

4.3.1. ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 631.162.3

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2026_2_79

EDN: JAZJAA

Определение энергоэффективности методов регулирования скорости воздуха в вертикальном пневмоканале для реализации системы автоматического управления в зерноочистительных машинах и воздушно-решетных сепараторах

Дмитрий Сергеевич Тарабрин^{1✉}, Вячеслав Анатольевич Гулевский²,
Владимир Иванович Оробинский³, Сергей Николаевич Савушкин⁴

^{1, 4} Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Рамонский район, Воронежская область, Россия

^{2, 3} Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Воронеж, Россия

¹ tarabrinds@yandex.ru✉

Аннотация. Представлены результаты анализа методов регулирования скорости воздушного потока в вертикальном пневмосепарирующем канале послерешетной аспирации воздушно-решетных сепараторов. Проведена оценка энергоэффективности таких основных способов регулировки, как изменение частоты вращения вентилятора, дросселирование поворотной заслонкой и холостой подсос воздуха через регулируемое окно. Методология основана на экспериментальных исследованиях на лабораторной установке с измерением скорости воздуха, расхода, потерь давления и мощности, потребляемой вентилятором при различных режимах. Предложена лабораторная установка для определения параметров работы послерешетной аспирации, оснащенная всасывающим окном с регулировочной заслонкой и дроссельной заслонкой с изменяемым углом наклона от 0 до 75°. Установлено, что частотное регулирование обеспечивает линейную зависимость скорости от частоты вращения и снижение мощности с 0,144 до 0,025 кВт при уменьшении скорости с 7,8 до 4,1 м/с, демонстрируя высокую энергоэффективность и точность настройки. Дроссельное регулирование приводит к росту мощности до 0,318 кВт при снижении скорости всего до 4,1 м/с вследствие увеличения сопротивления, что делает метод нерациональным. Холостой подсос позволяет снизить мощность до 0,098 кВт при уменьшении скорости до 4,5 м/с, обеспечивая умеренную энергоэффективность и плавное регулирование. Результаты исследования применимы при разработке систем автоматического управления скоростью воздуха в зерноочистительных машинах и воздушно-решетных сепараторах. Показано, что оптимальным решением является комбинированное использование частотного регулирования в качестве основного метода и холостого подсоса для точной настройки параметров воздушного потока.

Ключевые слова: вертикальный пневмоканал, регулирование скорости воздуха, энергоэффективность, частотное регулирование, дросселирование, холостой подсос воздуха, воздушно-решетный сепаратор

Для цитирования: Тарабрин Д.С., Гулевский В.А., Оробинский В.И., Савушкин С.Н. Определение энергоэффективности методов регулирования скорости воздуха в вертикальном пневмоканале для реализации системы автоматического управления в зерноочистительных машинах и воздушно-решетных сепараторах // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2026. Т. 19, № 2(89). С. 79–89. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2026_2_79–89.

4.3.1. TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT FOR AGROINDUSTRIAL COMPLEX (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

Determination of energy efficiency of methods for regulating air velocity in a vertical pneumatic channel for the implementation of an automatic control system in grain cleaning machines and air-sieve separators

Dmitry S. Tarabrin^{1✉}, Vyacheslav A. Gulevsky²,
Vladimir I. Orobinsky³, Sergey N. Savushkin⁴

^{1, 4} All-Russian Research Institute of Plant Protection, Ramonsky District, Voronezh Oblast, Russia

^{2, 3} Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

¹ tarabrinds@yandex.ru✉

Abstract. The results of the evaluation of methods for regulating the air flow velocity in the vertical pneumatic separation channel of the post screen aspiration of air-sieve separators are presented. An assessment of the energy efficiency of such basic control methods as changing the fan speed, pressure reduction by rotary flap and idle air intake through an adjustable window has been carried out. The methodology is based on experimental studies in a laboratory installation with measurements of air velocity, flow rate, pressure loss and fan power consumption in various modes. A laboratory installation is proposed for determining the parameters of post screen aspiration operation, equipped with a suction window with an adjustment flap and a throttle valve with a variable tilt angle from 0° to 75°. It has been found that frequency control provides a linear dependence of speed on rotational velocity and a reduction in power from 0.144 to 0.025 kW with a decrease in speed from 7.8 to 4.1 m/s, demonstrating high energy efficiency and tuning accuracy. Throttle control leads to an increase in power to 0.318 kW with a decrease in speed to 4.1 m/s due to an increase in resistance, which makes the method irrational. The idle suction reduces power to 0.098 kW while reducing speed to 4.5 m/s, providing moderate energy efficiency and smooth regulation. The research results are applicable in the development of automatic air velocity control systems in grain-cleaning machines and air-sieve separators. It is shown that the optimal solution is the combined use of frequency control as the main method and idle suction for fine-tuning the air flow parameters.

Keywords: vertical pneumatic channel, airflow velocity control, energy efficiency, frequency control, pressure reduction, idle air suction, air-screen separator

For citation: Tarabrin D.S., Gulevsky V.A., Orobinsky V.I., Savushkin S.N. Determination of energy efficiency of methods for regulating air velocity in a vertical pneumatic channel for the implementation of an automatic control system in grain cleaning machines and air-sieve separators. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2026;19(2):79-89. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2026_2_79-89.

