



УДК 623.54
ГРНТИ 78.21.47

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ БОМБ С ТОРМОЗНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ С УЧЕТОМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ

А.В. ФИЛИППОВ

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

В.В. ЛЕБЕДЕВ, кандидат технических наук, доцент

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

А.В. НИКОЛАЕВ, кандидат технических наук

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

В статье рассмотрены факторы, влияющие на точность применения авиационных бомб с тормозными устройствами, обоснована необходимость детального представления параметров атмосферы и совершенствования программно-математического обеспечения при решении баллистических задач. Описана структура модели движения неуправляемых авиационных средств поражения в расчетной среде Matlab Simulink, позволяющей учитывать изменение параметров атмосферы в зависимости от времени и географического положения цели. Использование разработанной модели позволит повысить достоверность результатов испытаний прицельно-навигационных комплексов в части оценки точностных характеристик применения неуправляемых авиационных средств поражения.

Ключевые слова: авиационная бомба, параметры атмосферы, точность применения, баллистическое обеспечение, элемент траектории.

AIRCRAFT BOMBS WITH BRAKING DEVICES MOTION PATH SIMULATION TAKING INTO ACCOUNT THE SPACE-TIME CHANGES IN THE ATMOSPHERE PARAMETERS

A.V. FILIPPOV

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

V.V. LEBEDEV, Candidate of Technical sciences, Associate Professor

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

A.V. NIKOLAEV, Candidate of Technical sciences

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

The article discusses the factors affecting the accuracy of the use of aircraft bombs with braking devices. The necessity of a detailed presentation of the atmospheric parameters and improvement of the software and mathematical support for solving ballistic problems is substantiated. The structure of the motion model of unguided aircraft weapons in the Matlab Simulink computational environment is described, which allows to take into account the change of the atmosphere parameters depending on the time and geographical location of the target. The use of the developed model will increase the navigation target acquisition systems test results reliability in terms of assessing the accuracy characteristics of the unguided aircraft weapons use.

Keywords: aircraft bomb, atmospheric parameters, application accuracy, ballistic support, trajectory element.



Введение. Развитие военной науки и техники постоянно выдвигает перед авиационной баллистикой задачи, требующие дальнейшего исследования с целью получения практических рекомендаций по проектированию, эксплуатации и боевому применению авиационных боеприпасов и, главным образом, прицельных систем. Для их успешного решения баллистика широко использует все современные достижения фундаментальной и прикладной науки. Структура математических моделей определяется основными положениями математики, физики и теоретической механики. Изучение сил и моментов, действующих на снаряд, опирается на данные аэродинамики, геофизики и метеорологии.

Несмотря на бурное развитие управляемых средств вооруженной борьбы, не теряет своей актуальности неуправляемое авиационное вооружение. Данное обстоятельство объясняется его относительной низкой стоимостью. В случае затяжного военного конфликта авиационные бомбардировочные средства поражения будут представлять основное оружие, так как экономика любой страны не способна безболезненно обеспечить массовое производство управляемых средств поражения.

Процесс движения неуправляемого авиационного средства поражения (НАСП) имеет для исследования вполне понятные и очень серьезные трудности, связанные с тем, что полностью воспроизвести на Земле условия стрельбы (бомбометания) практически невозможно.

Постоянный непрерывный прогресс, наблюдаемый в последние годы в области развития ЭВМ и различных численных методов, позволяет наряду с дорогостоящими натурными экспериментами проводить численные эксперименты, которые еще на этапе предварительной проработки средств поражения и прицельных систем позволяют выбрать рациональные или даже оптимальные направления в последующей экспериментальной и конструкторской работе. Из-за высокой стоимости летные испытания по оценке точности применения НАСП проводятся не во всей области допустимых режимов стрельбы, вследствие чего невозможно всесторонне оценить качество функционирования прицельно-навигационных комплексов. Поэтому недостатки определенных режимов применения НАСП обнаруживаются лишь во время эксплуатации и боевой подготовки войск.

Актуальность. Большая скорость и высота полета самолета, его маневр и многие другие факторы оказывают свое специфическое воздействие на характер движения авиационных бомб (АБ) с тормозными устройствами (ТУ) и точность прогнозирования их траектории с целью повышения эффективности стрельбы.

