

УДК 623.466.52

## Баллистический анализ возможности парирования ветровой нагрузки на начальном участке траектории перспективных летательных аппаратов

Илюхин С. Н.<sup>1,\*</sup>, Казаковцев В. П.<sup>1</sup>,  
Корянов В. В.<sup>1</sup>

[\\*iljukhin.stepan@rambler.ru](mailto:iljukhin.stepan@rambler.ru)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

В данной работе изложенный подход к решению задачи парирования негативного влияния случайной ветровой нагрузки на начальном этапе полёта летательных аппаратов. Проведено теоретическое обоснование и сформулирован основной закон управления для ликвидации разворота изделия под действием ветра. На примере модернизируемой баллистической мишени наглядно проиллюстрирована логика функционирования перспективной методики коррекции по траекторной скорости. В ходе исследования проведён анализ влияния ветровой нагрузки на характеристики рассеивания точек падения. В сравнении с этим, на тривиальном примере математической модели, дана первоначальная оценка эффективности предложенной методики.

**Ключевые слова:** баллистика, ветер, коррекция, рассеивание

---

### Введение

На современном уровне развития науки и техники задача о повышении точности неуправляемых ракет (НУР) является глубоко изученной и практически исчерпанной. В связи с этим, для достижения высшей точности баллистических ракет были созданы управляемые ракеты, обладающие сложными контурами наведения и стабилизации [2]. В силу значительного усложнения конструкции и порядка эксплуатации таких изделий неминуемо произошло некоторое снижение надёжности и существенное удорожание ракет сухопутных войск. Неким переходным звеном в этом эволюционном процессе явились корректируемые ракеты с упрощённой системой наведения, парирующей накопившиеся отклонения на конечном участке траектории [3].

Из обширного объема практических опытов и массивов прикладных расчётов известно, что для НУР класса «земля-земля» порядка 80% от дисперсий выборки точек падения может формироваться на начальном участке траектории. Имеются в виду летательные аппараты (ЛА) статические устойчивые и стабилизированные вращением относительно продольной оси. До половины этого вклада образуется за счёт

несовершенства конструкции ракеты и пусковой установки. Вторая часть начального отклонения полёта ЛА формируется под действием на ракету неучтённой ветровой нагрузки.

### **Постановка задачи**

Если первая составляющая возмущений нивелируется при доработке конструкций и ужесточении допусков при производстве, то вторая обычно учитывается лишь путём введения поправки на некое постоянное значение и направление ветра. С учётом этого, представляется более целесообразным парировать возмущения, вызываемые ветром и его порывами на начальном участке траектории, чем ликвидировать суммарное отклонение от этих возмущений на последних секундах полёта. Данный подход может значительно удешевить тактические баллистические ракеты с коррекцией, что особо ценно при их массовом использовании. Поэтому принципиально важно рассмотреть такое решение как с теоретической точки зрения, так и оценить его возможную эффективность на практическом примере. Кроме того, необходимо детализировать эту общую концепцию и разработать качественно новый алгоритм коррекции. Эти исследования проводятся авторами в рамках изыскательских работ по повышению точности перспективных баллистических ракет-мишеней (БРМ) для ЗАО «АНТЦ».

### **Анализ влияния и парирования ветровой нагрузки**

Итак, многочисленные результаты лётных испытаний и детального цифрового моделирования с учётом возмущений свидетельствуют о том, что воздействие постоянного и порывистого ветра на начальной фазе полёта является одним из основных факторов значительного рассеивания точек падения. Это вполне вписывается в общую физическую картину полёта, поскольку на начальном этапе полёта изделие имеет малую скорость и положение центра масс, наиболее отдалённое от носка ракеты. Несмотря на это, на активном участке траектории (АУТ) статическая устойчивость ракеты, приводящая к развороту продольной оси ракеты по воздушной скорости, может создавать значительное отклонение углового положения от номинального при несовпадении воздушной и траекторной скоростей[4]. Выдвинем предложение о формировании тривиальной системы стабилизации по ветру (ССВ), нивелирующей возмущающее воздействие ветра на начальном участке полёта. Такая система не будет иметь дорогостоящей головки самонаведения и будет нуждаться в менее мощных органах коррекции, что приведёт к существенному упрощению и удешевлению изделия.