В настоящее время самым распространенным и эффективным методом очистки семян от примесей является сортировка воздушным потоком [1–5, 7]. Пневмосепарация применяется в большинстве аспирационных и воздушно-решетных сепараторов. Конструкция аспирационных систем таких сепараторов предусматривает ручную регулировку скорости воздушного потока в пневмоканалах [7–9]. Ведущие мировые производители широко применяют механические методы регулировки — дроссельные заслонки и шиберы [10]. Современные производители зерноочистительной техники активно внедряют метод регулирования скорости воздушного потока в пневмоканалах за счет изменения частоты вращения вентилятора [6]. В этом случае для изменения скорости вращения вентилятора обычно используют преобразователь частоты электрического тока [4].

Так же как и зарубежные производители, отечественные сельхозмашиностроители в зерноочистительной технике используют для настройки параметров аспирации как частотное регулирование, так и регулировочные заслонки [11, 15]. Следует отметить, что настройка и корректировка параметров воздушной очистки на большинстве машин осуществляется оператором вручную, под каждую культуру. Однако одним из передовых производителей зерноочистительных машин из Дании, компанией Westrup, разработана и внедрена система NAVIGATOR, которая позволяет автоматически устанавливать и поддерживать параметры очистки [13].

Закрытость информации иностранных разработчиков относительно автоматического регулирования параметров воздушного потока в пневмосепарирующих каналах не позволяет российским производителям внедрять такие технические решения. С учетом вышеизложенного с целью разработки отечественной системы автоматического регулирования параметров аспирационной очистки семян актуальным является определение оптимальных методов регулировки воздушного потока.

Для исследования характеристик системы воздушной очистки послерешетной аспирации современных двухаспирационных воздушно-решетных сепараторов в лаборатории механизации защиты растений ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений» разработана и изготовлена лабораторная установка (рис. 1).

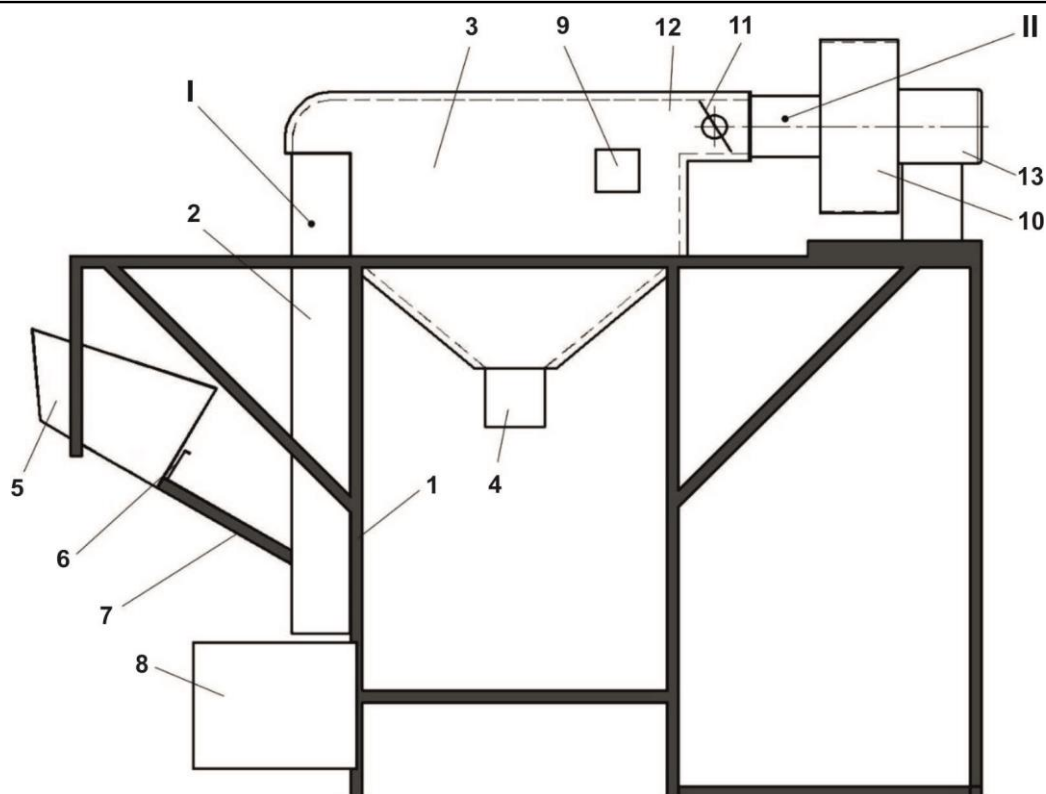


Рис. 1. Схема лабораторной установки для определения параметров работы вертикального пневмосепарирующего канала: I – место замера характеристик пневмосепарирующего канала; II – место замера характеристик пневмосистемы; 1 – сварная рама; 2 – вертикальный пневмоканал; 3 – осадочная камера; 4 – съемный бункер; 5 – загрузочный бункер; 6 – регулируемая задвижка; 7 – лоток; 8 – емкость для сбора обработанного материала; 9 – окно; 10 – вентилятор; 11 – дроссельная заслонка; 12 – горизонтальный пневмоканал; 13 – электропривод

Лабораторная установка, предназначенная для определения параметров работы вертикального пневмосепарирующего канала, смонтирована на сварной раме 1 и имеет вертикальный пневмосепарирующий канал 2, осадочную камеру 3, центробежный вентилятор 10 с электроприводом 13, всасывающее окно с регулировочной заслонкой 9, дроссельную заслонку 11 с изменяемым углом наклона, сборник отходов 4 и загрузочный бункер 5 с подающим лотком 7. Площадь поперечного сечения вертикального пневмоканала составляет 280 см² [5, 14, 15].