Изменение параметров атмосферы (давления, температуры, плотности воздуха, скорости ветра) является одним из возмущающих факторов, вызывающих отклонение АБ с ТУ от расчетной траектории. Причем изменение параметров атмосферы происходит как в зависимости от высоты и района расчетной точки, так и от времени. Воздушные течения в атмосфере формируются под воздействием температуры воздуха и атмосферного давления, шероховатости поверхности Земли, ее вращения и других факторов. Такая многофакторная зависимость создает значительную изменчивость параметров атмосферы и проявляется в сезонных колебаниях циркуляции и пульсаций различных масштабов от циклонов и антициклонов до мелких вихрей. Данный факт приводит к появлению дополнительных ошибок в расчете траектории движения НАСП по сравнению с эталонной траекторией, рассчитанной прицельно-навигационным комплексом с учетом параметров реальной атмосферы. При этом известно, что для различных вариантов применения НАСП влияние параметров атмосферы на отдельные участки траектории движения, имеющие различные значения баллистических характеристик так же различно. В качестве примера рассмотрим влияние ветра на траекторию движения АБ с ТУ (рисунок 1).

Анализ рисунка 1 показывает хорошую сходимость с логикой изменения баллистических характеристик АБ с ТУ на траектории движения. На начальном участке отмечается увеличение значения ветровой функции, что объясняется задействованием ТУ. Дальнейшее уменьшение значения ветровой функции связано с увеличением вертикальной скорости движения АБ с ТУ и, как следствие, незначительным влиянием ветра на данном участке траектории.

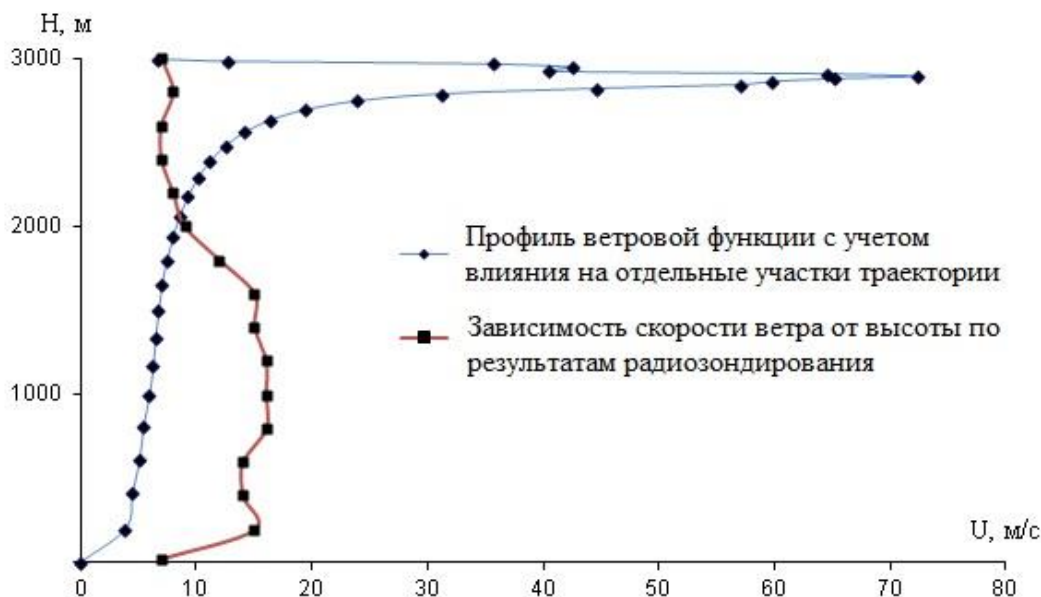


Рисунок 1 – Влияние ветра на траекторию движения НАСП

Параметры атмосферы, как известно, существенно зависят от географических условий, сезонности, высоты точки над уровнем моря и оказывают большое влияние на точность применения НАСП. В связи с этим в настоящее время возникает необходимость более детального представления их значений при решении баллистических задач. Это обусловлено:

постоянным повышением требований к учёту факторов внешней среды при расчёте движения АБ с ТУ для повышения точности стрельбы;