На АУТ при постоянном и порывистом ветре основным возмущающим фактором, действующим на ракету, является стабилизирующий момент, разворачивающий ее продольную ось по направлению вектора мгновенной воздушной скорости. Это вызывает значительное рассогласование с номинальной траекторией, в которой ось постоянно разворачивалась по вектору траекторной скорости (Рис. 1).

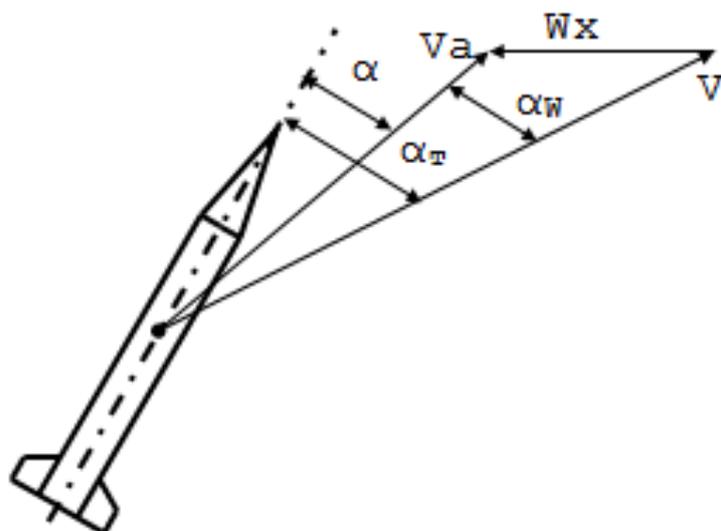


Рис. 1. Кинематические соотношения рассматриваемого полёта (плоскость тангажа)

Авторами предлагается принципиально новый закон управления, предусматривающий компенсацию управляющим моментом стабилизирующего момента при малом траекторном угле атаки. Это позволит избежать нежелательного разворота ракеты из-за стабилизации по мгновенной воздушной скорости (Рис. 2).

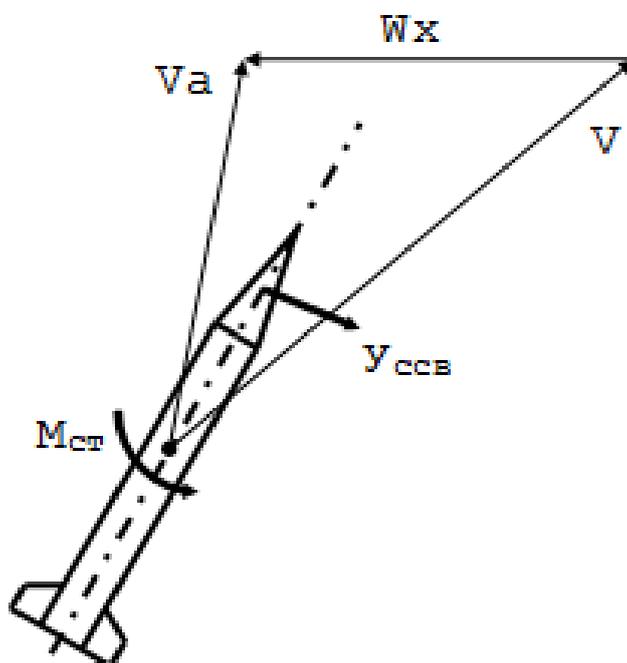


Рис.2. Схема работы ССВ при малом угле атаки.

При существенном отклонении углового положения ракеты от номинального (необходимость естественного разворота вектора скорости по траектории,

нерассмотренные возмущения) ССВ выключается и ракета вновь приобретает статическую устойчивость. Такой алгоритм функциональной коррекции должен позволить реализацию предусмотренной траектории, за счёт снижения колебаний угла атаки, вызванных ветровой нагрузкой.

Введём обозначения для случая наличия ветровой нагрузки:

$\alpha_T = \vartheta - \theta$  - угол атаки для траекторной скорости;

$\alpha_W = \frac{W_x \cdot \sin \theta}{V - W_x \cdot \cos \theta}$  - угол между векторами траекторной и воздушной скоростей.

