 – hydrostatic pressure gauge; 9 – sedimentary chamber receiver; 10 – wind tunnel receiver; 11 – hopper

Суть эксперимента заключается в разделении навески семян в вариационный ряд по парусности. Это позволяет рассчитать скорость витания семян V_k по известной формуле [13]:

$$V_k = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad (5)$$

где V_i – критическая скорость воздушного потока для семян i -й группы вариационного ряда, м/с; m_i – масса семян в i -й группе вариационного ряда, кг.

При этом коэффициент парусности [14]:

$$K_n = g/V_k^2, \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

Коэффициент аэродинамического сопротивления к определяется [15]:

$$\kappa = \frac{K_n \cdot m}{9,8 \cdot \gamma \cdot F}, \quad (7)$$

где m – масса семян, кг; γ – плотность семян, кг/м³; F – миделево сечение семян, м².

Миделево сечение семян характеризуется их эквивалентным размером l [16]:

$$F = l^2. \quad (8)$$

Эквивалентный размер семян [17]:

$$l = \sqrt[3]{abc}, \quad (9)$$

где a, b, c – длина, ширина, толщина семени, м [18].

Во всех экспериментах повторность опытов принималась такой, чтобы обеспечивалась доверительная вероятность не менее 0,95.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Значения коэффициентов трения семян тыквы Волжская серая по стали, перфорированному стальному решетку (диаметр перфораций 4 мм) и резине определены экспериментально по вышеописанной методике. Среднестатистический коэффициент трения f_c и динамический коэффициент трения f_d семян тыквы Волжская серая составляют:

- по стали соответственно 0,473 и 0,331;
- по перфорированному стальному решетку 0,418 и 0,293;
- по резине 0,481 и 0,337.

Угол естественного откоса семян тыквы Волжская серая рассчитан по выражению (4) на основании экспериментальных значений коэффициента внутреннего трения:

- средняя высота насыпного конуса H – 54,2 мм;
- средний коэффициент внутреннего трения f – 0,40;
- средний угол естественного откоса – 22,0 град.

Эквивалентный размер семян и миделево сечение определялись по выборке, отобранной методом деления квадрата из навески, загружаемой в парусный классификатор $K-293$ Petkus (табл. 1).

Размерные характеристики семян определяют геометрические параметры окон в решетках секций для пересыпания семян с верхнего уровня на нижний [19].

Изучение аэродинамических свойств семян тыквы осуществлялось с трехкратной повторностью для десяти размерно-массовых классов (табл. 2). Скорость витания определяет режимы подачи теплоносителя в сушилку [20]. По результатам экспериментального определения аэродинамических характеристик семян тыквы сорта Волжская серая

построена гистограмма и вариационная кривая скорости витания (рис. 7).

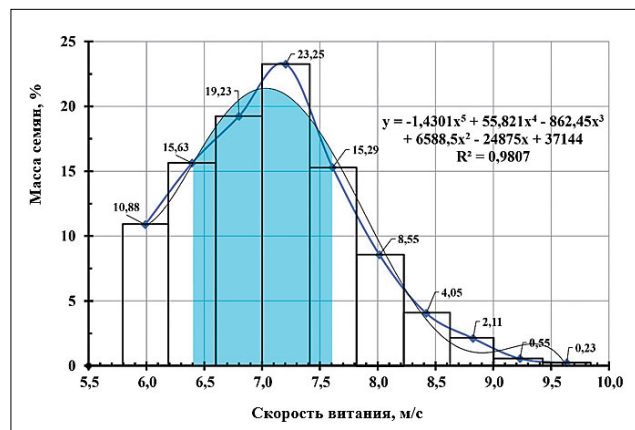


Рис. 7. Гистограмма и вариационная кривая скорости витания

Fig. 7. Histogram and variability curve of soaring speed

Анализ гистограммы и вариационной кривой дает основание считать, что интервал рациональных значений скорости витания семян тыквы сорта Волжская серая составляет 6,4–7,6 м/с. Средину данного интервала 7,083 м/с целесообразно использовать в практических расчетах при проектировании сушилок предлагаемой конструкции.