повышением требований к зонам рассеивания АБ с ТУ в условиях наличия наземной инфраструктуры и нанесения точечных ударов;

наличием достоверно установленных фактов глобального изменения высотного распределения метеопараметров, которое необходимо учитывать при метеообеспечении применения перспективных образцов вооружения;

отсутствием технической возможности измерения параметров атмосферы во всем разрезе высоты применения АБ с ТУ в режиме реального времени;

сокращением числа лётных испытаний новых образцов техники, которое может быть компенсировано только повышением их информативности на основе детального учёта факторов внешней среды;

необходимостью снижения значительных материальных затрат на проведение мероприятий по обеспечению безопасности и экологической чистоты пусков.

В то же время возможности существующей нормативно-методической базы по моделированию параметров атмосферы не позволяют с требуемой эффективностью решать практические задачи. Данный факт приводит к снижению достоверности результатов испытаний прицельно-навигационных комплексов в части решения задачи прицельного бомбометания АБ с ТУ.

Постоянное усложнение решаемых задач, их высокая трудоемкость делают невозможным дальнейшее совершенствование баллистического обеспечения без автоматизации рабочих мест соответствующих специалистов путем создания проблемно-ориентированных интегрированных программных систем на базе персональных электронно-вычислительных машин [1–4].

Целью работы является разработка программно-математического обеспечения, позволяющего с требуемой точностью рассчитывать траектории движения АБ с ТУ с учетом сезонных вариаций параметров атмосферы.



В настоящее время эффективным инструментом для производства баллистических расчетов являются математические модели движения НАСП, в том числе реализованные средствами Matlab.

Для канонической баллистической модели движения НАСП разработана S-модель в среде Simulink, представленная на рисунке 2.

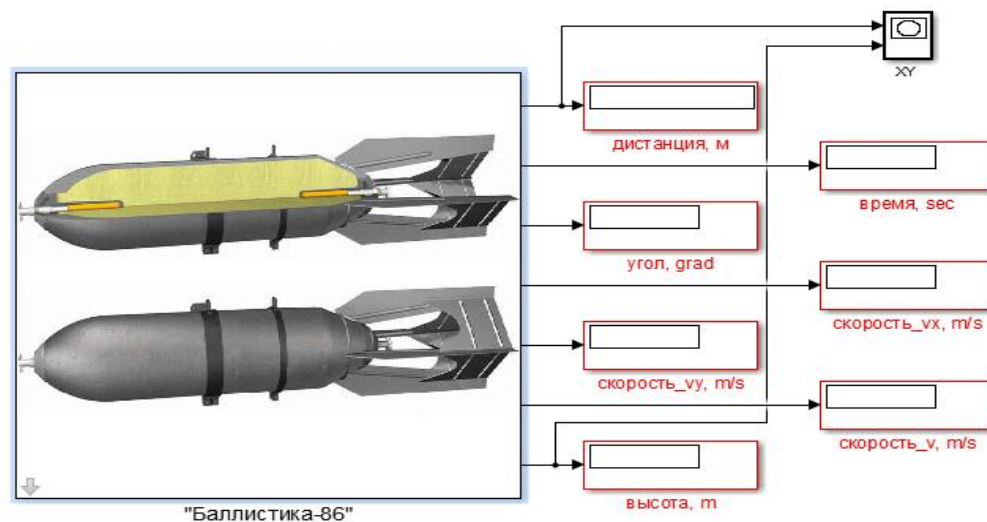


Рисунок 2 – Основные блоки и подсистемы модели движения НАСП

На рисунке 2 представлен контекстный уровень модели движения НАСП [5]. Он состоит из семи блоков типа «Display» и подсистемы «Баллистика-86».

Блоки типа «Display» предназначены для:

блок «distance», отображает значение расстояния по поверхности Земли между проекцией точки бросания на поверхность Земли и точкой падения снаряда (относ), м;

блок «time», отображает значение времени движения НАСП от начальной до конечной точки (время падения), с;

блок «angle», отображает значение угла наклона вектора скорости НАСП к плоскости горизонта конечной точки траектории (угол падения), градусы;

блок «speed_vx», отображает значение скорости НАСП по оси x в конечной точке ее траектории (окончательная скорость по оси x), м/с;

блок «speed_vy», отображает значение скорости НАСП по оси y в конечной точке ее траектории (окончательная скорость по оси y), м/с;

блок «hight», отображает значение высоты НАСП в конечной точке траектории, м;

блок «speed_v», отображает значение скорости НАСП в конечной точке ее траектории (окончательная скорость), м/с.