В этом случае угол атаки выражается как

$$\alpha = \alpha_T - \alpha_W.$$

### Моделирование полёта БРМ

Поскольку на предварительном этапе необходимо оценить саму возможность уменьшения параметров рассеивания точек падения подобной системой, то для исследования была использована упрощённая математическая модель движения изделия в вертикальной плоскости (канал тангажа), в центральном гравитационном поле с атмосферой по ГОСТ 4401-81. В качестве изделия рассматривалась ракета с параметрами, близкими к характеристикам современной БРМ конструкции ЗАО АНТЦ. Динамика движения вокруг центра масса на данном этапе рассматривается исключительно на АУГ. Номинальная траектория для такого случая изображена на Рис. 3.

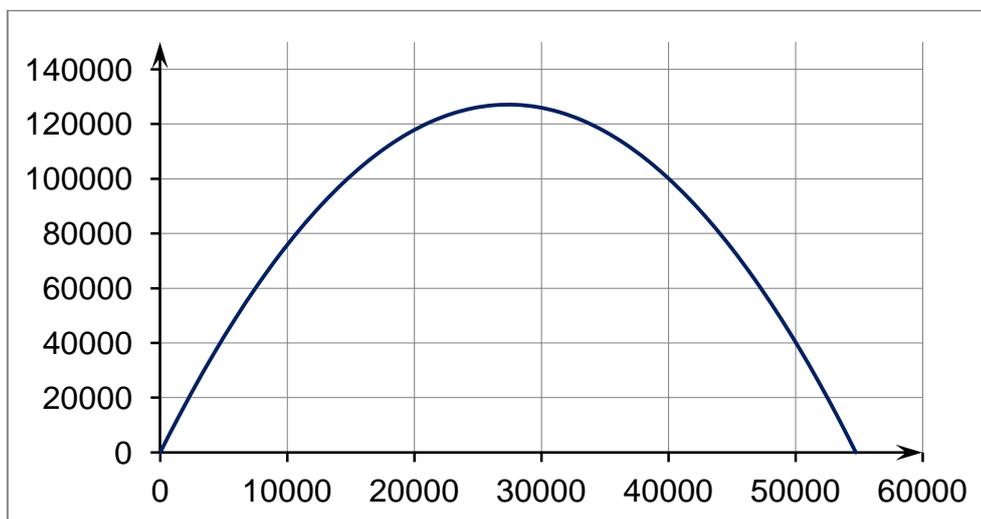


Рис. 3. Номинальная траектория оценочной модели

При номинальном режиме полёта ветер отсутствует, и вектор воздушной скорости совпадает с полной скоростью. Тогда  $\alpha_W = 0, \alpha = \alpha_T$ . Сам угол атаки при этом имеет крайне малую амплитуду гаснущих колебаний.

Как видно из графика на рис.4, максимальная амплитуда колебаний угла атаки составляет  $0.43^\circ$ , собственные колебания ракеты полностью гаснут примерно на пятой секунде полёта.

