



Альтернативный способ определения силы лобового сопротивления беспилотных авиационных систем самолетного типа

Павел Алексеевич Аверичкин¹,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: averpavel@yandex.ru;
Дмитрий Иванович Грицай¹,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: gritcay_kirill@mail.ru;

Павел Иосифович Чумак²,
инженер, доцент,
e-mail: pcumak5@gmail.com

¹Ставропольский государственный аграрный университет, г. Ставрополь, Российская Федерация;

²ООО «Аэростарт», г. Ставрополь, Российская Федерация

Статья подготовлена по результатам исследовательской работы, выполненной при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-15-2025-591) в рамках реализации мероприятий программы развития научного центра мирового уровня «Агроинженерия будущего» Ставропольского ГАУ (утверждена протоколом заседания президиума Комиссии по научно-технологическому развитию РФ от 29 мая 2025 г. №3).

Реферат. Отметим, что в сельском хозяйстве беспилотные авиационные системы самолетного типа успешно выполняют задачи мониторинга урожая, обнаружения вредителей и болезней на больших территориях вдали от оператора. Дальнейшее повышение скорости, дальности и полезной нагрузки беспилотников может быть достигнуто за счет снижения их лобового сопротивления. Исследования в данной области сдерживаются отсутствием недорогих экспериментальных установок с удовлетворительными эксплуатационными характеристиками. *(Цель исследования)* Разработка альтернативного способа определения лобового сопротивления изучаемых объектов. *(Материалы и методы)* Провели анализ существующих экспериментальных установок для оценки аэродинамических характеристик моделей. Описали конструкцию дифференциальной аэродинамической ротативной машины. Принцип работы экспериментальной установки основан на сравнении сил лобового сопротивления исследуемой модели и эталонного тела. *(Результаты и обсуждение)* Выявили причины, ограничивающие создание эффективных аэродинамических форм летательных аппаратов: высокая стоимость аэродинамических труб, появление возмущений за моделью и эталонным телом при их круговом движении на стандартной ротативной машине. Предложили в конструкции ротативной машины заменить аэродинамические весы на дифференциальный механизм. В результате модель и эталонное тело будут испытывать одинаковые возмущения внешней среды. *(Выводы)* Применение эталонных тел и дифференциального механизма увеличит стоимость дифференциальной аэродинамической машины на 31 процент по сравнению со стандартной ротативной машиной. При этом точность результатов исследования повысится на 33 процента и значительно приблизится к аналогичному показателю аэродинамических труб.

Ключевые слова: беспилотная авиационная система самолетного типа, сила лобового сопротивления, экспериментальная установка, исследуемая модель, эталонное тело, дифференциальная аэродинамическая ротативная машина.

■ **Для цитирования:** Аверичкин П.А., Грицай Д.И., Чумак П.И. Альтернативный способ определения силы лобового сопротивления беспилотных авиационных систем самолетного типа // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №3. С. 52-58. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-3-52-58. EDN: TGNBHV.

Scientific article

An Alternative Method for Determining the Drag Force of Fixed-Wing Unmanned Aircraft Systems

Pavel A. Averichkin¹,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: averpavel@yandex.ru;

Dmitriy I. Gritsay¹,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: gritcay_kirill@mail.ru;

Pavel I. Chumak²,
engineer, associate professor,
e-mail: pcumak5@gmail.com

¹Stavropol State Agrarian University, Stavropol, Russian Federation;

²Aerostart LLC, Stavropol, Russian Federation

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under Agreement No. 075-15-2025-591 as part of the activities carried out within the development of the world-class scientific center "Agroengineering of the Future" at Stavropol State Agrarian University, as approved by Protocol No. 3 of the meeting of the Presidium of the Commission for Scientific and Technological Development of the Russian Federation dated May 29, 2025.

