

# ИЗУЧЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕМЯН РАПСА И ИХ КОМПОНЕНТОВ

**Резюме.** Семена рапса являются богатым источником не только масла, но и высокопротеиновых жмыха и шрота, используемых в кормлении сельскохозяйственных животных. Перед извлечением масла семена подвергаются шелушению с последующим выделением свободной плодовой оболочки в воздушном потоке. Для расчета соответствующего технологического оборудования необходимы достоверные данные об аэродинамических свойствах семян рапса и их компонентов — плодовой оболочки и ядра.

Экспериментальным путем установлено, что скорость витания семян рапса, выращенного в Калужской, Орловской, Тамбовской и Тульской областях, колеблется в диапазоне 6,44–9,82 м/с. Получены вариационные кривые скоростей витания, подчиняющиеся закону нормального распределения на уровне значимости 0,05. Показана возможность выделения частиц плодовой оболочки из фракционированной рушанки семян рапса в воздушном потоке. Эти результаты рекомендуется использовать при проектировании оборудования для обработки семян рапса воздушным потоком и разделения рушанки.

**Ключевые слова:** семена рапса, плодовая оболочка, ядро, скорость витания, вариационные кривые.

# STUDING AERODYNAMIC PROPERTIES OF RAPESEED SEEDS AND THEIR COMPONENTS

**Abstract.** Rapeseed is a rich source not only of oil but also of high-protein by-products such as oilcake and meal, which are widely used in animal nutrition. Prior to oil extraction, the seeds undergo dehulling followed by separation of the free hull fraction in an air flow. The design of appropriate technological equipment requires reliable data on the aerodynamic properties of rapeseed and its components, namely the hull and the kernel.

Experimental studies have shown that the terminal velocity of rapeseed cultivated in the Kaluga, Oryol, Tambov, and Tula regions ranges from 6.44 to 9.82 m/s. Variation curves of terminal velocities were obtained and were found to follow a normal distribution at a significance level of 0.05. The possibility of separating hull particles from fractionated dehulled rapeseed material in an air flow has been demonstrated. These results are recommended for use in the design of equipment for air-flow processing of rapeseed and separation of its dehulled fractions.

**Key words:** rapeseed, hull, kernel, terminal velocity, variation curves.

## ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии переработки семян рапса на растительное масло предусматривают получение высокопротеиновых жмыха или шрота при предварительном отделении части плодовой оболочки из рушанки на стадии подготовки масличного сырья к прессованию или экстракции. Нерафинированное рапсовое масло часто вводится в комбикорма [1], как и высокопротеиновые

жмых и шрот, которые также могут добавляться в кормовую смесь для крупного рогатого скота. В его рационе также используют отделенную плодовую оболочку после соответствующей обработки [2].

Промышленная технология переработки семян рапса, применяемая, например, в Канаде и ряде стран Европейского союза [3], включает процесс шелушения на специ-

УДК 665.334

Научная статья

DOI 10.69539/2413-287X-2026-04-2-268

**АНТОН ВИКТОРОВИЧ ДИДЕНКО<sup>1</sup>,**

ведущий инженер кафедры технологии жиров, косметики, товароведения, процессов и аппаратов

ORCID: 0009-0007-2922-0583

E-mail: didenko@outlook.com

**ВАЛЕНТИН ВИТАЛЬЕВИЧ ДЕРЕВЕНКО<sup>1</sup>,**

доктор технических наук, профессор

ORCID: 0009-0002-9546-6198

E-mail: ekotp@ekotp.ru

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ)

350072, Россия, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2

Поступила в редакцию: 24.02.2026

Одобрена после рецензирования: 22.04.2026

Принята в публикацию: 22.04.2026

UDC 665.334

Research article

DOI 10.69539/2413-287X-2026-04-2-268

**ANTON V. DIDENKO<sup>1</sup>,**

Leading Engineer, Department of Fat and Cosmetic Technology, Commodity Science, Processes and Apparatus (FCTCPA)