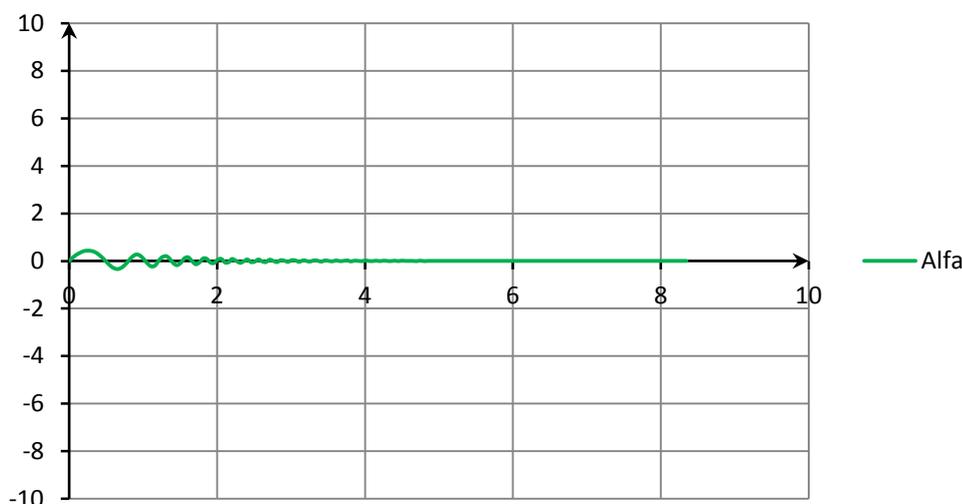


Рис. 4. Изменение угла атаки при отсутствии ветра

После получения номинальной траектории были получены возмущенные траектории с двумя видами ветровой нагрузки:

- 1) постоянный ветер (всё время полёта) 5 м/с. ;
- 2) порыв ветра (с 0 по 2 с полёта) 5 м/с.

Такие случаи были реализованы как для случая встречного, так и для попутного ветра.

Наиболее важными для рассмотрения являются изменения угла атаки, траекторного угла атаки и  $\alpha_w$ .

Предварительный анализ позволяет отметить, что наличие ветровой нагрузки в размере 15% от начальной скорости ракеты увеличивает амплитуду затухающих колебаний примерно в 20 раз. Максимальная амплитуда определяется углом атаки в начальный момент времени, равным  $-\alpha_w$  ( $\sim 9^\circ$ ). Частота этих колебаний и время переходного процесса не изменяются, что и подтверждено моделированием.

Проведение сравнения с номинальной траекторией позволило выявить отклонения точек падения при указанных возмущениях. Примечательно, что наибольший вклад в отклонение точки падения вносит ветер на первых двух секундах полёта. Попарное сравнение изменения углов атаки на Рис. 5 и Рис. 7, а также на Рис. 6 и рис. 8 позволяет сделать вывод, что особую важность парирование ветровой нагрузки приобретает именно в начале полёта, когда скорость имеет довольно малую величину. Сравнение отклонения точек падения для изученных возмущений подтверждает эту гипотезу. В частности, отклонение точки падения при порыве попутного ветра в начале траектории составляет  $\sim 90\%$  отклонения при, постоянном на всём АУТ попутном ветре.