Abstract. It is noted that in agriculture, fixed-wing unmanned aircraft systems successfully perform the tasks of crop monitoring, pest and disease detection across large areas remote from the operator. Further improvements in unmanned aircraft speed, flight range, and payload capacity can be achieved by reducing aerodynamic drag. Research in this area is constrained by the lack of affordable experimental facilities with satisfactory operating characteristics. (*Research purpose*) To develop an alternative method for determining the aerodynamic drag of the objects under study. (*Materials and methods*) Existing experimental facilities used to evaluate the aerodynamic characteristics of models were analyzed. The design of a differential aerodynamic rotary machine was described. The operating principle of the experimental facility is based on comparing the drag forces acting on the test model and a reference body. (*Results and discussion*) The factors limiting the development of aerodynamically efficient aircraft shapes were identified, including the high cost of wind tunnels and the disturbances generated behind the test model and the reference body during their circular motion in a standard rotary machine. It was proposed to replace the aerodynamic balance of the rotary machine with a differential mechanism, thereby exposing the test model and the reference body to identical external disturbances. (*Conclusions*) The use of reference bodies and a differential mechanism would increase the cost of the differential aerodynamic rotary machine by 31 percent compared with a standard rotary machine. At the same time, the accuracy of the experimental results would increase by 33 percent, approaching that achieved in wind-tunnel testing.

Keywords: fixed-wing unmanned aircraft system, aerodynamic drag, experimental facility, test model, reference body, differential aerodynamic rotary machine.

■ For citation: Averichkin P.A., Gritsay D.I., Chumak P.I. An alternative method for determining the drag force of fixed-wing unmanned aircraft systems. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N3. 52-58 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-3-52-58. EDN: TGHVHV.

В последние годы по ряду объективных причин появилось огромное количество различных беспилотных авиационных систем, решающих сложные задачи не только в военном деле, но и в интересах народного хозяйства [1, 2]. Например, в агропромышленном комплексе расширяется парк беспилотных авиационных систем самолетного типа [3, 4]. Благодаря своим преимуществам над квадрокоптерами они уже сегодня способны к облету больших территорий и эффективному выполнению задач по картографированию почвы и растительности [5, 6], мониторингу урожая или обнаружению болезней и вредителей на значительных площадях вдали от оператора [7, 8]. Однако достигнутый уровень тактико-технических характеристик [9] производимых беспилотных авиационных систем самолетного типа все чаще не удовлетворяет растущим требованиям заказчика по скорости, высотности, дальности и грузоподъемности [10]. Одним из перспективных направлений решения указанной проблемы является сниже-

ние лобового сопротивления летательных аппаратов, что при стремительном росте производителей беспилотных авиационных систем невозможно без значительного увеличения объемов исследований по созданию их аэродинамически эффективных компоновок.

К сожалению, результативность таких исследований сдерживается отсутствием достаточного количества доступных экспериментальных установок. Так, приобретение даже малогабаритной аэродинамической трубы AF1450S с рабочей зоной 450×450 мм обойдется почти в 2 млн руб. (<https://gkuo.ru/katalog/283-aerodinamika/dozvukovye-aerodinamicheskie-truby/969-af1450s>, дата обращения 15.11.2025). Такие затраты могут себе позволить только крупные профильные исследовательские организации и предприятия. Необходимость расширения круга исследователей, не обладающих достаточными средствами для приобретения современной экспериментально-лабораторной базы, и их привлечение к созданию перспективных аэродина-

мических компоновок беспилотных авиационных систем самолетного типа определила актуальность данной работы.

Цель исследования. Разработка доступной экспериментальной установки для определения аэродинамических характеристик испытываемых моделей беспилотных авиационных систем самолетного типа.

Материалы и методы. Лобовое сопротивление летательного аппарата во многом определяет его высотно-скоростные характеристики, а также возможности по грузоподъемности и дальности полета. Умение количественно оценивать силу лобового сопротивления летательного объекта обуславливает результативность научных исследований в области создания эффективных аэродинамических форм.

В настоящее время величина силы лобового сопротивления оценивается эмпирически различными методами. Например, проводятся исследования в аэродинамической трубе или на ротативной машине, эксперименты с использованием законов свободного падения или подвижной аэродинамической тележки, а также путем летных испытаний [11]. В результате анализа указанных способов было принято решение о разработке экспериментальной установки относительно невысокой стоимости и сложности изготовления, которая обладает приемлемыми эксплуатационными свойствами.