Значение коэффициента аэродинамического сопротивления 0,136 показывает, что сопротивление воздуха при витании семян тыквы не существенно, поэтому в процессе теоретического обоснования движения материала в сушилке данный параметр можно учитывать в виде комплексного поправочного коэффициента.

Выводы

- В результате лабораторных исследований установлены физико-механические свойства семян тыквы, что обуславливает фундамент для определе-

Таблица 1

Table 1

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОГО РАЗМЕРА СЕМЯН И МИДЕЛЕВА СЕЧЕНИЯ RESULTS OF DETERMINING THE SEED AND MIDSECTION EQUIVALENT SIZE

Номер зерна	Измеренный размер семени, мм			Средний размер семени, мм			Эквивалентный размер семян l , мм	Миделево сечение F , мм ²
1	20,00	12,40	4,80	20,01	11,96	4,05	9,90	97,94
2	21,00	12,45	3,95					
3	20,90	11,25	4,00					
4	20,10	11,75	3,70					
5	20,75	11,50	4,40					
6	19,85	12,75	3,90					
7	18,50	12,50	4,40					
8	19,15	11,00	3,40					
9	18,55	12,25	4,40					
10	21,25	11,75	3,55					

Таблица 2

Table 2

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕМЯН ТЫКВЫ ВОЛЖСКАЯ СЕРАЯ RESULTS OF DETERMINING THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF VOLZHSKAYA SERAYA PUMPKIN SEEDS										
Показатель	Номер класса (интервала)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Границы класса, м³/ч	50,0-53,5	53,5-57,0	57,0-60,5	60,5-64,0	64-67,5	67,5-71,0	71,0-74,5	74,5-78,0	78,0-81,5	81,5-85,0
Средняя критическая скорость класса, м/с	5,99	6,39	6,8	7,2	7,61	8,02	8,42	8,83	9,23	9,64
Первая повторность опыта										
Масса выделившейся фракции семян, г	8,5	37,82	43,31	51,44	30,95	16,29	7,66	3,35	0,65	0
Масса семян, %	4,25	18,91	21,66	25,72	15,48	8,15	3,83	1,68	0,33	0
Среднее по классу V_k , м/с	7,120									
Вторая повторность опыта										
Масса выделившейся фракции семян, г	28,14	39,00	32,56	45,78	19,89	18,67	10,23	2,72	1,64	0,7
Масса семян, %	14,07	19,50	16,28	22,89	9,95	9,34	5,12	1,36	0,82	0,35
Среднее по классу V_k , м/с	7,011									
Третья повторность опыта										
Масса выделившейся фракции семян, г	28,66	16,95	39,52	42,3	40,91	16,35	6,38	6,60	1,00	0,65
Масса семян, %	14,33	8,48	19,76	21,15	20,46	8,18	3,19	3,30	0,50	0,33
Среднее по классу V_k , м/с	7,117									
Средние показатели аэродинамических характеристик семян										
Середина интервала рациональных значений скорости витания V_k , м/с	7,083									
Коэффициент парусности K_n	0,196									
Коэффициент аэродинамического сопротивления K	0,136									

ния оптимальных конструктивно-технологических параметров сушилки.

• Экспериментально определены и уточнены значения физико-механических свойств семян:

- средние размерные параметры – длина 20,01 мм, ширина 11,96 мм, толщина 4,05 мм;
- миделево сечение – 97,94 мм²;

- статические коэффициенты трения семян по сплошному стальному полотну, перфорированному стальному решету и по резине составляют 0,473, 0,418, 0,481, а динамические коэффициенты трения – 0,331, 0,293, 0,337, соответственно;

- среднее значение угла естественного откоса семян – 22 град;

- среднее значение скорости витания – 7,083 м/с;
- коэффициент парусности – 0,196;
- коэффициент аэродинамического сопротивления – 0,136.