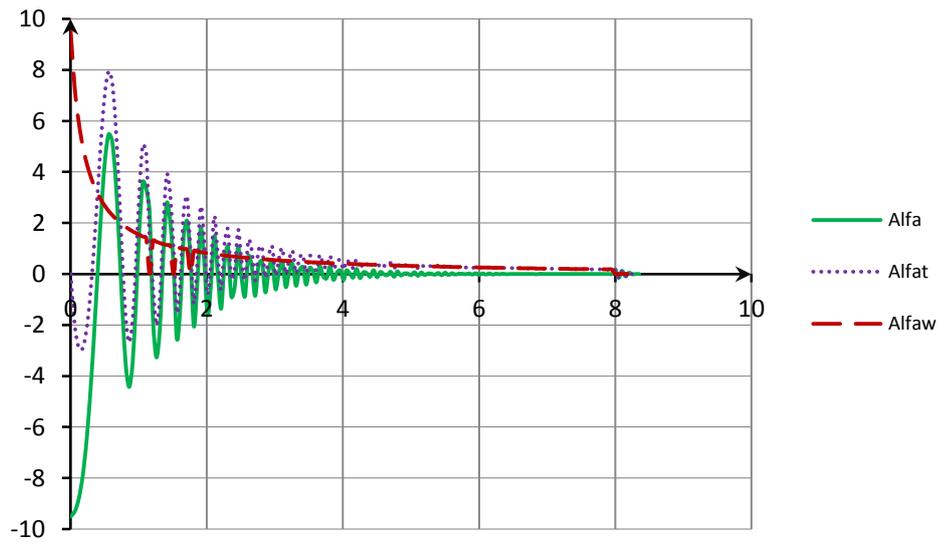


Рис. 5. Изменение углов атаки при постоянном попутном ветре

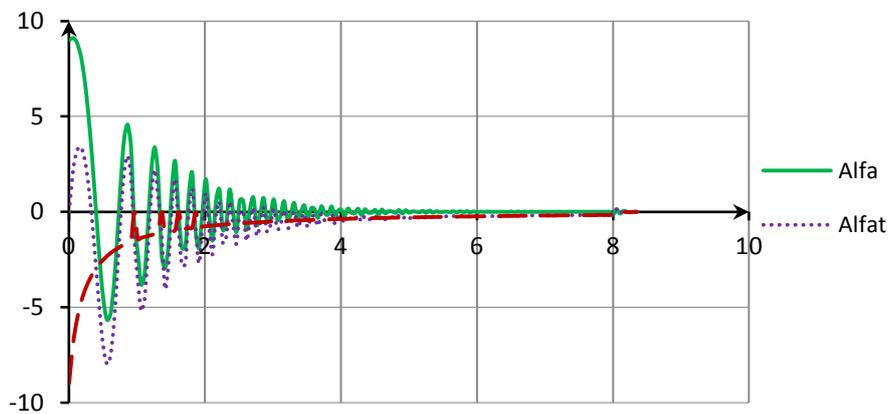


Рис. 6. Изменение углов атаки при постоянном встречном ветре

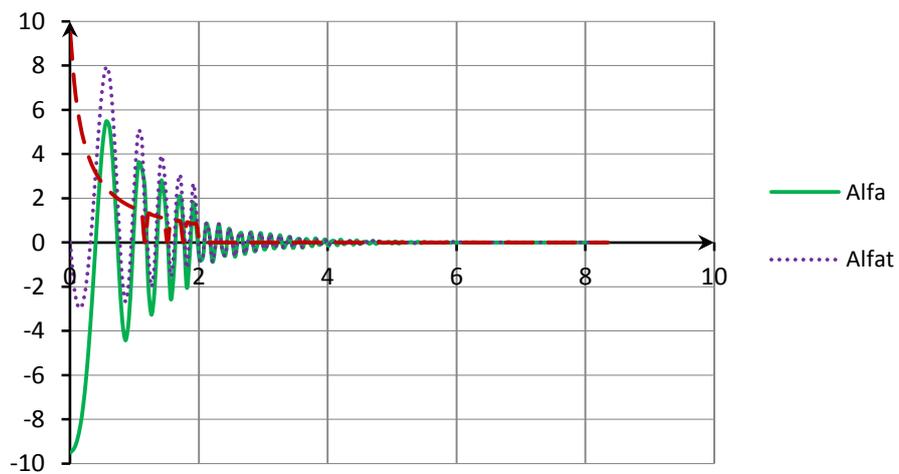


Рис. 7. Изменение углов атаки при порыве попутного ветра

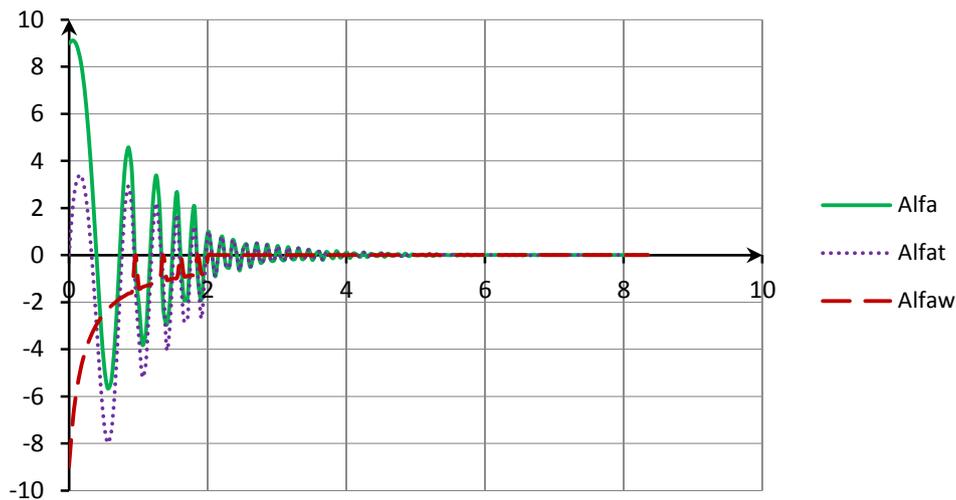


Рис. 8. Изменение углов атаки при порыве встречного ветра

### Имитационное моделирование полёта с ССВ

После этого в модель был внесён алгоритм работы ССВ на АУТ.

