



УДК 621.892  
ГРНТИ 45.53.99

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА НАГРЕВА ОТКРЫТОЙ СПИРАЛИ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА АЭРОДРОМНОГО КОНДИЦИОНЕРА

*В.И. РЯЖСКИХ, доктор технических наук, профессор  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессор Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
А.В. ИВАНОВ, кандидат технических наук, доцент  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессор Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
А.А. ХВОСТОВ, доктор технических наук, профессор  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессор Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
А.А. ЖУРАВЛЕВ, кандидат технических наук, доцент  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессор Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

На основе тепловых балансовых соотношений получено уравнение динамики нагрева открытой спирали нагревательного элемента аэродромного кондиционера. Математическая модель нагрева дополнена критериальными соотношениями, которые характеризуют условия конвективного теплообмена нагретой спирали с окружающей воздушной средой.

*Ключевые слова:* теплообмен, конвекция, нагрев спирали, нихром, нестационарный теплообмен, температурное поле, моделирование, кондиционер.

### AIRFIELD CONDITIONER HEATING ELEMENT OPEN COIL NON-STATIONARY THERMAL HEAT PROCEDURE MODELING

*V.I. RIAZHISKIKH, Doctor of Technical Sciences, Full Professor  
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)  
A.V. IVANOV, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)  
A.A. KHVOSTOV, Doctor of Technical Sciences, Full Professor  
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)  
A.A. ZHURAVLEV, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)*

The airfield conditioner heating element open coil heat dynamics equation has been obtained on the basis of thermal balance ratio. The heat mathematical model is augmented with the criterion correlations, that characterize the conditions of the heated coil convective thermal transfer with the surrounding air environment.

*Keywords:* heat transfer, convection, coil heating, nichrome, non-stationary heat transfer, temperature field, modeling, conditioner.

Успешное и эффективное выполнение поставленных задач требует создания и поддержания определенного микроклимата в кабине воздушного судна (ВС) и его отсеках.

К числу наиболее важных параметров микроклимата относится температура окружающего воздуха. Влияние температуры воздуха в кабине ВС на организм летчика



связано, в первую очередь, с сужением или расширением кровеносных сосудов кожи. Под действием низких температур воздуха кровеносных сосудов кожи сужаются, в результате чего замедляется поток крови к поверхности тела и снижается теплоотдача от поверхности тела за счёт конвекции и излучения. При высоких температурах окружающего воздуха наблюдается обратная картина: за счёт расширения кровеносных сосудов кожи и увеличения притока крови существенно увеличивается теплоотдача.

Для создания рациональных тепловых режимов используют аэродромные кондиционеры. В режиме «Обогрев» в их конструкции используют нагревательные приборы, рабочими элементами которых являются открытые спирали, трубчатые электрические нагреватели ТЭНов, металлокерамические нагреватели, позисторы и пр.

В работах [1, 2] представлены результаты сравнения основных характеристик ТЭНов и открытых спиралей. Показано, что для условий интенсивного и равномерного обогрева заданных объемов нагревательные элементы в виде открытых спиралей имеют безусловные и очевидные преимущества в сравнении с ТЭНами.

В этой связи определенный практический интерес представляет создание математической модели нагревательного элемента в виде открытой спирали и изучение тепловых режимов работы спирали при различных условиях конвективного теплообмена между спиралью и окружающей воздушной средой.

Рассмотрим открытую спираль в виде однородного проводника, по которому протекает электрический ток [3]. Количество теплоты, которое выделяется в проводнике за счет прохождения электрического тока, расходуется на нагрев проводника и отведение с поверхности конвекцией (излучением при этом пренебрегаем):

$$I^2 R d\tau = Gcd(t - t_0) + \alpha F(t - t_0) d\tau, \quad (1)$$

где  $I$  – сила тока, проходящего по проводнику, А;  $R$  – сопротивление проводника, Ом;  $G$  – масса проводника, кг;  $c$  – удельная теплоемкость материала проводника, Дж/(кг·К);  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup> К);  $F$  – площадь поверхности теплообмена проводника, м<sup>2</sup>;  $t$  – температура проводника, °С;  $t_0$  – начальная температура проводника (равна температуре воздуха, окружающего проводник), °С;  $\tau$  – время, с.

Поскольку нагревательные элементы аэродромного кондиционера изготавливают из материалов с низким температурным коэффициентом сопротивления (нихром, фехраль), то при составлении уравнения теплового баланса (1) полагаем, что сопротивление проводника не зависит от его температуры.