ORCID: 0009-0007-2922-0583

E-mail: didenko@outlook.com

**VALENTIN V. DEREVENKO<sup>1</sup>,**

Doctor of Technical Sciences, Professor

ORCID: 0009-0002-9546-6198

E-mail: ekotp@ekotp.ru

<sup>1</sup>Kuban State Technological University

350072, Russia, Krasnodar region, Krasnodar, st. Moskovskaya, 2

Received by editor office: 02.24.2026

Approved in revised: 04.22.2026

Accepted for publication: 04.22.2026

альной машине с последующим выделением из рушанки свободной плодовой оболочки в сито-воздушном сепараторе. Это позволяет получить шрот с содержанием сырого протеина не менее 44%.

В Германии фирмой «Шуле Мюленбау ГмбХ» предложена технологическая схема переработки семян рапса с разрушением плодовой оболочки и выделением свободной оболочки, содержащей около 13% сырого протеина на абсолютно сухое вещество, до 24% клетчатки и до 17% масла [2]. После экспандирования в свободной плодовой оболочке повышается перевариваемость клетчатки, что благоприятствует ее использованию в кормлении жвачных животных [2].

В Российской Федерации запатентованы способ и устройство для получения из семян рапса масла холодного отжима, экстракционного масла и концентрата рапсового белка [4]. В данной технологии достижение высокого качества продукции обеспечивается за счет обрушивания семян с последующим отделением свободной плодовой оболочки воздушным потоком в аспирационной колонке.

Существует также технология [5], предусматривающая предварительное фракционирование рушанки семян рапса на ситах с последующей обработкой в вертикальном пневмосепараторе [6]. После этого ядровая фракция подвергается влаготепловой обработке и отжиму из нее масла в пресс-экструдере [7].

Во всех применяемых способах подготовки семян рапса к извлечению масла с получением высокопротеиновых жмыха или шрота определяющим технологическим этапом является отделение части свободной плодовой оболочки из рушанки воздушным потоком. Поэтому при проектировании оборудования необходимы достоверные данные и зависимости, позволяющие с достаточной точностью для инженерной практики получить необходимую информацию об аэродинамических свойствах перерабатываемого материала [8, 9]. В основе прогнозирования возможности разделения семян и частиц рушанки в вертикальном воздушном потоке лежит оценка их скорости витания.

Исследования показали, что скорость витания, например, семян подсолнечника сорта Лакомка в зависимости от их массы, толщины и ширины изменялась в интервале от 4,5 до 9,8 м/с [10]. При этом выявлена следующая корреляционная связь скорости витания: высокая — с массой семянки (0,91), умеренная — с ее толщиной (0,77), слабая — с шириной (0,326). На основании полученных данных рекомендованы оптимальные режимы обработки семян подсолнечника сорта Лакомка для зерноочистительных машин [10].

В аналогичных исследованиях на семенах подсолнечника изучалась скорость витания частиц рушанки в зависимости от их линейных размеров [11, 12]. Установлено, что у семян заводской смеси скорость витания составляла 6,4–8,4 м/с. Скорость витания ( $V_{\text{вит.}}$ ) целых ядер и сечки, в зависимости от их среднего размера ( $d_{\text{ср.}}$ ), из сходовых фракций с сит с отверстиями диаметром 3, 4 и 5 мм из-

менялась от 5,0 до 9,8 м/с, что аппроксимировано следующей параболической зависимостью:

$$V_{\text{вит.}} = -0,145 d_{\text{ср.}}^2 + 2,09 d_{\text{ср.}} + 0,561.$$

Скорость витания частиц лузги, выделенных из сходовых фракций с сит с отверстиями диаметром 3; 4; 5; 6 и 7 мм, значительно ниже — 1,8–4,5 м/с. Для описания этой зависимости предложена ступенчатая функция:

$$V_{\text{вит.}} = 2,13 \text{ при } d_{\text{ср.}} < 5;$$

$$V_{\text{вит.}} = 3,29 \text{ при } 5 < d_{\text{ср.}} < 7;$$

$$V_{\text{вит.}} = 3,67 \text{ при } d_{\text{ср.}} > 7 \text{ [11, 12].}$$

На основании экспериментальных данных о скорости витания семян подсолнечника и лузги рассчитаны коэффициенты парусности: 0,14–0,24 м<sup>-1</sup> и 0,48–3,03 м<sup>-1</sup>, соответственно [12]. Полученные результаты успешно использованы при расчетах конструкции пневмосепараторов, предназначенных для разделения частиц рушанки семян подсолнечника воздушным потоком [13, 14].

При изучении аэродинамических характеристик семян тыквы сорта Штирийская масляная (влажностью 5,9%), выращенной на территории РФ, установлено, что диапазон скорости их витания от 8,4 до 11,9 м/с [15, 16]. При этом рассчитанный коэффициент парусности составляет 0,07–0,14 м<sup>-1</sup>, а коэффициент аэродинамического сопротивления — 0,15–0,38. Выявлено, что скорость витания семян тыквы имеет очень слабую корреляционную связь как с линейными размерами (от 0,039 до 0,084), так и с массой семян (0,173).

Известны также результаты исследований скорости витания семян льна влажностью ( $W$ ) 8,6–23,0%, она изменялась в интервале от 2,46 до 3,56 м/с [17]. Отмечена высокая степень корреляции между этими параметрами (0,998). Для расчета предложено уравнение:

$$V_{\text{вит.}} = 2,088 + 0,368 W.$$

Интересные данные получены при исследовании высоты подъема в пневмосепарирующих каналах частиц рушанки семян рапса сорта Юбилейный (средний диаметр 1,5 мм), выращенного в Кемеровской области [18]. После обрушивания семян фракционный состав рушанки был представлен частицами ядра, плодовой оболочкой и семенами. Установлено, что при высоте подъема от 100 до 900 мм (замеры проводились по высоте канала через каждые 100 мм) скорость воздушного потока составляла: для ядра — 3,62–10,0 м/с, плодовой оболочки — 0,9–4,3 м/с, семян — 9,51–16,48 м/с. На основании полученных данных была разработана конструкция многоканального пневмосепаратора, для которого рекомендована скорость воздушного потока в интервале от 7,0 до 7,3 м/с. Это обеспечивает содержание в конечном продукте до 92% ядра и до 5% плодовой оболочки.

Результаты по разделению воздушным потоком рушанки семян рапса, состоящей из разновеликих частиц (плодовая оболочка, ядра и семянки), применимы только для конкретной конструкции пневмосепаратора. Объем информации об их аэродинамических свойствах, необ-

ходимых при проектировании оборудования для сепарирования в воздушном потоке, крайне мало для инженерных расчетов.

Целью данной работы является исследование аэродинамических свойств семян рапса и его компонентов как объектов сепарирования в воздушном потоке — скорости витания и коэффициента парусности.