Результаты и обсуждение. В качестве прототипа для совершенствования экспериментального метода оценки аэродинамических свойств изучаемых объектов была выбрана стандартная ротативная машина (рис. 1).

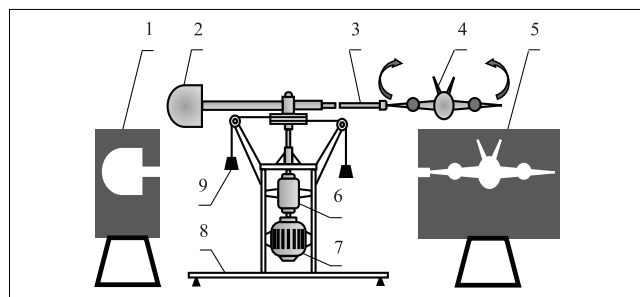


Рис. 1. Принципиальная схема стандартной ротативной машины

Fig. 1. Schematic diagram of a standard rotary machine

В состав ротативной машины входят: экран для балансира 1, балансир 2, вращаемый брус переменной длины 3, испытываемая модель 4, экран для испытываемой модели 5, редуктор 6, электродвигатель 7, установленный на основании 8. Лобовое сопротивление модели определяется с помощью аэродинамических весов 9 во время кругового движения исследуемого тела.

Однако, появление инерционных сил, действующих на элементы аэродинамических весов, и образование спутных струй за вращающимися частями экспериментальной установки [12] негативно сказываются на точности результатов исследования аэродинамических характеристик моделей. Повлиять на работу элементов конструкции аэродинамических весов не представляется возможным. Применение специальных экранов с отверстиями для прохождения балансира, бруса и испытываемого объекта практически не сказалось на достоверности результатов эксперимента, но значительно увеличило стоимость и длительность исследований.

Альтернативным способом оценки силы лобового сопротивления твердых тел может стать исследование на дифференциальной аэродинамической ротативной машине, представленной на рисунке 2 (Патент RU 2001131017А. Способ определения аэродинамических характеристик объекта и устройство для его осуществления). Такая установка позволяет определить аэродинамически эффективную форму разрабатываемого дозвукового летательного аппарата независимо от его максимальной взлетной массы.



Рис. 2. Общий вид дифференциальной аэродинамической ротативной машины

Fig. 2. General view of a differential aerodynamic rotary machine

Основное отличие дифференциальной аэродинамической ротативной машины от известных ротативных машин заключается в том, что лобовое сопротивление модели сравнивается с аэродинамическим сопротивлением эталонного тела при их одновременном круговом движении на одинаковом расстоянии от оси вращения. Достоинство предложенного способа состоит в сведении к минимуму влияния внешних воздействий на результаты исследований, так как испытываемый объект и эталонное тело находятся в одинаковых условиях. В качестве эталонного тела предпочтительнее исполь-

зовать плоскую прямоугольную пластину, коэффициент аэродинамического сопротивления которой известен и остается практически неизменным в диапазоне чисел Рейнольдса, необходимых для проведения эксперимента с моделью беспилотной авиационной системы самолетного типа [13].

Основные конструкционные элементы разработанной экспериментальной установки для определения лобового сопротивления исследуемых тел изображены на *рисунке 3*.

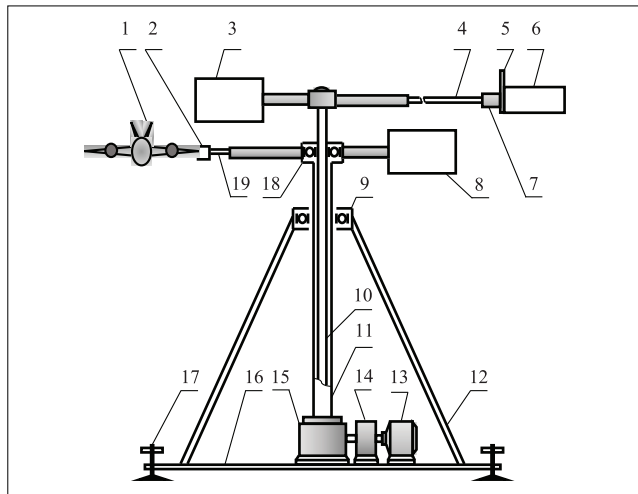


Рис. 3. Принципиальная схема дифференциальной аэродинамической ротативной машины для определения лобового сопротивления