• Перспективы исследований в данной области определяются расширением перечня сортов тыквы по определению физико-механических свойств семян с целью обобщения экспериментальных данных применительно к разработке и совершенствованию сушилок семян бахчевых культур.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лобачевский Я.П., Пехальский И.А., Павлов С.А. Расчет изотермической сушки зерна // *Сельский механизатор*. 2019. N8. С. 22-23. EDN: OQXPP0.
2. Агеев П.С., Долгов В.И., Курдюмов В.И., Павлушин А.А. Обоснование теплоэнергетических параметров процесса контактной сушки зерна // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2022. N1(57). С. 6-11. DOI: 10.18286/1816-4501-2022-1-6-11. EDN: LMUVWK.
3. Dobrickiy A., Bakharev D., Pastukhov A., Volvak S. Experimental study of melon crop seed dryer productivity. *Engineering for Rural Development*. Jelgava. Latvia. Vol. 20. 2021. 157-162. DOI: 10.22616/ERDev.2021.20.TF032. EDN: UBVUEP.
4. Бабичева Е.Л., Рудобашта С.П., Сидельников И.И. Псевдооживление семян проса и гороха // *Агроинженерия*. 2021. N5(105). С. 13-19. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-5-13-19. EDN: PGZABT.
5. Добрицкий А.А., Вольвак С.Ф. Сушилка семян бахчевых культур // *Сельский механизатор*. 2019. N12.

- C. 20-21. EDN: ZZJCWT.
6. Дринча В.М., Ценч Ю.С. Эволюция зерно-семяочистительной техники в России // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №1. С. 24-33. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-1-24-33. EDN: NOOETW.
7. Davies R.M. Engineering properties of three varieties of melon seeds as potentials for development of melon processing machines. *Advance Journal of Food Science and Technology*. 2010. Vol. 2(1). 63-66.
8. Khodabakhshian R. Mechanical strength and physical behavior of pumpkin seed and its kernel. *Thai Journal of Agricultural Science*. 2011. Vol. 45(1). 37-43.
9. Гончаров А.В., Левшин А.Г., Гаспарян И.Н. Физико-механические свойства сортов и сортообразцов семян тыквы как основа совершенствования механизации возделывания // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2022. №1(66). С. 134-143. DOI: 10.24412/2078-1318-2022-1-134-143. EDN: MMDPJT.
10. Цепляев А.Н., Китов А.Ю. Физико-механические свойства плодов бахчевых культур // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2017. №3(47). С. 216-225. EDN: ZGYYFR.
11. Хозяев И.А., Чистяков А.Д., Царев Ю.А. и др. Устройство для определения динамического и статического коэффициентов трения сыпучих продуктов // *Инженерный вестник Дона*. 2019. №1(52). С. 18. EDN: WRTARW.
12. Черников В.Г., Ростовцев Р.А., Попов Р.А. и др. Определение коэффициентов трения стеблей льна по характеристикам шероховатости // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №1. С. 41-47. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-13-1-41-47. EDN: VUCSDA.
13. Зимин И.Б., Игнатенков В.Г., Яковлев М.А., Смирнов А.В. Экспериментальное исследование аэродинамических характеристик гранулированных сыпучих материалов // *Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020. №2(31). С. 29-33. EDN: LZPPMW.
14. Василенко В.В., Оробинский В.И., Василенко С.В., Посохов Д.Н. Взаимосвязь аэродинамических показателей фракций сыпучего материала // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2022. Т. 15. №4(75). С. 90-96. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2022_4_90. EDN: GATZVO.
15. Круглов А.И., Скорлупкин Д.Б., Сладков Д.В. Численное моделирование дозвукового обтекания цилиндрического тела. 2021. №3. С. 331-335. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-3-331-335. EDN: BDHRWF.
16. Василенко В.В., Оробинский В.И., Василенко С.В., Посохов Д.Н. Разброс значений коэффициента парусности семян пшеницы при аэродинамической сепарации // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2023. Т. 16. №2(77). С. 98-105. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2023_2_98. EDN: PZSDFM.
17. Шаршунов В.А., Сентюров Н.С., Цайц М.В. Определение размерных характеристик компонентов вороха льнокостры // *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020. №3. С. 169-175. EDN: HDGKHE.
18. Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н., Вольвак С.Ф., Добрицкий А.А. Определение коэффициента Пуассона и модуля Юнга внешней плодовой оболочки зерна кукурузы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №3. С. 20-26. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-3-20-26. EDN: KUELTH.
19. Жалнин Э.В., Чаплыгин М.Е. Динамика фракционного состава зерносомистой массы, обмолачиваемой в молотильном аппарате зерноуборочного комбайна // *Инженерные технологии и системы*. 2022. Т. 32. №2. С. 249-262. DOI: 10.15507/2658-4123.032.202202.249-262. EDN: YEJPDM.
20. Шаршунов В.А., Сентюров Н.С., Цайц М.В. Определение скорости витания компонентов вороха льнокостры // *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2021. №2. 171-175. EDN: UJTAED.