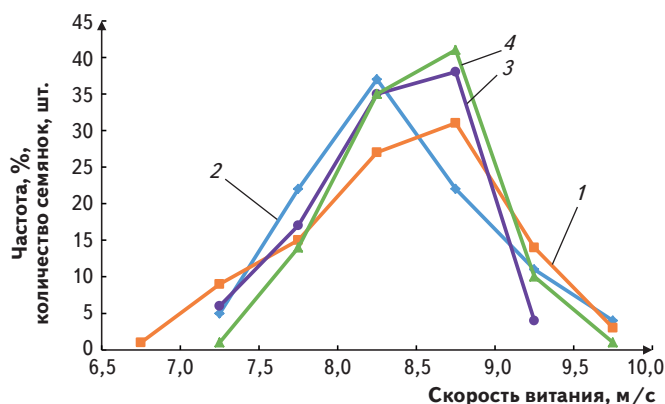
### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования были плодовая оболочка, сечка ядра и семена рапса урожая 2024–2025 гг., выращенного в Калужской, Орловской, Тамбовской и Тульской областях. Аэродинамические свойства изучались по приведенному алгоритму. После отбора пробы семян рапса согласно отраслевым требованиям [19] последовательно отсчитывали 100–105 шт. и с помощью электронного штангенциркуля измеряли диаметр каждой семянки с точностью до 0,01 мм. Затем семянку помещали через верхний срез на сетку, установленную в нижней части прозрачной вертикальной цилиндрической трубы из оргстекла с внутренним диаметром 50 мм и высотой 1 м. Нижний конец трубы был соединен трубопроводом с патрубком вентилятора марки Turphoon 125. Далее включали вентилятор и посредством регулятора устанавливали и фиксировали такую скорость воздушного потока, при которой частица находилась во взвешенном колебательном состоянии на участке не более 300 мм, расположенном на высоте, соответствующей половине длины трубы. Скорость воздуха в трубе измеряли термоанемометром марки DT-8880 при температуре 23–25°C. Эксперименты проводили в трехкратной повторности для объектов исследования, не вылетавших за пределы верхнего среза трубы. Максимальная погрешность измерения не превышала  $\pm 0,16$  м/с.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При расчете оборудования для сепарирования в воздушном потоке и обоснования оптимальной скорости воздуха необходима достоверная информация об основных аэродинамических характеристиках объекта обработки, таких как скорость витания, коэффициенты парусности и аэродинамического сопротивления.

На рисунке представлены экспериментальные данные в виде вариационных кривых скорости витания, где частота выражена в процентах от общего числа семян. Как видно, на интервал скорости 8,25–8,75 м/с приходится 70–75% семян рапса, выращенного в Орловской и Тамбовской областях, тогда как для образцов из Калужской и Тульской областей этот показатель составляет около 60 и 55%, соответственно. Наибольший диапазон значений (от 6,25 до 9,75 м/с) характерен для семян рапса из Калужской области, наименьший (от 7,5 до 9,25 м/с) — из Орловской. Для семян рапса сорта Юбилейный, выращенного в Кемеровской области, согласно литературным данным, скорость витания колеблется от 9,51 до 16,48 м/с при среднем диаметре семянок 1,5 мм [18]. Такие различия, вероятно, обусловлены агроклиматическими условиями выращивания культуры.



**Вариационные кривые скорости витания семян рапса, выращенного в областях:**

1 — Калужской, 2 — Тульской, 3 — Орловской, 4 — Тамбовской

Для оценки фактического и теоретического распределения частот средней скорости витания семян рапса по их классам вариационного ряда использовали критерий «хи-квадрат» [20]. Расчеты показали, что его значение ниже критического уровня при значимости 0,05 и числе степеней свободы  $K = 3$  ( $K = m - s - 1$ , где  $m$  — число интервалов,  $s$  — число оцениваемых параметров распределения, для нормального распределения  $s = 2$ ).

### Скорость витания и коэффициент парусности частиц ядра и плодовой оболочки рушанки семян рапса сходовых фракций

Объект исследования, фракция	Параметр	Область		
		Калужская	Орловская	Тамбовская
Частицы ядра, сход с сита с отверстиями $\varnothing$ 2 мм	$V_{\text{вит.}}$ , м/с	5,12–6,14	4,78–5,61	4,80–5,85
	$K_{\text{п.}}$ , м <sup>-1</sup>	0,36–0,26	0,43–0,31	0,43–0,29
Частицы оболочки, сход с сита с отверстиями $\varnothing$ 2 мм	$V_{\text{вит.}}$ , м/с	2,67–4,10	2,46–3,85	2,69–4,00
	$K_{\text{п.}}$ , м <sup>-1</sup>	1,38–0,58	1,62–0,66	1,35–0,61
Частицы ядра, сход с сита с отверстиями $\varnothing$ 1 мм	$V_{\text{вит.}}$ , м/с	4,28–5,26	4,15–5,44	4,60–5,65
	$K_{\text{п.}}$ , м <sup>-1</sup>	0,55–0,36	0,57–0,33	0,46–0,31
Частицы плодовой оболочки, сход с сита с отверстиями $\varnothing$ 1 мм	$V_{\text{вит.}}$ , м/с	2,15–2,69	2,22–3,09	2,06–3,03
	$K_{\text{п.}}$ , м <sup>-1</sup>	2,12–1,35	1,99–1,03	2,31–1,07