Предлагаемый закон управления на АУТ при наличии возмущений:

$$\begin{cases} M_{\text{ССВ}} = -k_1 \cdot M_{\text{СТ}} \text{ при } -\alpha_{\text{ТГ}} < \alpha_{\text{Т}} < \alpha_{\text{ТГ}} \\ M_{\text{ССВ}} = 0 \text{ при } |\alpha_{\text{Т}}| > \alpha_{\text{ТГ}} \end{cases}$$

Смоделируем корректируемый полёт и проанализируем работу этого алгоритма при порывах ветра. В результате введения предлагаемого алгоритма изменение угла атаки при наличии ветровой нагрузки значительно снижается (Рис. 9 и Рис. 10).

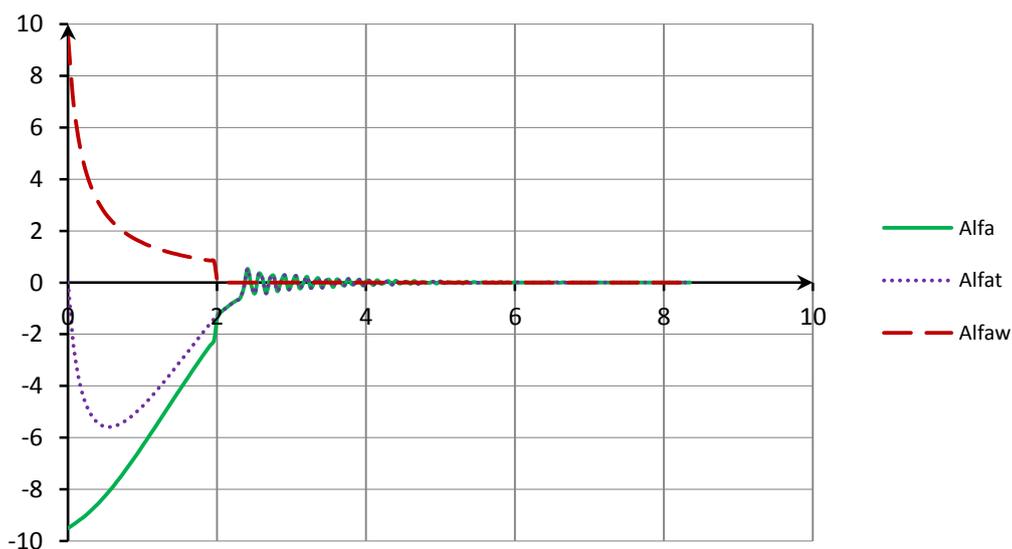
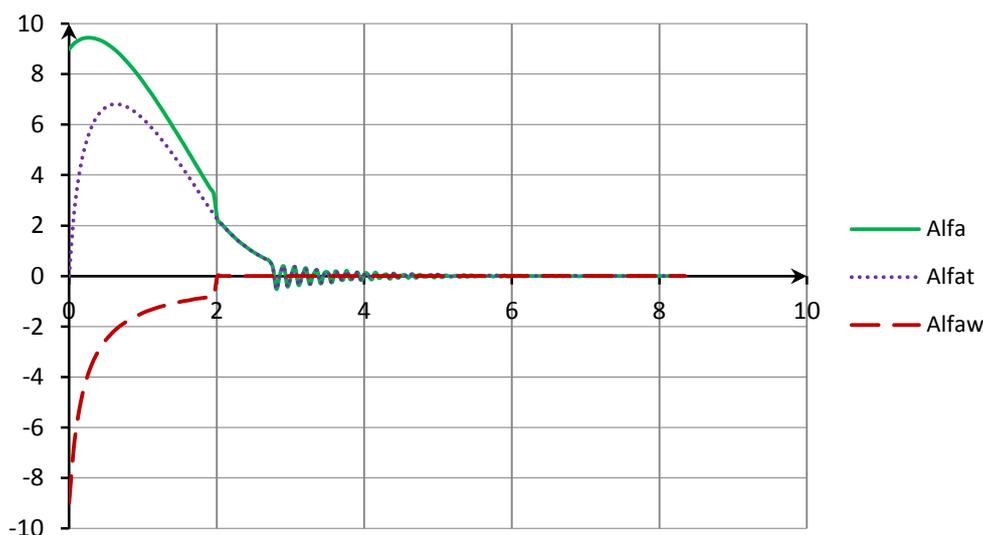