Была выполнена сравнительная оценка энергоэффективности следующих трех основных способов регулировки:

- изменение частоты вращения вентилятора;
- дросселирование поворотной заслонкой;
- холостой подсос воздуха через регулируемое окно.

Ключевым параметром для оценки методов регулирования принята энергоэффективность, которая выражается в потребляемой мощности вентилятора N для создания необходимого воздушного потока.

$$N = \frac{Q \cdot \Delta P}{\eta},$$

где Q – расход воздуха, м³/с);

η – КПД вентилятора (0,6–0,8);

ΔP – сопротивление пневмосистемы, Па.

Ввиду особенности протекания физических процессов при регулировке скорости воздушного потока в пневмосистеме, а именно при дросселировании воздуха, в пневмоканале создается дополнительное сопротивление, а при создании холостого подсоса воздуха сопротивление снижается за счет увеличения площади всасывания воздуха [16]. В связи с этим для определения энергоэффективности регулировки скорости воздушного потока в пневмоканале с помощью многофункционального прибора Testo 435 измеряли полное давление пневмосистемы перед вентилятором II (рис. 1).

Изменение скорости воздушного потока при изменении частоты вращения вентилятора обусловлено прямой зависимостью объемного расхода воздуха от частоты вращения вентилятора. При увеличении частоты вращения количество передаваемого воздуха (то есть объемный расход воздушного потока за короткий промежуток времени) значительно возрастает. Мгновенная скорость воздуха также увеличивается пропорционально увеличению объемного расхода. Для изменения рабочей частоты вращения вентилятора использовали частотный преобразователь электрического тока ELHART EMD-MINI-015 T [12]. Изменяя частоту электрического тока, регулировали число оборотов ротора асинхронного трехфазного двигателя мощностью 0,6 кВт и номинальной частотой вращения 2950 об/мин.

В процессе исследования эффективности регулирования скорости воздуха в пневмосепарирующем канале изменяли частоту вращения ротора вентилятора с 2900 до 1500 об/мин, при этом измеряли скорость воздушного потока в пневмосепарирующем канале и сопротивление пневмосистемы при каждом снижении частоты вращения вентилятора на 200 об/мин.

Для определения эффективности регулирования скорости воздушного потока за счет холостого подсоса воздуха в осадочной камере лабораторной установки выполнено всасывающее окно 9 (рис. 1).

Для равномерного регулирования объема холостого подсоса воздуха на окне смонтирована рамка с пятью щелями высотой 160 мм и шириной 20 мм, расположенными через равные промежутки. Регулировка осуществлялась сдвижной заслонкой, которая имеет такие же по размерам щели, но в закрытом состоянии они расположены в шахматном порядке относительно рамки, за счет чего полностью перекрывают окно холостого подсоса воздуха.

При полностью открытой заслонке площадь холостого подсоса составляет 160 см². Регулировка скорости воздуха будет происходить за счет увеличения или уменьшения площади сечения окна.

При изменении площади холостого подсоса воздуха прибором Testo 435 с помощью трубки Пито-Прандтля в зоне сепарации пневмоканала I (рис. 1) замеряли скорость воздушного потока, а также значение полного давления всей пневмосистемы.

Для определения эффективности изменения скорости воздуха в аспирационном канале за счет дросселирования в пневмосистеме перед вентилятором была установлена поворотная заслонка 11, перекрывающая горизонтальный отрезок 12 (рис. 1). При изменении ее положения создается дополнительное сопротивление, в результате чего скорость воздуха в пневмоканале снижается. При этом угол поворота заслонки от полностью открытой до полностью закрытой составляет 75°.

В ходе эксперимента поворачивали заслонку с шагом в 10°, измеряя скорость воздуха в канале и сопротивление пневмосистемы в целом.

Таблица 1. Изменение площади сечения при изменении угла наклона дроссельной заслонки

Угол, °	0	10	20	30	40	50	60	70	75
Площадь, см ²	280	234	184	138	954	592	295	80	0

Для численной оценки на основании полученных результатов рассчитана потребляемая мощность вентилятора и определена точность регулирования при различных методах изменения скорости воздушного потока в аспирационном канале.

Сравнение методов регулировки скорости воздуха в вертикальном пневмоканале

В рамках исследования методов регулирования скорости воздушного потока в пневмосепарирующем канале определены скорость воздушного потока в вертикальном пневмоканале, сопротивление и объемный расход воздуха пневмосистемы. По принятой методике на основании результатов измерений характеристик пневмосистемы рассчитана мощность, потребляемая вентилятором на создание воздушного потока при различных параметрах регулирующих устройств.

В таблице 2 представлены результаты исследования регулирования скорости воздуха в пневмоканале за счет изменения частоты вращения вентилятора (n , об/мин).

При максимальном значении частоты вращения вентилятора (2900 об/мин) наблюдается наивысшая скорость воздушного потока (7,8 м/с) при расходе 1123 м³/ч и сопротивлении 208 Па. Потребляемая мощность в этом режиме составляет 0,144 кВт. По мере снижения частоты вращения вентилятора отмечается закономерное уменьшение всех исследуемых параметров.