Разработанная модель движения НАСП отличается от существующих наличием подсистемы «Поправочные коэффициенты». Данная подсистема осуществляет корректировку значений горизонтального ветра, температуры и плотности воздуха на различных высотах в зависимости от координатного положения цели.

На рисунке 3 представлен общий вид блоков подсистемы «Поправочные коэффициенты».

В подсистеме «координаты» находятся вводимые данные о местоположении цели и времени года (месяц). В блоках сезонных характеристик (рисунок 4) производится выборка в зависимости от высоты полета (зон), широты (местоположения) и времени года значений давления δP_M , плотности $\delta \rho_M$, температуры воздуха T_M , зональной U_M и меридиальной W_M составляющих скорости ветра.

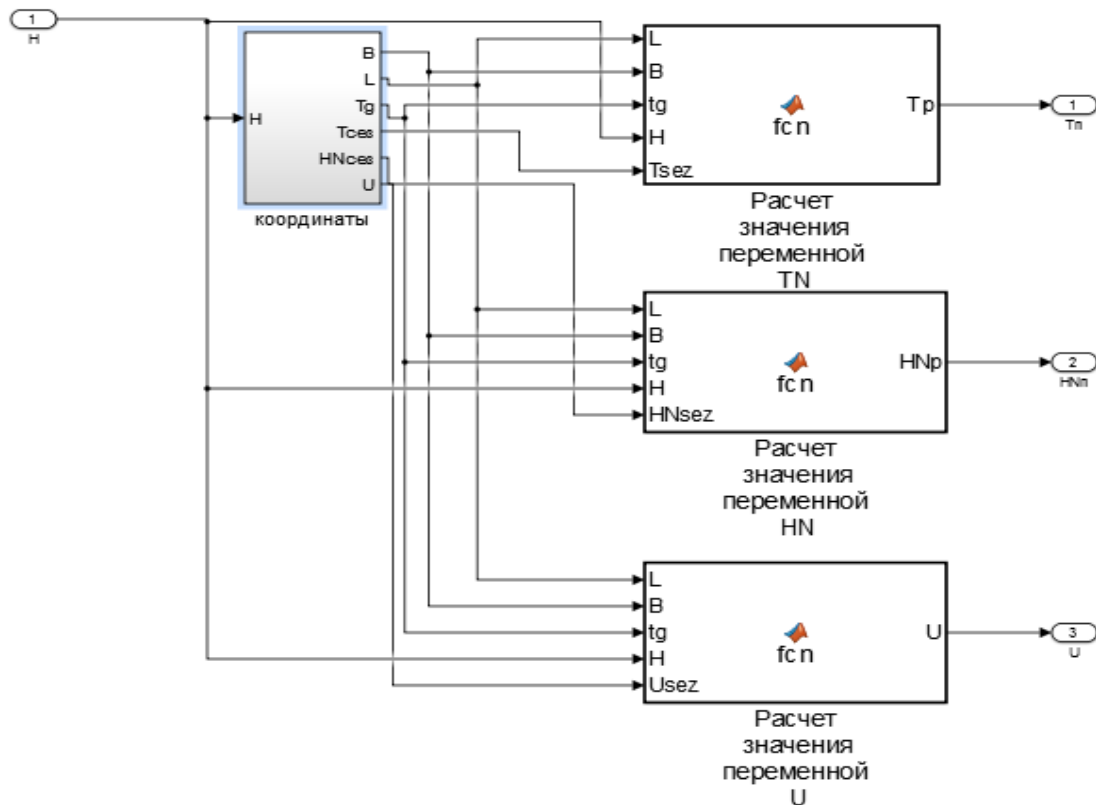


Рисунок 3 – Подсистема «Поправочные коэффициенты»