Fig. 3. Schematic diagram of a differential aerodynamic rotary machine used to determine aerodynamic drag

Внешний вал 11 приводит в движение балку 19 с зафиксированным на ней креплением 2 исследуемую модель 1 и ее противовес 8. Внутренний вал 10 вращает балку 4 с эталонным телом 6, сбалансированную противовесом 3. Механизмом 7 по лимбу 5 выставляется необходимый угол установки эталонного тела. Соосные валы удерживаются в вертикальном положении опорами 9 и 18, а также подкосами 12. Их нижней опорой выступает блок подшипников на выходе дифференциального планетарного редуктора 15 с подключенными к нему датчиками частоты вращения валов (на рисунке не показаны). Привод валов осуществляется электродвигателем 13, а скорость их вращения управляется через коробку передач 14. Все элементы установки смонтированы на общем основании 16, которое перед проведением экспериментальных исследований приводится в горизонтальное положение с помощью винтовых опор 17.

Изменяя угол установки эталонного тела относительно набегающего на него воздушного потока, добиваются равенства частот вращения обоих валов. Благодаря наличию дифференциального механизма в конструкции экспериментальной установ-

ки данное условие будет выполняться только при одинаковых силах аэродинамического сопротивления испытуемой модели и эталонного тела:

$$F_{x_{\text{мод}}} = F_{x_{\text{эт}}}, \text{ Н.}$$

Значит, с помощью разработанной дифференциальной аэродинамической ротативной машины можно определить величину силы лобового сопротивления исследуемой модели по характеристикам эталонного тела и условиям проведения эксперимента [14, 15]:

$$F_{x_{\text{мод}}} = c_{x_{\text{эт}}} \frac{\rho V_{\text{эт}}^2}{2} S_{\text{эт}},$$

где $c_{x_{\text{эт}}}$ – коэффициент лобового сопротивления эталонного тела, представляющий собой справочную величину для каждой конкретной геометрической формы и зависящий от числа Рейнольдса, используемого для описания кинематического подобия обтекания твердых тел [16, 17]; $\rho = 0,0474p/T$ – плотность воздуха во время проведения эксперимента, рассчитываемая по барометрическому давлению p и абсолютной температуре T , кг/м³ [16]; $V_{\text{эт}} = 2\pi rn$ – линейная скорость эталонного тела при его круговом движении на экспериментальной установке, м/с; $S_{\text{эт}}$ – площадь Миделя эталонного тела, т.е. максимальная площадь поперечного сечения тела относительно набегающего потока воздуха, м².

Тестовые испытания дифференциальной аэродинамической ротативной машины при оценке лобового сопротивления эталонных тел в виде шара, цилиндра и плоской прямоугольной пластины (*таблица*) показали ее конкурентоспособность с экспериментальными установками аналогичного назначения (Мартынов А.К. Прикладная аэродинамика. М.: Машиностроение, 1972. 448 с.).

Эксплуатационное совершенство экспериментальных установок для оценки аэродинамических характеристик моделей во многом зависит от точности измеряемых величин. При определении лобового сопротивления с использованием дифференциальной аэродинамической ротативной машины на точность измерений могут влиять систематические, случайные и субъективные погрешности [18]. Из основных источников погрешностей можно выделить:

- спутный след за вращающимися моделью и эталонным телом;
- разбалансировка роторов дифференциального узла и неточность изготовления деталей дифференциального механизма;
- ошибки измерения истинной относительной скорости воздушного потока;
- ошибки изготовления, сборки и установки модели в узле крепления;
- влияние центробежных сил;