Таблица 2. Параметры работы пневмосистемы в зависимости от изменения частоты вращения вентилятора

Частота вращения вентилятора, об/мин	Скорость воздуха, м/с	Расход воздуха, м ³ /ч	Потери давления, Па	Мощность вентилятора, кВт
2900	7,8	1123	208	0,144
2700	7,1	1013	197	0,123
2500	6,9	941	170	0,099
2300	6,1	861	147	0,078
2100	5,6	785	125	0,061
1900	5,3	707	108	0,047
1700	4,6	629	89	0,035
1500	4,1	551	73	0,025

При снижении частоты до 2100 об/мин скорость потока уменьшается до 5,6 м/с, расход – до 785 м³/ч, сопротивление – до 125 Па, потребляемая мощность – до 0,061 кВт.

При минимальной исследованной частоте (1500 об/мин) зафиксированы следующие показатели:

- скорость – 4,1 м/с;
- расход – 551 м³/ч;
- сопротивление – 73 Па;
- мощность – 0,025 кВт.

Анализ результатов исследования параметров пневмосистемы показывает наличие устойчивой зависимости между частотой вращения вентилятора и основными характеристиками воздушного потока в вертикальном пневмоканале, что хорошо прослеживается на графике (рис. 2).

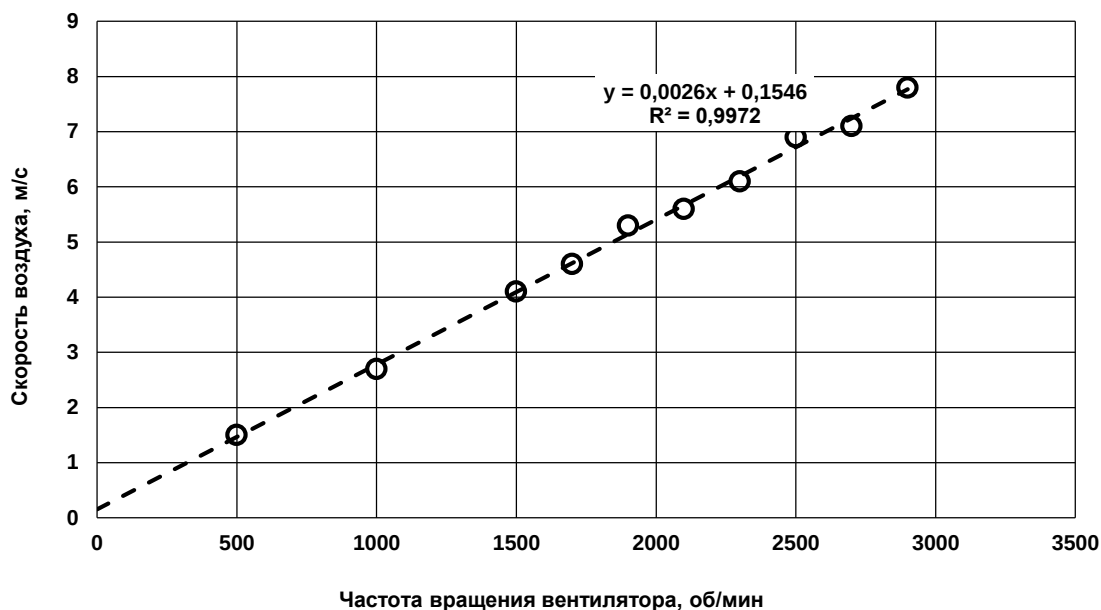


Рис. 2. Зависимость скорости воздушного потока в аспирационном канале от частоты вращения вентилятора

Анализ зависимости между параметрами показывает, что снижение частоты вращения вентилятора приводит к пропорциональному уменьшению значений всех характеристик пневмосистемы. При этом наблюдается линейная корреляция между скоростью воздушного потока и частотой вращения вентилятора, а также между расходом воздуха и частотой.

Таким образом, представленная методика регулирования скорости воздуха посредством изменения частоты вращения вентилятора демонстрирует высокую эффективность и позволяет точно настраивать параметры воздушного потока в зависимости от технологических требований при оптимальном энергопотреблении.

На основании полученных экспериментальных данных по регулированию скорости воздушного потока в аспирационном канале с помощью дроссельной заслонки можно провести комплексный анализ влияния угла ее поворота на ключевые параметры пневмосистемы. Угол изменяли от 0° (полностью открытое состояние) до 50° с шагом 10° , при этом максимальный угол закрытия составлял 75° . Площадь поперечного сечения канала в месте установки заслонки при полностью открытом положении – 280 см^2 .

В таблице 3 представлены результаты определения параметров пневмосистемы при регулировании скорости воздушного потока в зависимости от угла поворота дроссельной заслонки.

Таблица 3. Параметры работы пневмосистемы в зависимости от угла поворота дроссельной заслонки

Угол, °	Скорость воздуха, м/с	Расход воздуха, м³/ч	Потери давления, Па	Мощность вентилятора, кВт
0	7,7	1123	208	0,144
10	7,7	1065	267	0,176
20	7,3	935	434	0,250
30	6,3	826	531	0,271
40	5,5	720	630	0,280
50	4,1	711	725	0,318

Анализ данных таблицы 3 показывает выраженную зависимость между углом поворота заслонки и объемным расходом воздуха Q . При увеличении угла с 0 до 50° расход снижается с 1123 до 711 $\text{м}^3/\text{ч}$, что свидетельствует об эффективном дросселировании потока.

График на рисунке 3 отражает зависимости скорости воздушного потока в аспирационном канале и сопротивление пневмосистемы от угла поворота дроссельной заслонки.