Это свидетельствует о том, что полученные вариационные кривые скоростей витания семян рапса подчиняются закону нормального распределения. Также установлена статистически значимая положительная корреляция между скоростью витания и диаметром семян, находящаяся в пределах 0,55–0,61.

В таблице (для трех областей) приведены интервалы значений скорости витания  $V_{\text{вит.}}$  и коэффициентов парусности  $K_p$  для частиц плодовой оболочки и ядра семян рапса, выделенных из сходовых фракций рушанки, полученной после обрушивания в центробежной рушке [21].  $K_p$  — важная аэродинамическая характеристика, позволяющая более полно описать поведение частиц в воздушном потоке. Данный коэффициент рассчитывается по известной зависимости [8].

Рушанку разделяли на ситах с отверстиями диаметром 1 и 2 мм с получением сходовых фракций, из которых были выбраны частички плодовой оболочки и ядра в количестве 8–10 шт. с минимальными и максимальными размерами. Сравнение значений скорости витания показало, что частицы оболочки ( $V_{\text{вит.}}$  от 2,06 до 3,09 м/с) и ядра ( $V_{\text{вит.}}$  от 4,15 до 5,65 м/с), выделенные из сходовых фракций с сита с отверстиями диаметром 1 мм могут быть эффективно разделены воздушным потоком со

скоростью 3,5 м/с. Если сопоставить значения скорости витания частиц плодовой оболочки ( $V_{\text{вит.}}$  от 2,67 до 3,85 м/с) и ядра ( $V_{\text{вит.}}$  от 4,78 до 6,14 м/с), оставшихся на сите с отверстиями диаметром 2 мм, то, как видим, их разделение возможно при скорости воздушного потока 4,5 м/с. Таким образом, показана технологическая возможность разделения рушанки семян рапса в оборудовании с применением вертикального воздушного потока.

## ВЫВОДЫ

Экспериментально исследована скорость витания плодовой оболочки, ядра и семян рапса, выращенного в Калужской, Орловской, Тамбовской и Тульской областях. Получены вариационные кривые скоростей витания семян, которые при уровне значимости 0,05 подчиняются закону нормального распределения. Установлено, что из фракционированной рушанки семян рапса, разделенной на ситах с отверстиями диаметром 1 и 2 мм, возможно выделение частиц свободной плодовой оболочки в воздушном потоке при скорости соответственно 3,5 и 4,5 м/с. Значения скорости витания и коэффициент парусности рекомендуется использовать при расчетах пневмосепарирующего оборудования для обработки рушанки семян рапса.