Значения средних параметров атмосферы рассчитываются в соответствии с [6]:

$$\delta P_M(H, t_2, B, L) = \sum_{i=1}^N C_i^P \cdot S_1(t_2) \cdot G_M(B) \cdot R_n(L), \quad (1)$$

$$\delta \rho_M(H, t_2, B, L) = \sum_{i=1}^N C_i^{\rho} \cdot S_1(t_2) \cdot G_M(B) \cdot R_n(L), \quad (2)$$

$$T_M(H, t_2, B, L) = \sum_{i=1}^N C_i^T \cdot S_1(t_2) \cdot G_M(B) \cdot R_n(L), \quad (3)$$

$$U_M(H, t_2, B, L) = \sum_{i=1}^N C_i^U \cdot S_1(t_2) \cdot G_M(B) \cdot R_n(L), \quad (4)$$

$$W_M(H, t_2, B, L) = \sum_{i=1}^N C_i^W \cdot S_1(t_2) \cdot G_M(B) \cdot R_n(L), \quad (5)$$

где H – геометрическая высота над уровнем моря, (км);

t_2 – номер месяца;

B, L – широта и долгота расчетной точки;

N – число коэффициентов аппроксимации;

$C_i^P, C_i^{\rho}, C_i^T, C_i^U, C_i^W$ – коэффициенты аппроксимации.

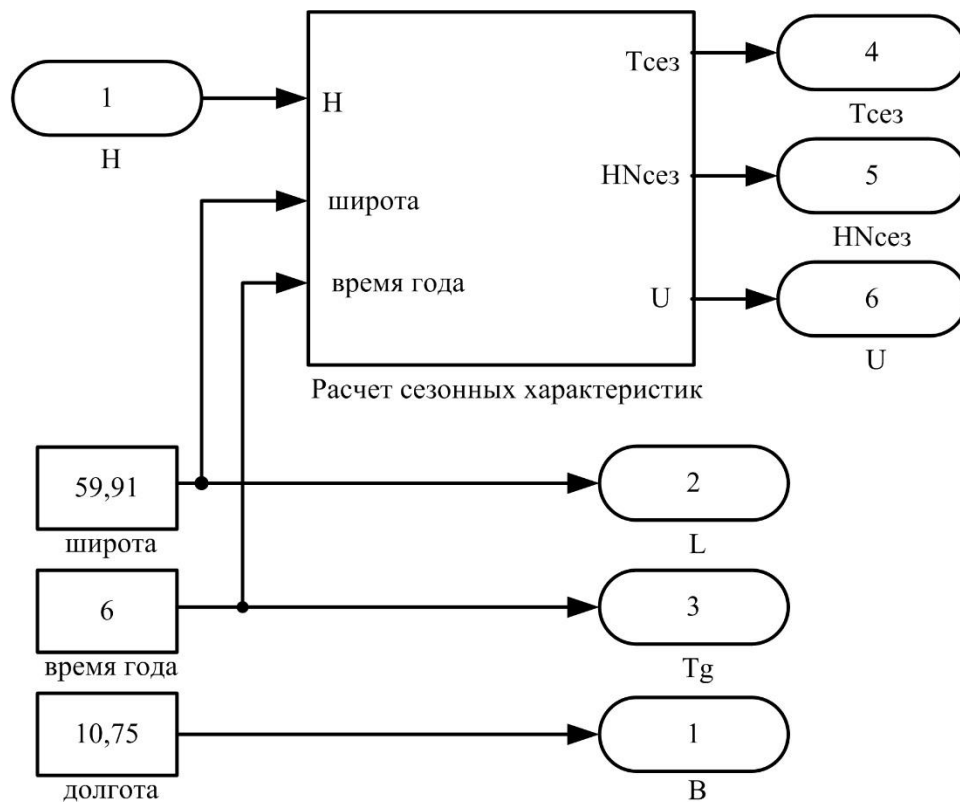


Рисунок 4 – Общая структура блоков сезонных характеристик

Тригонометрические функции вычисляются по следующим соотношениям:

$$S_1(t_z) = \begin{cases} 1, \text{ при } l = 1, \\ \cos \left[\frac{\pi}{6} \cdot (t_z - 1) \cdot \frac{l}{2} \right], \text{ при } l = 2, 4 \dots 12, \\ \sin \left[\frac{\pi}{6} \cdot (t_z - 1) \cdot \frac{l-1}{2} \right], \text{ при } l = 3, 5 \dots 11, \end{cases} \quad (6)$$