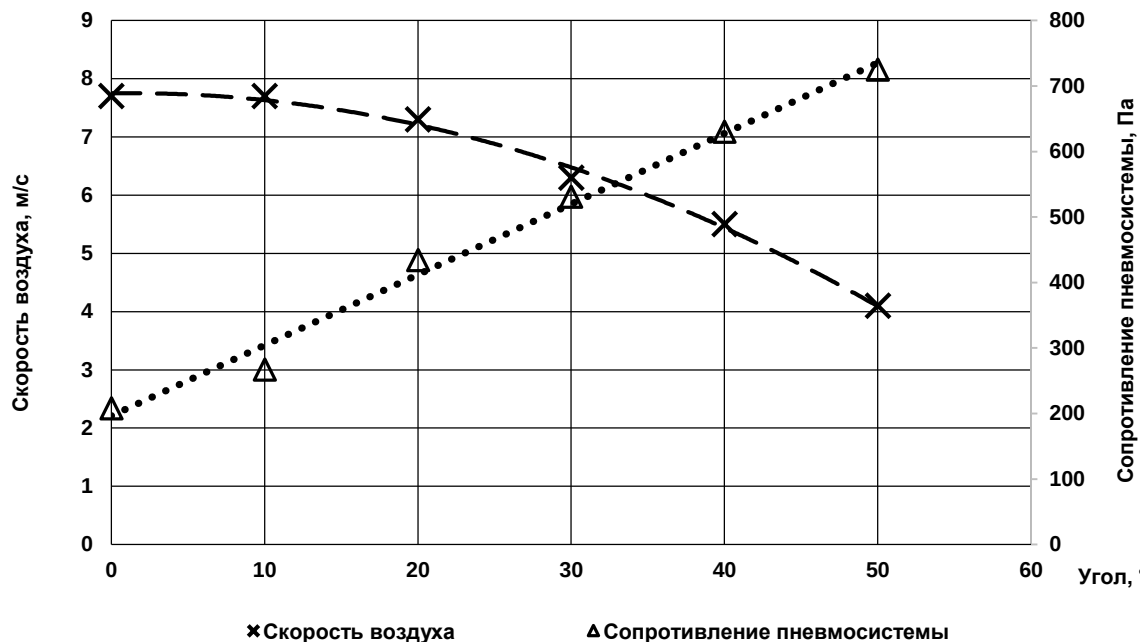


Рис. 3. Зависимости параметров работы пневмосистемы от угла поворота дроссельной заслонки

Скорость воздушного потока V постепенно уменьшается с 7,7 до 4,1 м/с, что согласуется с теорией гидродинамики: введение дополнительного местного сопротивления приводит к снижению скорости и расхода в системе (рис. 5). Сопротивление системы ΔP демонстрирует устойчивый рост с увеличением угла поворота: от 208 Па при 0° до 725 Па при 50° . Такой характер изменения обусловлен увеличением гидравлических потерь, связанных с характером движения потока и сужением проходного сечения. Наиболее интенсивный прирост сопротивления наблюдается в интервале от 10 до 30° , что может быть связано с переходом режима течения или геометрией заслонки.

Мощность N , потребляемая вентилятором, возрастает с 0,144 до 0,318 кВт, несмотря на снижение расхода и скорости. Это объясняется тем, что мощность вентилятора пропорциональна произведению расхода на давление. Снижение расхода компенсируется значительным ростом сопротивления, что в итоге приводит к увеличению энергозатрат. Таким образом, дроссельный способ регулирования является энергетически неэффективным, поскольку полезная работа потока снижается при одновременном росте потребляемой мощности.

С точки зрения оптимальности регулирования можно заключить, что минимальное воздействие на систему (угол 10°) вызывает незначительное снижение расхода при умеренном увеличении мощности. Однако при углах свыше $20\text{--}30^\circ$ наблюдается резкое снижение энергоэффективности: при снижении расхода на 30% мощность возрастает более чем на 80%.

Таким образом, использование дроссельной заслонки как средства регулирования скорости воздушного потока сопряжено с существенным ростом сопротивления и энергопотребления, что делает данный метод целесообразным лишь в ограниченном диапазоне регулирования. Для задач, требующих широкого регулирования при сохранении энергоэффективности, данный способ нецелесообразен.

Результаты исследования по определению эффективности регулирования скорости воздушного потока за счет холостого подсоса воздуха представлены в таблице 4.

Таблица 4. Параметры работы пневмосистемы в зависимости от площади сечения холостого подсоса воздуха S

Площадь холостого всасывания, см^2	Скорость воздуха, м/с	Расход воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$	Потери давления, Па	Мощность вентилятора, кВт
0	7,8	1123	208	0,144
16	7,3	1126	202	0,140
32	6,7	1143	187	0,132
48	6,4	1150	176	0,125
64	6,1	1154	163	0,116
80	5,7	1163	158	0,113
96	5,4	1169	151	0,109
112	5,3	1174	147	0,107
128	4,8	1184	139	0,102
144	4,5	1196	130	0,096
160	4,5	1198	133	0,098

На основании представленных экспериментальных данных по регулированию скорости воздушного потока в вертикальном пневмоканале за счет холостого подсоса воздуха проведен анализ влияния площади открытого сечения щелей на энергоэффективность и рабочие параметры системы. Управление осуществлялось плавным изменением площади всасывающего окна от 0 до 160 см^2 , что соответствует изменению степени открытия от 0 до 100%.