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОБОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ CHARACTERISTICS OF EXPERIMENTAL SETUPS FOR DETERMINATION OF DRAG OF SOLIDS			
Параметр	АТ (AF1450S)	РМ	ДАРМ
Размеры пространства для размещения установки ($L \times B \times H$), м	13×5×2,2	10,2×10,2×2,2	10,2×10,2×2,2
Максимальный размер модели ($l \times b \times h$), м	0,6×0,35×0,25	0,95×0,8×0,4	1,15×0,8×0,4
Рабочий диапазон температуры окружающей среды, °C	От +5 до +40	От –10 до +40	От –10 до +40
Диапазон эффективных линейных скоростей воздушного потока, м/с	0-35	10-36	8-40
Точность измерений, %	5	12	8
Максимальная масса испытуемой модели, кг	15	7	8
Масса установки, кг	900	173	235
Стоимость, тыс. руб.	2 000	187	245

АТ – аэродинамическая труба; РМ – ротативная машина в стандартном исполнении; ДАРМ – дифференциальная аэродинамическая ротативная машина; L, B, H – минимально необходимые длина, ширина, высота помещения; l, b, h – максимально возможные длина, ширина, высота модели.

• неправильная калибровка датчиков частоты вращения роторов и ошибки считывания показаний на тахометрах от параллакса.

При изготовлении экспериментальной установки и разработке методики испытаний авторы постарались учесть и по возможности минимизировать все перечисленные источники погрешностей.

Сравнительный анализ результатов оценки лобового сопротивления, полученных во время многократных исследований аэродинамических характеристик одной и той же модели на дифференциальной аэродинамической ротативной машине и в аэродинамической трубе с известной точностью измерений, позволил сделать вывод, что точность предложенной экспериментальной установки при малой линейной скорости воздушного потока находится в пределах 8% с тенденцией снижения до 6% при увеличении указанной скорости.

Выводы. Анализ существующих экспериментальных способов определения лобового сопротивления моделей беспилотных авиационных систем вскрыл необходимость дальнейшего совершенствования эмпирического метода для использования предприятиями, организациями и учреждениями с ограниченным бюджетом.

Подтверждена эффективность применения эталонных тел при определении аэродинамических сил на дифференциальной аэродинамической ротативной машине. За счет дифференциального механизма в конструкции разработанной установки значительно уменьшилось влияние возмущений воздушного потока на достоверность результатов. Точность количественной оценки лобового сопротивления модели на дифференциальной аэродинамической ротативной машине выросла на 1/3 по сравнению со стандартной ротативной машиной. При этом стоимость созданной экспериментальной установки не намного выше стоимости известной ротативной машины и на порядок ниже стоимости дозвуковой аэродинамической трубы.

Небольшие размеры, доступные технологии изготовления, достаточная точность определения изучаемых параметров и невысокая стоимость разработанной экспериментальной установки способствуют расширению круга исследователей перспективных компоновок беспилотных авиационных систем самолетного типа, что положительно отразится на результатах работ по созданию аэродинамически эффективных схем летательных аппаратов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Литвинов М.А., Куприн А.А. Применение беспилотных воздушных систем в сельском хозяйстве // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2023. №6. С. 28-35. DOI: 10.33920/sel-10-2306-03.
- Исюмов Д.Б., Кондратюк Е.Л. Научно-технические проблемы создания беспилотных авиационных транспортных систем двойного назначения за рубежом // *Инноватика и экспертиза*. 2021. Вып. 1 (31). С. 168-181. DOI: 10.35264/1996-2274-2021-1-168-181.
- Альт В.В., Ценч Ю.С., Савченко О.Ф., Солошенко А.А. Методологические основы интеграции беспилотных летательных аппаратов в систему сельскохозяйственных машин // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2025. №4. С. 59-67. DOI: 10.7868/S3034582025040114.
- Литвинов М.А., Курбанов Р.К., Захарова Н.И., Кривко С.И. Обоснование параметров точности позиционирования системы управления БВС в условиях закрытого грунта // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №3. С. 10-16. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-10-16.