### Литература/Literature

1. Горковенко, Л. Г. Использование рапса и продуктов его переработки в кормлении свиней и мясной птицы / Л. Г. Горковенко, Д. В. Осепчук. — Краснодар: Северо-Кавказский научно-исследовательский институт животноводства, 2011. — 192 с.
2. Линденбек, М. Оптимизация обработки семян рапса / М. Линденбек // Комбикорма. — 2015. — № 9. — С. 47–50.
3. Frank D. Gunstone. Rapeseed and Canola Oil: Production, Processing, Properties and Uses / D Frank. — Wiley-Blackwell, 2004. — P. 107–136.
4. Патент № 2788094 С1 Российская Федерация, МПК С11В 1/10. Способ и устройство для промышленного производства рапсового масла и концентрата рапсового белка из рапсового семени / В. Ноймюллер // БИПМ. 16.01.2023. Бюл. № 2.
5. Диденко А. В. Технологическая линия переработки семян рапса с отделением плодовой оболочки и получения высокопротеинового жмыха / А. В. Диденко, В. В. Деревенко // Наука и Образование. — 2021. — Т. 4. — № 2. — С. 28–32.
6. Патент на изобретение 2689004 РФ, МПК С11В 1/10. Пневмосепаратор для отделения плодовой оболочки из рушанки масличных семян / В. В. Деревенко, А. В. Диденко // БИПМ. 23.05.2019.
7. Патент на полезную модель 18711 РФ, МПК С11В 1/10. Двухчервячный пресс-экструдер для отжима масла из масличного материала / В. В. Деревенко // БИПМ. 10.07.2001.
8. Малис, А. Я. Машины для очистки зерна воздушным потоком / А. Я. Малис, А. Р. Демидов. — Москва: Машгиз, 1962. — 175 с.
9. Веденев, В. Ф. Процесс сепарирования зерна от примесей, отличающихся аэродинамическими свойствами. Теоретические основы пищевых технологий. Кн. 1 / В. Ф. Веденев, Е. В. Семенов, Д. Ю. Чернышев. — М.: КолоС, 2009. — С. 366–395.
10. Шафоростов, В. Д. Влияние толщины, ширины и индивидуальной массы семян подсолнечника на скорость витания / В. Д. Шафоростов, И. Е. Припоров // Масличные культуры. — 2010. — Вып. 1. — С. 142–147.
11. Деревенко, В. В. Аэродинамические характеристики семян современных сортов подсолнечника и их плодовой оболочки / В. В. Деревенко, Г. А. Глуценко, Ю. Ю. Ткаченко // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. — 2010. — № 2–3. — С. 116–117.
12. Глуценко, Г. А. Совершенствование и моделирование процесса пневмосепарирования рушанки подсолнечных семян: специальность 05.18.12 «Процессы и аппараты пищевых производств»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Г. А. Глуценко. — Краснодар, 2012. — 21 с.
13. Патент на полезную модель 78794 РФ, МПК С11В 1/10. Пневмосепаратор / В. В. Деревенко, Г. А. Глуценко // БИПМ. 10.12.2008.
14. Патент № 2397027 РФ, МПК С11В 1/10. Пневмосепаратор для отделения аэроносимых частиц / В. В. Деревенко, Г. А. Глуценко // БИПМ. 20.08.2010.
15. Деревенко, В. В. Аэродинамические свойства семян тыквы штирийская масляная / В. В. Деревенко, А. С. Коробченко, И. Н. Аленкина // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. — 2010. — № 2–3. — С. 115–116.
16. Деревенко, В. В. Физико-механические и аэродинамические характеристики семян тыквы / В. В. Деревенко, А. С. Коробченко, И. Н. Аленкина // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». — 2010. — № 1. — С. 115.
17. Eissa, A. Aerodynamic and solid flow properties for flaxseeds for pneumatic separation by using air stream / A. Eissa, A. Hafiz // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. — 2009. — Vol. 2. — No 4. — P. 31–45.
18. Рензьяев, А. О. Пневмосепаратор для разделения зерновых материалов / А. О. Рензьяев, О. П. Рензьяев, А. Ф. Сорокопуд // Техника и технология пищевых производств. — 2013. — № 1. — С. 1–5.
19. Руководство по методам исследования теххимическому контролю и учету производства в масложировой промышленности. Том 2 / Под ред. В. П. Ржехина, А. Г. Сергеева. — Л.: 1965. — 419 с.
20. Плохинский, Н. А. Биометрия / Н. А. Плохинский. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. — 367 с.
21. Диденко, А. В. Влияние параметров центробежного обрушивания семян рапса на фракционный и компонентный составы рушанки / А. В. Диденко, В. В. Деревенко / Комбикорма. — 2025. — № 11. — С. 28–32. ■