С целью снижения размерности задачи введем новую переменную  $\Theta$  – перегрев (избыточная температура) спирали

$$\Theta = t - t_0. \quad (2)$$

С учетом этого уравнение теплового баланса открытой спирали в динамике переписываем в виде

$$\frac{d\Theta}{d\tau} + \frac{\alpha F}{Gc} \Theta = \frac{I^2 R}{Gc}. \quad (3)$$

Решая последнее уравнение при начальном условии  $\Theta|_{\tau=0} = 0$ , получим закон изменения избыточной температуры спирали при ее нагреве электрическим током:



$$\Theta = \frac{I^2 R}{\alpha F} \left( 1 - e^{-\frac{\alpha F}{Gc} \tau} \right). \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что нагрев спирали протекающим электрическим током происходит по экспоненциальной кривой. Как видно, с течением времени темп увеличения температуры спирали замедляется и при  $\tau \rightarrow \infty$  температура достигает максимального установившегося значения:

$$\Theta_{\max} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \left( \frac{I^2 R}{\alpha F} \left( 1 - e^{-\frac{\alpha F}{Gc} \tau} \right) \right) = \frac{I^2 R}{\alpha F}. \quad (5)$$

Вводя в уравнение нагрева (4) величину

$$T = \frac{Gc}{\alpha F}, \quad (6)$$

запишем уравнение динамики нагрева (4) в виде:

$$\Theta = \frac{I^2 R}{\alpha F} \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{T}} \right) = \Theta_{\max} \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{T}} \right). \quad (7)$$

Величина  $T$ , входящая в уравнение (7), называется постоянной времени нагрева и представляет собой отношение теплопоглощающей способности тела к его теплоотдающей способности. Значение постоянной времени зависит от размеров, площади поверхности и свойств проводника и не зависит от времени и температуры.

С учетом формулы (2) закон изменения температуры (7) может быть представлен как

$$t = t_0 + \frac{I^2 R}{\alpha F} \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{T}} \right). \quad (8)$$

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , входящий в уравнение нагрева, может быть определен по критерию Нуссельта  $Nu$ , который характеризует подобие процессов теплопереноса на границе между телом и потоком воздуха

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}, \quad (9)$$

где  $d$  – диаметр спирали, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала спирали, Вт/(м·К).

Критерий Нуссельта, в свою очередь, связан с критериями Рейнольдса  $Re$ , Грасгофа  $Gr$  и Прандтля  $Pr$  [4, 5].

Критерий Рейнольдса  $Re$  характеризует интенсивность вынужденного движения теплоносителя (воздуха). Представляет собой отношение сил инерции (скоростного напора) к силам вязкого трения



$$Re = \frac{g \cdot d \cdot \rho}{\mu}, \quad (10)$$

где  $g$  – скорость движения воздуха, м/с;  $d$  – диаметр спирали, м;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с.

Критерий Грасгофа Gr характеризует интенсивность свободного движения теплоносителя. Представляет собой отношение подъемной силы, возникающей вследствие теплового расширения воздуха, к силам вязкого трения

$$Gr = \frac{gd^3 \rho^2 \beta}{\mu^2} \Delta t, \quad (11)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\beta$  – коэффициент температурного расширения воздуха, 1/К;  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с;  $\Delta t$  – температурный напор между поверхностью спирали и воздухом, °С.

Критерий Прандтля Pr, характеризующий влияние физико-химических свойств воздуха на интенсивность теплообмена

$$Pr = \frac{\mu c}{\lambda}, \quad (12)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·м<sup>3</sup>);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К).

Теплообмен между нагретой спиралью и окружающим ее воздухом может осуществляться в условиях как естественной, так и вынужденной конвекции.

При естественной конвекции перемещение отдельных объемов воздуха происходит исключительно вследствие различия температур в его различных местах и вызванного этим различия плотностей. В этом случае критерием Рейнольдса допустимо пренебречь и критерий Нуссельта Nu связан с критериями Грасгофа Gr и Прандтля Pr.

По данным акад. М.А. Михеева [5], в условиях естественной конвекции возле тонких нагретых проволок возникает пленочный или переходной от пленочного к ламинарному режимы течения теплоносителя.

Для таких случаев критерий Нуссельта может быть вычислен как:

$$Nu = \begin{cases} 0,5, & \text{при } Gr \cdot Pr < 10^{-3}; \\ 1,18Gr^{0,125} Pr^{0,125}, & \text{при } Gr \cdot Pr = 10^{-3} \div 5 \cdot 10^2. \end{cases} \quad (13)$$

В случае вынужденной конвекции интенсивность принудительного движения теплоносителя преобладает над интенсивностью его свободного движения. В этой связи критерий Нуссельта зависит от критерия Рейнольдса. Критерием Грасгофа допустимо пренебречь.