$$G_M(B) = \cos \left[\frac{\pi(B+90)}{180} \cdot (m-1) \right], \text{ при } m = 1 \dots 19, \quad (7)$$

$$R_n(L) = \begin{cases} 1, \text{ при } n = 1, \\ \cos \left[\frac{\pi \cdot L}{180} \cdot \frac{n}{2} \right], \text{ при } n = 2, 4 \dots 36, \\ \sin \left[\frac{\pi \cdot L}{180} \cdot \frac{n-1}{2} \right], \text{ при } n = 3, 5 \dots 35. \end{cases} \quad (8)$$

При моделировании вариаций метеопараметров вертикальные профили давления и составляющих скорости ветра задаются разложением:



$$\sigma_{p_{cl}}(H) = \sigma_p(H, t_z, B) \sum_{j=1}^{11} X_{pj}(H) \alpha_j, \quad (9)$$

$$\Delta U_{cl}(H) = \sigma_u(H, t_z, B) \cdot \sum_{j=0}^{11} X_{vj}(H) \beta_j, \quad (10)$$

$$\Delta W_{cl}(H) = \sigma_w(H, t_z, B) \cdot \sum_{j=0}^{11} X_{vj}(H) \gamma_j, \quad (11)$$

где $\beta_j, \gamma_j \in N(0,1)$.

Вертикальные профили плотности и температуры рассчитываются на основе соотношений:

$$\delta \rho_{cl}(H_s) = \delta p_{cl}(H_s) - \frac{R_z(T_{cm}(H_s) + 273)}{1000 g_0} \frac{d}{dH} [\delta p_{cl}(H_s)], \quad (12)$$

$$\Delta T_{cl}(H_s) = \frac{T_{cm}(H_s) + 273}{100} [\delta p_{cl}(H_s) - \delta \rho_{cl}(H_s)], \quad (13)$$

где $R_z = 287,053$ Дж/кг, $g_0 = 9,81$ м/с.

Производные относительного давления по высоте для её узловых значений вычисляются следующим образом:

$$\frac{d}{dH} [\delta p_{cl}(H_1)] = \frac{\delta p_{cl}(H_2) - \delta p_{cl}(H_1)}{H_2 - H_1}, \text{ при } s = 1, \quad (14)$$

$$\frac{d}{dH} [\delta p_{cl}(H_{17})] = \frac{\delta p_{cl}(H_{17}) - \delta p_{cl}(H_{16})}{H_{17} - H_{16}}, \text{ при } s = 17, \quad (15)$$

$$\frac{d}{dH} [\delta p_{cl}(H_s)] = \frac{\delta p_{cl}(H_{s+1}) - \delta p_{cl}(H_{s-1})}{H_{s+1} - H_{s-1}}, \text{ при } s = 2 \dots 16. \quad (16)$$

Для всех промежуточных значений высоты параметры атмосферы определяются линейной интерполяцией. Среднеквадратические отклонения метеопараметров точек Южного полушария принимаются равными значениями для соответствующих точек Северного полушария со сдвигом по времени 6 месяцев. Зависимости точности аппроксимации средних месячных значений параметров атмосферы от числа коэффициентов, численные значения коэффициентов аппроксимации и соответствующих им индексов приведены в [6].

Для верификации модели проведен сравнительный анализ значений баллистических таблиц с результатами вычислений в среде Matlab Simulink для различных режимов применения НАСП. Установлено, что ошибка расчета относ. НАСП при использовании разработанного программно-математического обеспечения не превышает 1%, что позволяет использовать его при решении задач баллистического обеспечения применения НАСП.