Анализ полученных данных показывает, что с увеличением площади холостого подсоса с 0 до 160 см^2 объемный расход воздуха Q возрастает с 1123 до $1198 \text{ м}^3/\text{ч}$. Такой рост расхода, несмотря на неизменную работу вентилятора, объясняется снижением общего аэродинамического сопротивления системы за счет подключения дополнительного пути для воздуха. При этом скорость потока в основном канале V закономерно снижается с 7,8 до 4,5 м/с , поскольку часть воздушного потока перенаправляется через окно холостого подсоса, уменьшая долю воздуха, проходящего через сепарирующий канал.

Наиболее значимым результатом является изменение сопротивления системы ΔP , которое снижается с 208 до 133 Па , и мощности N , потребляемой вентилятором, уменьшающейся с 0,144 до 0,098 кВт . Это свидетельствует о принципиально ином, по сравнению с дросселированием, механизме регулирования. Если при дросселировании мощность растет вследствие увеличения сопротивления, то при использовании холостого подсоса мощность снижается благодаря уменьшению общего сопротивления пневмосистемы. Таким образом, данный метод является энергоэффективным.

Анализ энергоэффективности методов регулирования скорости воздушного потока в пневмосепарирующем канале показывает существенные различия в их эффективности и применимости.

Сравнение показателей энергоэффективности регулировки скорости воздушного потока в аспирационном канале продемонстрировано на рисунке 4, где представлены зависимости эффективной мощности вентилятора от скорости воздуха в исследуемом пневмоканале при различных методах регулирования.

При частотном регулировании наблюдается прямая пропорциональная зависимость между частотой вращения n и скоростью воздушного потока V , что подтверждается экспериментальными данными. Математически это выражается через линейную зависимость объемного расхода от частоты вращения. При этом потребляемая мощ-

ность N изменяется по квадратичной зависимости, что отражено на рисунке 4. Такой характер изменения объясняется физическими законами аэродинамики и механики вращательного движения.

Метод частотного регулирования демонстрирует наилучшие показатели энергоэффективности. При снижении частоты вращения от 2900 до 1500 об/мин наблюдается линейное снижение потребляемой мощности с 0,144 до 0,025 кВт при соответствующем уменьшении скорости потока с 7,8 до 4,1 м/с.

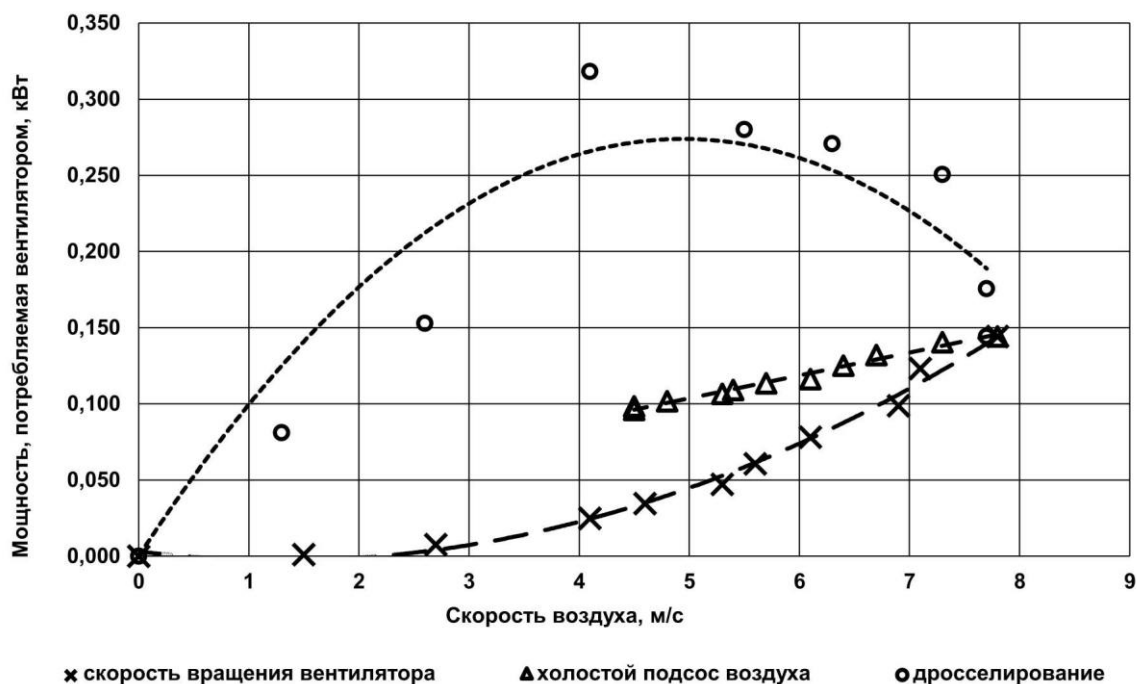


Рис. 4. Энергоэффективность способов регулирования скорости воздуха в пневмосепарирующем канале

При дроссельном регулировании отмечен более сложный характер зависимости. При изменении угла заслонки α происходит нелинейное изменение параметров системы. Физическая сущность этого метода заключается в искусственном создании дополнительного сопротивления ΔP , что приводит к росту потребляемой мощности при снижении скорости потока и увеличению потерь в системе из-за преодоления дополнительного сопротивления. Дроссельное регулирование характеризуется низкой энергоэффективностью. При увеличении угла заслонки от 0 до 50° мощность возрастает с 0,144 до 0,318 кВт, несмотря на снижение скорости потока всего на 3,6 м/с. Особенно заметен рост энергопотребления при углах более 20°, что делает метод нерациональным с точки зрения энергоэффективности.