Рис. 9. Изменение углов атаки при парировании порыва попутного ветра



**Рис. 10.** Изменение углов атаки при парировании порыва встречного ветра

Работа ССВ значительно «сглаживает» изменение угла атаки, нивелируя колебательность процесса. При этом время переходного процесса остаётся тем же. Максимальное значение траекторного угла атаки уменьшается примерно на 2%. При этом амплитуда остаточных затухающих колебаний значительно снижается. Это приводит к тому, что БРМ с работающим двигателем отклоняется от вектора траекторной скорости на меньшую величину, поэтому уменьшается случайное возмущение по влиянию ветра на АУТ на отклонение координаты точки падения.

Следует помнить, что на данном этапе исследований результаты расчётов носят предварительный характер. Однако, по проведённым расчётам, работа предлагаемого алгоритма коррекции приводит к уменьшению отклонения точки падения на 55 - 65%, что позволяет рассчитывать на хорошие результаты дальнейшей исследовательской деятельности и модернизации подобных изделий.

Особый интерес для дальнейшего исследования имеет величина необходимого управляющего воздействия  $U_{свв}$ , однако корректная оценка этого параметра, как и уточнение условий и результатов функционирования предлагаемой ССВ, требуют создания более полной математической модели и соответствующего программного обеспечения.

## Заключение

Большая амплитуда колебаний угла атаки на АУТ приводит к значительному рассеиванию точек падения. В работе гипотеза о том, что наибольший вклад в отклонение точек падения ветровая нагрузка вносит именно в первые секунды полёта, что тривиально объясняется малой скоростью изделия на этом этапе.

Сформулирован алгоритм работы системы стабилизации по ветру, реализующий концепцию модернизации изделия. Основной задачей ССВ при данном алгоритме представлено препятствование нежелательному развороту ракеты по вектору воздушной

скорости, вызванному статической устойчивостью компоновки. Для проверки работоспособности данного алгоритма управления сформирована упрощённая математическая модель и создано соответствующее программное обеспечение. В результате предварительных расчётов получена качественная картина влияния ветровой нагрузки на динамику полёта ракеты, а также изучены результаты работы предлагаемого алгоритма управления. Детально изучены картины изменения угла атаки на АУТ, выявившие особую значимость парирования колебательности данного процесса в первые 2 секунды полёта. На данном этапе баллистического анализа подтверждена состоятельность предложенного алгоритма управления, сократившего отклонение точки падения на 55 - 65 %.

### Список литературы

1. Казаковцев В.П., Жилейкин В.Д. Обработка стрельб: метод. указания к лабораторным работам. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 27 с.
2. Илюхин С.Н. Синтез системы наведения и контура стабилизации методом логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАХ) на примере произвольной модели зенитной управляемой ракеты (ЗУР) // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 7. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/467279.html> (дата обращения 01.10.2015).
3. Швыркина О.С. Исследование движения корректируемого боеприпаса при воздействии переменной ветровой нагрузки // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 4. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/780683.html> (дата обращения 01.10.2015).
4. Дмитриевский А.А., Лысенко Л.Н. Внешняя баллистика: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2005. 608 с.
5. Аэродинамика: учеб. пособие / под ред. В.Т. Калугина М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 687 с.
6. Илюхин С.Н. Метод импульса силы для оценки энергетики управления полётом // Молодёжный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 8. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/606165.html> (дата обращения 01.10.2015).
7. Нгуен Хай Минь. Влияние ветрового воздействия на динамику движения корректируемых боеприпасов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2008. № 3. С. 39-51.
8. Беневольский С.В., Бурлов В.В., Казаковцев В.П. Баллистика: учебник для курсантов и слушателей ГРАУ / под ред. Л.Н. Лысенко. Пенза: ПАИИ, 2005. 510 с.
9. Емельянова Н.С. Программное обеспечение экспериментальных исследований на баллистической трассе // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 6. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/723443.html> (дата обращения 01.10.2015).
10. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник. В 3 т. Т. 3. Методы современной теории автоматического управления / под ред. Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 748 с.