5. Nagaraja G., Shoba H., Sreedevi M.S., Krishnamma P.N. The impact of robotics and drones on agricultural efficiency and productivity. *International Journal of Research in Agronomy*. 2024. 7(9S). 1001-1009. DOI: 10.33545/2618060X.2024.v7.i9Sn.1650.
6. Ценч Ю.С., Курбанов Р.К. История развития систем управления беспилотных воздушных судов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N3. С. 4-15. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-4-15.
7. Rejeb A., Abdollahi A., Rejeb K., Treiblmaier H. Drones in agriculture: a review and bibliometric analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 198. 107017. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107017.
8. Ценч Ю.С., Курбанов Р.К., Захарова Н.И. Развитие систем управления полетом и средств аэрофотосъемки беспилотных воздушных судов сельскохозяйственного назначения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N2. С. 11-19. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19.
9. Федюлин А.М., Дрягин Д.М. Перспективы применения крупноразмерных БПЛА при решении задач комплексного обследования территорий // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2021. N1(218). С. 271-281. DOI: 10.18522/2311-3103-2021-1-271-281.
10. Ржевский С.И., Старикова И.О. Перспективы развития беспилотных летательных аппаратов отечественного и зарубежного производства // *Вестник Российского нового университета. Сер.: Сложные системы: модели, анализ и управление*. 2018. N4. С. 94-101. DOI: 10.25586/RNU.V9I87.18.11.P94.
11. Нифонтова Л.С., Чавриков И.Е., Кальницкий П.В. Методы аэродинамического эксперимента // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016. N12-3(54). С. 153-156. DOI: 10.18454/IRJ.2016.54.238.
12. Филиппов Р.Н., Титова Е.А. Влияние вихревого спутного следа на взаимную безопасность крылатых летательных аппаратов, следующих по одному маршруту // *Известия вузов. Машиностроение*. 2021. N10(739). С. 65-72. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-10-65-73.
13. Вьюнг В.Т., Горелов С.Л., Русаков С.В. Эффекты немонотонности аэродинамических характеристик пластины в гиперзвуковом потоке разреженного газа // *Труды МАИ*. 2020. Вып. 110. DOI: 10.34759/trd-2020-110-9.
14. Илюхин С.Н., Ананьев В.И. Разработка программного-математического обеспечения для автоматизации процедуры определения лобового сопротивления на баллистической трассе // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2022. Т. 20. N4. С. 72-79. DOI: 10.22213/2410-9304-2022-4-72-79.
15. Лукьянов М.М., Зуев Д.М. Рассмотрение возможности стабилизации относительного движения наноспутников под действием активного аэродинамического управления // *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2023. Т. 24. N3. С. 537-549. DOI: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-537-549.
16. Савин Е.И., Миньков Л.Л. Исследование коэффициентов лобового сопротивления и параметров ракетного двигателя твердого топлива для анализа движения бикалиберного летательного аппарата ближней зоны действия // *Труды МАИ*. 2023. 130. DOI: 10.34759/trd-2023-130-07.
17. Корнилов В.И., Попков А.Н. Моделирование обтекания осесимметричного тела при отсутствии свободных границ потока // *Прикладная механика и техническая физика*. 2023. Т. 64. N2. С. 27-38. DOI: 10.15372/PMTF202215114.
18. Капля Е.В. Аппроксимация статистических распределений плотности воздуха в приземном слое атмосферы // *Гидрометеорология и экология*. 2024. N74. С. 7-25. DOI: 10.33933/2713-3001-2024-74-7-25