Метод холостого подсоса основан на изменении эффективной площади всасывания. Математически это выражается через обратную зависимость между площадью подсоса и скоростью потока. Физически данный метод характеризуется снижением общего сопротивления системы. Метод холостого подсоса показывает умеренную энергоэффективность. При увеличении площади подсоса с 0 до 160 см² мощность снижается с 0,144 до 0,098 кВт при уменьшении скорости потока на 3,3 м/с. Данный метод обеспечивает относительно плавное регулирование с минимальными потерями энергии.

Диапазон и точность регулирования определяются конструктивными особенностями каждого метода. Частотное регулирование обеспечивает полный диапазон и наиболее точную настройку благодаря электронным системам управления. Дроссельное регулирование ограничено механическими возможностями перемещения заслонки, а холостой подсос — площадью сечения окна холостого подсоса и шагом перемещения регулирующей заслонки.

В заключение следует отметить, что частотное регулирование является наиболее перспективным методом с точки зрения энергоэффективности, диапазона и точности регулирования. Метод холостого подсоса может эффективно применяться для тонкой настройки параметров воздушного потока в сочетании с частотным регулированием. Дроссельное регулирование не целесообразно использовать для регулирования скорости аспирационных систем зерноочистительных машин.

При разработке системы автоматического регулирования скорости воздуха в послерешетном аспирационном канале воздушно-решетных сепараторов оптимальным решением является комбинированное применение частотного регулирования (как основного метода) и регулирование холостым подсосом (для точной настройки параметров воздушного потока).

Список источников

1. Бадретдинов И.Д., Мударисов С.Г. Научное обоснование и совершенствование пневматических систем сельскохозяйственных машин на основе моделирования технологического процесса // Вестник НГИЭИ. 2019. № 9(100). С. 5–16.
2. Бурков А.И., Баталова Г.А., Глушков А.Л. и др. Подготовка высококачественных семян с использованием пневмосепараторов // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2017. № 2(57). С. 72–76. DOI: 10.30766/2072-9081.2017.57.2.72-76.
3. Бурков А.И. Разработка и совершенствование пневмосистем зерноочистительных машин: монография. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2016. 380 с.
4. Волхонов М.С., Зимин И.Б., Максимов И.И. и др. Способ управления подачей материала и воздуха в пневмосепарационный канал зерноочистительной машины // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2018. Т. 13, № 1(48). С. 126–131. DOI: 10.12737/article_5afc14fbb1cbb8.74768988.
5. Гиевский А.М., Оробинский В.И., Баскаков И.В. и др. Обоснование размеров осадочных камер двухаспирационной пневмосистемы зерноочистительной машины // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2016. № 4(51). С. 87–95. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2016.4.87.
6. Гиевский А.М., Сундеев А.А., Тарасенко А.П. и др. Двухаспирационная разомкнутая пневмосистема зерноочистительной машины с секционным вентилятором: патент на полезную модель 2458749 Рос. Федерация. № 2011108855/03; заявл. 09.03.2011; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23. 7 с.
7. Дринча В.М. Исследование сепарации семян и разработка машинных технологий их подготовки. Воронеж: Издательство НПО «МОДЕК», 2006. 384 с.
8. Королев А.И. Совершенствование процесса очистки зернового вороха двухаспирационной системой зерноочистительных машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. Воронеж, 2007. 19 с.
9. Косилов Н.И., Пивень В.В. Технологические возможности модернизации и создания перспективных поточных линий для послеуборочной обработки зерна // Вестник Челябинского агроинженерного университета. 2000. Т. 31. С. 28–31.
10. Незаменимая машина на предварительной очистке. Классический очиститель PETKUS серии V15 [Электронный ресурс] // Компания PETKUS Technology GmbH. URL: <https://www.petkus.com/products/sorting/cleaners/detail/show-product/2145?cHash> (дата обращения: 06.05.2026).
11. Обзор инновационных разработок сельхозмашиностроительных предприятий в сегменте техники для очистки, погрузки и выгрузки зерна [Электронный ресурс] // Журнал «Агроинвестор», май – июнь 2025. URL: <https://www.agroinvestor.ru/tech/article/44213-aktualnaya-tehnika> (дата обращения: 06.05.2026).
12. Преобразователь частоты ELHART EMD-MINI-015T [Электронный ресурс] // Кубаньэлектропривод. URL: <https://kub-privod.ru/magazin/product/preobrazovatel-chastoty-emd> (дата обращения: 31.11.2025).
13. Сортировальные машины. Оборудование Westrup для качественной и эффективной сортировки любых зерновых культур [Электронный ресурс] // Компания Westrup. Производство оборудования по очистке зерна. URL: <https://www.westrup.com/ru/automatization> (дата обращения: 06.05.2026).
14. Тарабрин Д.С., Шебалин Е.Н., Гулевский В.А. Лабораторная установка для исследования параметров работы послерешетной воздушной очистки двухаспирационных воздушно-решетных сепараторов // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы национальной научно-практической конференции (Воронеж, 24 марта – 19 мая 2026 г.). Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2026. Ч. I. С. 391–395.
15. Тарасенко А.П. Современные машины для послеуборочной обработки зерна и семян: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Механизация сельского хозяйства». Москва: Колос, 2008. 232 с.
16. Уайт Ф.М. Гидромеханика; пер. с англ. А.П. Павлова. 8-е изд. Москва: Интеллект, 2016. 752 с.