В условиях вынужденной конвекции при поперечном обтекании воздушного потока поверхности цилиндра или трубы критерий Нуссельта может быть вычислен как:



$$Nu = \begin{cases} 0,76 Re^{0,4} Pr^{0,37}, & \text{при } 1 < Re < 40; \\ 0,52 Re^{0,5} Pr^{0,37}, & \text{при } 40 \leq Re < 10^3; \\ 0,26 Re^{0,6} Pr^{0,37}, & \text{при } 10^3 \leq Re < 2 \cdot 10^5; \\ 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4}, & \text{при } 2 \cdot 10^5 < Re < 10^7. \end{cases} \quad (14)$$

Располагая значением критерия Нуссельта, из формулы (9) можно определить значение коэффициента теплоотдачи для данных условий:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}. \quad (15)$$

Рассмотренные уравнения позволяют провести моделирование нестационарного теплового режима нагрева открытой спирали при протекании по ней электрического тока при различных условиях конвективного теплообмена между спиралью и окружающей воздушной средой [6, 7].

В качестве объекта моделирования принята электрическая спираль, изготовленная из никель-хромового сплава нихром Х20Н80. Диаметр спирали 0,8 мм, длина 22,1 м. Электрическая мощность, выделяемая в спирали при прохождении тока 1000 Вт. Начальная температура спирали и температура окружающего воздуха принята 20 °С. Расчеты выполнены для условий естественной и вынужденной конвекции окружающего воздуха (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты моделирования нестационарного нагрева открытой спирали (при P = 1000 Вт)

Скорость движения воздуха, м/с	Режим теплообмена	Критерий Рейнольдса Re	Критерий Грасгофа Gr	Критерий Прандтля Pr	Критерий Нуссельта Nu	Коэффициент теплоотдачи $\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Постоянная времени Нагрева спирали T, с	Максимальная температура нагрева $t_{max}$ , °С
0	Естественная конвекция	-	11,89	0,70	1,53	58,60	12,46	327,25
0,5	Вынужденная конвекция	28,43	-	0,70	2,43	92,55	7,89	214,58
1,0		56,87	-	0,70	3,43	130,88	5,58	157,58
1,5		85,31	-	0,70	4,2	160,3	4,56	132,34
2,0		113,74	-	0,70	4,86	185,1	3,95	117,29

Как следует из рисунка 1, в условиях вынужденной конвекции с увеличением скорости воздушного потока количество теплоты, отдаваемой нагретой спиралью воздуху возрастает. Максимальная температура нагрева открытой спирали при этом снижается.

Установлена зависимость максимальной температуры нагрева открытой спирали от потребляемой мощности в условиях естественной и вынужденной конвекции (рисунок 2). Увеличение мощности нагревательной спирали приводит к существенному росту максимальной температуры нагрева спирали. Однако при постоянном напряжении и диаметре нагревательной спирали увеличение мощности приводит к существенному росту силы тока. Так, при мощности 0,5 кВт сила тока, протекающего по спирали составляет 2,27 А. Мощности 2,5 кВт соответствует сила тока 11,37 А, которая приближается к допустимому значению силы тока для нагревательной спирали диаметром 0,8 мм.



Таким образом, во избежание перегорания нагревательной спирали заданного диаметра выбор теплового и электрического режимов работы данной спирали должен производиться с учетом допустимых значений температуры нагрева и силы тока.