REFERENCES

1. Lobachevsky Ya.P., Pekhalsky I.A., Pavlov S.A. Calculation of isothermal drying of grain. *Selskiy mekhanizator*. 2019. №8. 22-23 (In Russian). EDN: OQXPPQ.
2. Ageev P.S., Dolgov V.I., Kurdyumov V.I., Pavlushin A.A. Justification of heat and energy parameters of contact drying process of grain. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2022. №1(57). 6-11 (In Russian). DOI: 10.18286/1816-4501-2022-1-6-11. EDN: LMUVWK.
3. Dobrickiy A.A., Bakharev D.N., Pastukhov A.G., Volvak S.F. Experimental study of melon crop seed dryer productivity. *Engineering for Rural Development*. 2021. Vol. 20. 157-162 (In English). DOI: 10.22616/ERDev.2021.20.TF032. EDN: UBVUEP.
4. Babicheva E.L., Rudobashta S.P., Sidelnikov I.I. Fluidization of millet and pea seeds. *Agricultural Engineering*. 2021. №5(105). 13-19 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-5-13-19. EDN: PGZABT.
5. Dobrickiy A.A., Volvak S.F. Dryer seeds melons crops. *Selskiy mekhanizator*. 2019. №12. 20-21. (In Russian). EDN: ZZJCWT.
6. Drincha V.M., Tsench Yu.S. Evolution of grain and seed cleaning equipment in Russia. *Agricultural machinery and technologies*. 2021. Vol. 15. №1. 24-33 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-1-24-33. EDN: NOOETW.
7. Davies R.M. Engineering properties of three varieties of melon seeds as potentials for development of melon processing machines. *Advance Journal of Food Science and Technology*. 2010. Vol. 2(1). 63-66 (In English).
8. Khodabakhshian R. Mechanical strength and physical behavior of pumpkin seed and its kernel. *Thai Journal of Ag-*

ricultural Science. 2011. Vol. 45(1). 37-43 (In English).