References

1. Badretdinov I.D., Mudarisov S.G. Scientific justification and improvement of pneumatic systems for agricultural machines based on the simulation of technological process. *Bulletin NGIEI*. 2019;9(100):5-16. (In Russ.).
2. Burkov A.I., Batalova G.A., Glushkov A.L. et al. Preparation of high-quality seeds using pneumatic separators. *Agricultural Science of Euro-North-East*. 2017;2(57):72-76. DOI: 10.30766/2072-9081.2017.57.2.72-76. (In Russ.).

3. Burkov A.I. Development and improvement of pneumatic systems of grain cleaning machines: monograph. Kirov: Agricultural Research Institute of the North-East Publishers; 2016. 380 p. (In Russ.).
4. Volkhonov M.S., Zimin I.B., Maksimov I.I. et al. The method of controlling the flow of material and air in pneumoseparation channel winnowing machine. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2018;13(1):126-131. DOI: 10.12737/article_5afc14fbb1cbb8.74768988. (In Russ.).
5. Gievsky A.M., Orobinsky V.I., Baskakov I.V. et al. Rationale for the sizes of sedimentary chambers of a double suction pneumatic system of grain cleaning machines. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2016;4(51):87-95. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2016.4.87. (In Russ.).
6. Gievsky A.M., Sundeev A.A., Tarasenko A.P. et al. Two-air open-air pneumatic system of a grain cleaning machine with a sectional fan: Utility Model Patent 2458749 Russian Federation. No. 2011108855/03; claimed 09.03.2011; published 20.08.2012, Bul. No. 23. 7 p. (In Russ.).
7. Drincha V.M. Grain cleaning and technology hardware for seeds preparation. Voronezh: MODEK Publishing House; 2006. 384 p. (In Russ.).
8. Korolev A.I. Improving the process of cleaning grain piles with a two-air system of grain cleaning machines: Author's Abstract of Candidate Dissertation in Engineering Sciences: 05.20.01. Voronezh; 2007. 19 p. (In Russ.).
9. Kosilov N.I., Piven V.V. Technological possibilities of modernization and creation of promising production lines for post-harvest grain processing. *Bulletin of Chelyabinsk State Agroengineering University*. 2000;31:28-31. (In Russ.).
10. Essential for Pre-Cleaning. The classic PETKUS cleaner V15. PETKUS Technologie GmbH Website. URL: <https://www.petkus.com/products/sorting/cleaners/detail/show-product/2145?cHash>. (In Russ.).
11. Review of innovative developments of agricultural machinery enterprises in the segment of equipment for cleaning, loading and unloading grain. *Agroinvestor Magazine*. May – June 2025. URL: <https://www.agroinvestor.ru/tech/article/44213-aktualnaya-tehnika>. (In Russ.).
12. Frequency converter ELHART EMD-MINI-015T Kubanelectrodrivod. URL: <https://kub-privod.ru/magazin/product/preobrazovatel-chastoty-emd>. (In Russ.).
13. Sorting machines. Westrup equipment for high-quality and efficient sorting of any grain crop. Westrup Company Website. Production of grain cleaning equipment. URL: <https://www.westrup.com/ru/automatization>. (In Russ.).
14. Tarabrin D.S., Shebalin E.N., Gulevsky V.A. Laboratory installation for studying the parameters of the operation of post-flight air purification of two-air sieve separators. In: Theory and Practice of Innovative Technologies in Agro-Industrial Complex: Proceedings of the National Research-to-Practice Conference (Voronezh, March 24 - May 19, 2026). Voronezh: Voronezh State Agrarian University Publishers. 2026;1:391-395. (In Russ.).
15. Tarasenko A.P. Modern machines for post-harvest processing of grain and seeds: a textbook for students of higher educational institutions majoring in Agricultural Mechanization. Moscow: Kolos Publishers; 2008. 232 p. (In Russ.).
16. White F.M. Fluid Mechanics; translated from English by A.P. Pavlov. 8th edition. Moscow: Intellect Publishers; 2016. 752 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Д.С. Тарабрин – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, зав. лабораторией механизации защиты растений ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений», tarabrinds@ya.ru.

В.А. Гулевский – доктор технических наук, профессор кафедры математики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», gulevsky_va@inbox.ru.

В.И. Оробинский – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, зав. кафедрой сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей, декан агроинженерного факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», main@agroeng.vsa.ru.

С.Н. Савушкин – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории механизации защиты растений ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений», savushkin1365@mail.ru.

Information about the authors

D.S. Tarabrin, Candidate of Engineering Sciences, Senior Research Scientist, Head of the Plant Protection Mechanization Laboratory, All-Russian Research Institute of Plant Protection, tarabrinds@ya.ru.

V.A. Gulevsky, Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Mathematics, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, gulevsky_va@inbox.ru.

V.I. Orobinsky, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Dean of the Faculty of Rural Engineering, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, main@agroeng.vsa.ru.

S.N. Savushkin, Candidate of Engineering Sciences, Leading Research Scientist, Plant Protection Mechanization Laboratory, All-Russian Research Institute of Plant Protection, savushkin1365@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 15.05.2026; одобрена после рецензирования 19.06.2026; принята к публикации 23.06.2026.

The article was submitted 15.05.2026; approved after reviewing 19.06.2026; accepted for publication 23.06.2026.

© Тарабрин Д.С., Гулевский В.А., Оробинский В.И., Савушкин С.Н., 2026