## **Ballistic Analysis of Capability to Parry the Wind Load at Initial Flight Path of Promising Aircrafts**

S.N. Ilyukhin<sup>1,\*</sup>, V.P. Kazakovtsev<sup>1</sup>,  
V.V. Koryanov<sup>1</sup>

\*[ilyukhin.stepan@rambler.ru](mailto:ilyukhin.stepan@rambler.ru)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** ballistic, wind, correction, dispersion

---

The article describes a new approach to solving the problem of parrying the negative impact of the random wind loads at the initial stage of aircraft flight. Based on applied research and many years of practice is proved the usefulness of measures to eliminate the deviations caused by the wind at initial flight path.

The paper provides a theoretical justification and formulates the basic law of control to parry the product reversal under the action of random wind. Via example of a modified ballistic target the logic of the functioning of a promising technique for correcting orbital speed is clearly illustrated. This study analyses the influence of the wind load on the dispersion characteristics of the product impact points. To identify the qualitative picture of the process under study was examined flight of the aircraft in the vertical plane. In comparison with uncorrectable case, a trivial example of a mathematical model is used to have an initial assessment of the proposed technique effectiveness. As a determining parameter, was considered a changing angle of the aircraft attack during flight. Using authors-developed algorithms, significant reduction in the dispersion of the product impact points was revealed upon performed calculations, thus bearing evidence of using this method in promising aircrafts of the class under consideration.

### **References**

1. Kazakovtsev V.P., Zhileikin V.D. *Obrabotka strel'by* [Processing of results of shooting]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2009. 27 p. (in Russian).
2. Ilyukhin S.N. Synthesis of targeting system and stabilization loop by the method of logarithmic amplitude-frequency characteristics on the example of arbitrary model of surface-to-air missile. *Molodezhnyi nauchno-tehnicheskii vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Youth Science and Technology Herald of the Bauman MSTU*, 2012, no. 7. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/467279.html> , accessed 01.10.2015. (in Russian).
3. Shvyrkina O.S. Motion study of corrected munition when exposed to variable wind load. *Molodezhnyi nauchno-tehnicheskii vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Youth Science and*

- Technology Herald of the Bauman MSTU*, 2015, no. 4. Available at:  
<http://sntbul.bmstu.ru/doc/780683.html> , accessed 01.10.2015. (in Russian).
4. Dmitrievskii A.A., Lysenko L.N. *Vneshnyaya ballistika* [External ballistics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 608 p. (in Russian).
  5. Kalugin V.T., ed. *Aerodinamika* [Aerodynamics]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 687 p. (in Russian).
  6. Ilyukhin S.N. Method of impulse of force to evaluate the flight control power. *Molodezhnyi nauchno-tehnicheskii vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Youth Science and Technology Herald of the Bauman MSTU*, 2013, no. 8. Available at:  
<http://sntbul.bmstu.ru/doc/606165.html> , accessed 01.10.2015. (in Russian).
  7. Nguyen Hay Minh. Influence of Wind Impact on Dynamics of Ammunition Motion Being Corrected. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*, 2008, no. 3, pp. 39-51. (in Russian).
  8. Benevol'skii C.B., Burlov V.V., Kazakovtsev V.P. *Ballistika* [Ballistics]. Penza, PAII Publ., 2005. 510 p. (in Russian).
  9. Emel'yanova N.S. Software of experimental studies on ballistic track. *Molodezhnyi nauchno-tehnicheskii vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Youth Science and Technology Herald of the Bauman MSTU*, 2014, no. 6. Available at:  
<http://sntbul.bmstu.ru/doc/723443.html> , accessed 01.10.2015. (in Russian).
  10. Egupov N.D., ed. *Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya. V 3 t. T. 3. Metody sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of classical and modern automatic control theory. In 3 vols. Vol. 3. Methods of modern automatic control theory]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2000. 748 p. (in Russian).