REFERENCES

1. Litvinov M.A., Kuprin A.A. Application of unmanned air systems in agriculture. *Agricultural Machinery: Service and Repair*. 2023. N6. 28-35 (In Russian). DOI: 10.33920/sel-10-2306-03.
2. Iziumov D.B., Kondratyuk E.L. Scientific and technical problems of creation of unmanned aircraft dual-purpose transportation systems abroad. *Innovatics and Expert Examination*. 2021. 1 (31). 168-181 (In Russian). DOI: 10.35264/1996-2274-2021-1-168-181.
3. Alt V.V., Tsench Yu.S., Savchenko O.F., Soloshenko A.A. Methodological foundations for the integration of unmanned aerial vehicles into agricultural machinery systems. *Russian Agricultural Sciences*. 2025. N4. 59-67 (In Russian). DOI: 10.7868/S3034582025040114.
4. Litvinov M.A., Kurbanov R.K., Zakharova N.I., Krivko S.I. Validation of the positioning accuracy parameters of the UAV control system in controlled-environment agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N3. 10-16 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-10-16.
5. Nagaraja G., Shoba H., Sreedevi M.S., Krishnamma P.N. The impact of robotics and drones on agricultural efficiency and productivity. *International Journal of Research in Agronomy*. 2024. 7(9S). 1001-1009. DOI: 10.33545/2618060X.2024.v7.i9Sn.1650.
6. Tsench Yu.S., Kurbanov R.K. History of unmanned aircraft flight controller development. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N3. 4-15. (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-4-15.
7. Rejeb A., Abdollahi A., Rejeb K., Treiblmaier H. Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 198. 107017. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107017.
8. Tsench Yu.S., Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Evolution

- of flight control systems and aerial photography in unmanned agricultural aircraft. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 11-19 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19.
9. Fedulin A.M., Driagin D.M. Prospects of male-class UAVs using for the huge territories aerial survey. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2021. N1(218). 271-281 (In Russian). DOI: 10.18522/2311-3103-2021-1-271-281.
 10. Rzejewsky S.I., Starikova I.O. Prospects for development of unmanned aerial vehicles of domestic and foreign production. *Vestnik of Russian New University. Series: Complex Systems: Models, Analysis, Management*. 2018. N4. 94-101 (In Russian). DOI: 10.25586/RNU.V9I87.18.11.P94.
 11. Nifontova L.S., Chavrikov I.E., Kalnitsky P.V. Methods of aerodynamic experiment. *International Research Journal*. 2016. N12-3(54). 153-156 (In Russian). DOI: 10.18454/IRJ.2016.54.238.
 12. Filippov R.N., Titova E.A. Effect of the wake vortex on the mutual safety of winged aircraft following the same route. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2021. N10(739). 65-72 (In Russian). DOI: 10.18698/0536-1044-2021-10-65-73.
 13. Vyong V.T., Gorelov S.L., Rusakov S.V. Effects of non-monotonic aerodynamic characteristics plates in the hypersonic flow of rarefied gas. *Trudy MAI*. 2020. N110 (In Russian). DOI: 10.34759/trd-2020-110-9.
 14. Iljukhin S.N., Ananyev V.I. Development of software for automatic determining of drag on ballistic track. *Intelligent Systems in Manufacturing*. 2022. Vol. 20. N4. 72-79 (In Russian). DOI: 10.22213/2410-9304-2022-4-72-79.
 15. Lukyanov M.M., Zuev D.M. Estimation of the possibility of matching the relative motion of nanosatellites under active aerodynamic control. *Siberian Aerospace Journal*. 2023. Vol. 24. N3. 537-549 (In Russian). DOI: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-537-549.
 16. Savin E.I., Minkov L.L. Research of drag coefficients and solid rocket motor parameters for the analysis of the movement of a short-range bicaliber aircraft. *Trudy MAI*. 2023. N130 (In Russian). DOI: 10.34759/trd-2023-130-07.
 17. Kornilov V.I., Popkov A.N. Simulation of the flow around an axisymmetric body in the absence of free boundaries of the flow. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2023. Vol. 64. N3. 27-38 (In Russian). DOI: 10.15372/PMTF202215114.
 18. Kaplya E.V. Approximation of the statistical distributions of atmospheric air density in the surface layer. *Hydrometeorology and Ecology*. 2024. N74. 7-25 (In Russian). DOI: 10.33933/2713-3001-2024-74-7-25.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Аверичкин П.А. – постановка задачи, теоретический анализ, подготовка рукописи;
Грицай Д.И. – статистическая обработка результатов, редактирование текста;
Чумак П.И. – проведение испытаний, подготовка рукописи.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Averichkin P.A. – problem formulation, theoretical analysis, manuscript preparation;
Gritsay D.I. – statistical analysis of results, manuscript revision;
Chumak P.I. – conducting experiments, manuscript preparation.
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

30.06.2026
07.08.2026