9. Goncharov A.V., Levshin A.G., Gasparyan I.N. Physical and mechanical properties of varieties and cultivar samples of pumpkin seeds as a basis for improving cultivation the mechanization. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian university*. 2022. N1(66). 134-143 (In Russian). DOI: 10.24412/2078-1318-2022-1-134-143. EDN: MMDPJT.
10. Tseplyaev A.N., Kitov A.Yu. Physico-mechanical properties of bahcheval crops fruits. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2017. N3(47). 216-225 (In Russian). EDN: ZGYYPF.
11. Khozyaev I.A., Chistyakov A.D., Tsarev Yu.A. et al. Device for determining the dynamic and static coefficients of bulk products. *Engineering Journal of Don*. 2019. N1(52). 18 (In Russian). EDN: WRTARW.
12. Chernikov V.G., Rostovtsev R.A., Popov R.A. et al. Calculation of the friction coefficients of flax stems according to their roughness characteristics. *Agricultural machinery and technologies*. 2019. Vol. 13. N1. 41-47 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2018-13-1-41-47. EDN: VUCSDA.
13. Zimin I.B., Ignatenkov V.G., Yakovlev M.A., Smirnov A.V. Experimental study of aerodynamic characteristics of granular bulk materials. *Izvestiya of Velikiye Luki State Agricultural Academy*. 2020. N 2(31). 29-33 (In Russian). EDN: LZPPMW.
14. Vasilenko V.V., Orobinsky V.I., Vasilenko S.V., Posokhov D.N. The relationship of aerodynamic parameters of fractions of bulk material. *Vestnik of Voronezh State Agrarian university*. 2022. Vol. 15. N4(75). 90-96 (In Russian). DOI: 10.53914/issn2071-2243_2022_4_90. EDN: GATZVO.
15. Kruglov A.I., Skorlupkin D.B., Sladkov D.V. Numerical simulation of subsonic flow around a cylindrical body. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*. 2021. N3. 331-335 (In Russian). DOI: 10.24412/2071-6168-2021-3-331-335. EDN: BDHRWF.
16. Vasilenko V.V., Orobinsky V.I., Vasilenko S.V., Posokhov D.N. Coefficient of sailing capacity of wheat seeds and its variations during aerodynamic separation. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2023. Vol. 16. N2(77). 98-105 (In Russian). DOI: 10.53914/issn2071-2243_2023_2_98. EDN: PZSDFM.
17. Sharshunov V.A., Sentyurov N.S., Tsaits M.V. Determination of the dimensional characteristics of the components of the flax pile. *Vestnik Belarusian State Agricultural Academy*. 2020. N3. 169-175 (In Russian). EDN: HDGKHE.
18. Pastukhov A.G., Bakharev D.N., Volvak S.F. et al. Estimating Poisson's ratio and Young's modulus of the outer fruit shell of corn grain. *Agricultural machinery and technologies*. 2022. Vol. 16. N3. 20-26 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-3-20-26. EDN: KUELTH.
19. Zhalnin E.V., Chaplygin M.E. Dynamics of the fractional composition of grain-and-straw mass being threshed in the threshing mechanism of a combine harvester. *Engineering Technologies and Systems*. 2022. Vol. 32. N2. 249-262 (In Russian). DOI: 10.15507/2658-4123.032.202202.249-262. EDN: YEJPDm.
20. Sharshunov V.A., Sentyurov N.S., Tsaits M.V. Determination of the soaring speed of flax heap components. *Vestnik Belarusian State Agricultural Academy*. 2021. N2. 171-175 (In Russian). EDN: UJTAED.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Пастухов А.Г. – общее научное руководство, определение основных направлений исследования, корректировка текста и оформление общих выводов;

Добрицкий А.А. – проектирование и изготовление конструкции сушилки, проведение лабораторных опытов, обработка массива экспериментальных данных, разработка графической части публикации;

Бахарев Д.Н. – проектирование конструкции сушилки, разработка методики лабораторных опытов, оформление текстовой части публикации;

Вольвак С.Ф. – обработка массива экспериментальных данных, оформление таблиц с результатами опытов, литературный анализ.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Pastukhov A.G. – general scientific guidance, definition of the main directions of research, correction of the text and formulation of general conclusions;

Dobrickiy A.A. – designing and manufacturing of the dryer structure, conducting laboratory experiments, processing an array of experimental data, developing the graphic part of the publication;

Bakharev D.N. – design of the dryer structure, development of methods of laboratory experiments, design of the text part of the publication;

Volvak S.F. – processing of an array of experimental data, design of tables with the results of experiments, literary analysis.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

07.07.2023

05.09.2023