Выводы. Таким образом, в результате проведенных исследований получены следующие научно-технические результаты: проведен анализ влияния параметров атмосферы на точность применения АБ с ТУ, разработана модель движения АБ с ТУ, позволяющая с требуемой



точностью рассчитывать ее траекторию движения. Модель может быть использована как основа информационно-вычислительной системы испытательных и войсковых полигонов ВВС, наземных баллистических комплексов и трасс, что позволит специалистам уже на этапе разработки и испытаний в наземных условиях выявить недостатки, выработать необходимые рекомендации разработчику на доработку прицельно-навигационных комплексов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельский А.Б., Постников А.Г. Повышение точности применения неуправляемых авиационных средств поражения за счет совершенствования баллистических алгоритмов бортовых вычислительных систем летательных аппаратов // Известия РАН. 2014 г. вып. № 3. С. 60–69.

2. Шейгас А.К. Факторы, влияющие на элементы траектории бомбы: учет в перспективных системах бомбометания // Сборник научных работ Харьковского университета Воздушных Сил. 2014. вып. № 3 (40). С. 44–46.

3. Лебедев В.В., Моисеев С.Н., Филиппов А.В. Анализ влияния ветровой функции реальной атмосферы на траекторию движения объекта со сложной баллистикой // Сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции «Калибр» Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2018. Т. 23. № 3. С. 242–248.

4. Николаев А.В., Блохин В.М., Филиппов А.В. Использование модели локально-сезонных вариаций атмосферы в баллистических расчетах авиационных средств поражения // Сборник научных статей по материалам VI Международной научно-практической конференции «Академические Жуковские чтения» Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2018. Т. 3. С. 190–195.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019661861 Российская Федерация. Траектория-82 / Вытришко Ф.М. [и др.]; заявители и правообладатели Вытришко Ф.М., Николаев А.В., Филиппов А.В. № 2019660816; заявл. 02.09.19; опубл. 10.09.19, Бюл. № 8.

6. Глобальная справочная модель атмосферы на высотах от 0 до 100 км для баллистического обеспечения ракетно-космической практики. Москва: ГК «Роскосмос», 2016. 98 с.

REFERENCES

1. Bel'skij A.B., Postnikov A.G. Povyshenie tochnosti primeneniya neupravlyaemyh aviacionnyh sredstv porazheniya za schet sovershenstvovaniya ballisticheskikh algoritmov bortovyh vychislitel'nyh sistem letatel'nyh apparatov // Izvestiya RARAN. 2014g. vyp. № 3. pp. 60–69.

2. Shejgas A.K. Faktory, vliyayushchie na `elementy traektorii bomby: uchet v perspektivnyh sistemah bombometaniya // Sbornik nauchnyh rabot Har'kovskogo universiteta Vozdushnyh Sil. 2014. vyp. № 3 (40). pp. 44–46.

3. Lebedev V.V., Moiseev S.N., Filippov A.V. Analiz vliyaniya vetrovoj funkicii real'noj atmosfery na traektoriyu dvizheniya ob`ekta so slozhnoj ballistikoj // Sbornik nauchnyh statej po materialam II Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Kalibr» Voronezh: VUNC VVS «VVA», 2018. T. 23. № 3. pp. 242–248.

4. Nikolaev A.V., Blohin V.M., Filippov A.V. Ispol'zovanie modeli lokal'no-sezonnyh variacij atmosfery v ballisticheskikh raschetah aviacionnyh sredstv porazheniya // Sbornik nauchnyh statej po materialam VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Akademicheskie Zhukovskie chteniya» Voronezh: VUNC VVS «VVA», 2018. T. 3. pp. 190–195.

5. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya `EVM 2019661861 Rossijskaya Federaciya. Traektoriya-82 / Vytrishko F.M. [i dr.]; zayaviteli i pravoobladateli Vytrishko F.M., Nikolaev A.V., Filippov A.V. № 2019660816; zayavl. 02.09.19; opubl. 10.09.19, Byul. № 8.



6. Global'naya spravoch'naya model' atmosfery na vysotah ot 0 do 100 km dlya ballisticheskogo obespecheniya raketno-kosmicheskoy praktiki. Moskva: GK «Roskosmos», 2016. 98 p.

© Филиппов А.В., Лебедев В.В., Николаев А.В., 2019

Филиппов Андрей Владимирович, адъюнкт кафедры специального вооружения, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, sholts290@rambler.ru.

Лебедев Вадим Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры специального вооружения, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, ww168@mail.ru.

Николаев Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры специального вооружения, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, nikolaev21@mail.ru.