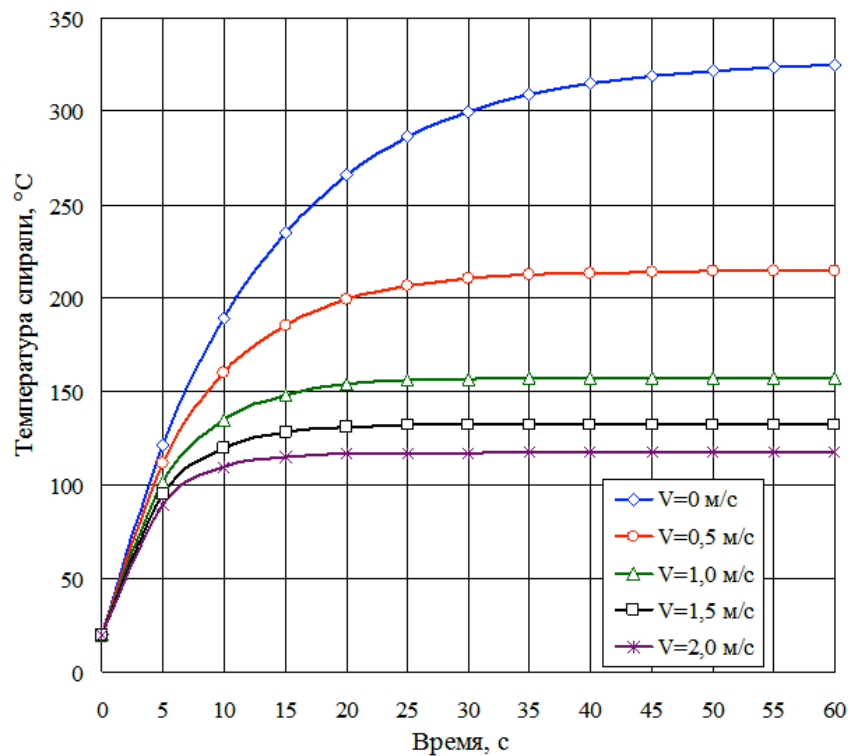


Рисунок 1 – Динамика нагрева открытой спирали в условиях естественной ( $\vartheta = 0$  м/с) и вынужденной ( $\vartheta = 0,5; 1,0; 1,5$  м/с и  $2,0$  м/с) конвекции ( $P = 1000$  Вт)

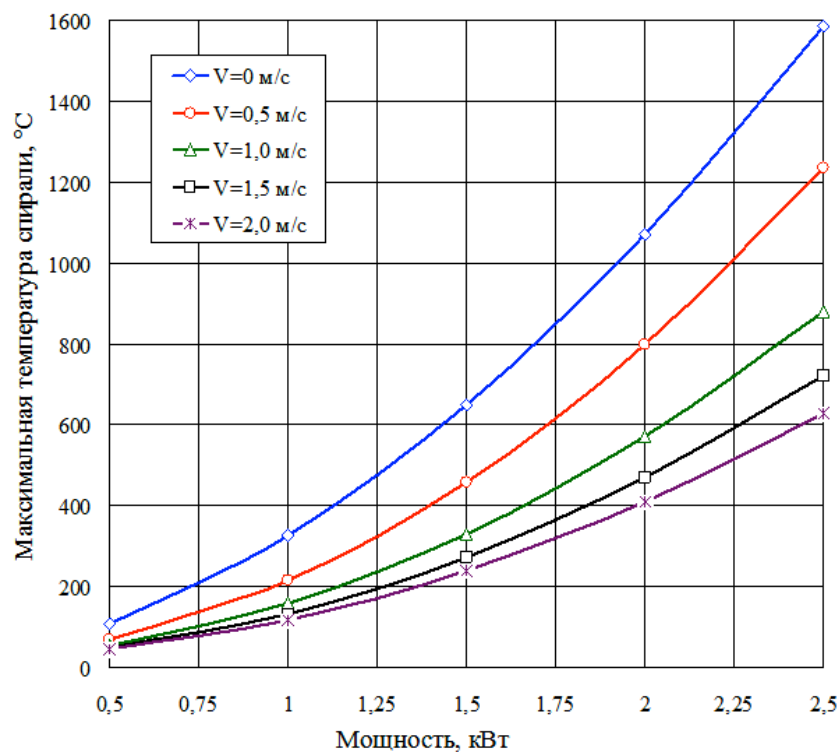


Рисунок 2 – Зависимость максимальной температуры нагрева открытой спирали от потребляемой мощности в условиях естественной ( $\vartheta = 0$  м/с) и вынужденной ( $\vartheta = 0,5; 1,0; 1,5$  и  $2,0$  м/с) конвекции





Полученные аналитические зависимости и результаты моделирования позволяют производить необходимые практические расчеты режимов работы спиральных нагревательных элементов аэродромных кондиционеров для различных условий конвективного теплообмена между спиралью и окружающей воздушной средой.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов А.В., Шаповалов А.С., Явчуновский В.Я. Сравнительный анализ характеристик открытых спиралей и ТЭНов в составе электронагревательных приборов. Ч. 1. Расчет тепловых полей в стационарных и нестационарных режимах // Вопросы прикладной физики. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. Вып. 15., 2008. С. 53–58.
2. Козлов А.В., Шаповалов А.С., Явчуновский В.Я. Сравнительный анализ характеристик открытых спиралей и ТЭНов в составе электронагревательных приборов. Ч. 2. Экспериментальное исследование стационарных и нестационарных режимов // Вопросы прикладной физики. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. Вып. 15., 2008. С. 58–63.
3. Хвостов А.А., Журавлев А.А., Целюк Д.И., Журавлев Е.А. Моделирование нагрева однородного электрического проводника протекающим током // Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы: сборник материалов Международной научно-практической межведомственной конференции / ФКОУ ВО Воронежский институт ФСИН России. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2016. С. 328–329.
4. Процессы и аппараты пищевых производств / под ред. А.Н. Острикова. СПб.: Гиорд, 2012. 616 с.
5. Болгарский А.В., Мухачев Г.А., Щукин В.К. Термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1975. 495 с.
6. Журавлев А.А., Целюк Д.И. Математическая модель нагрева проводника электрическим током в условиях естественной и вынужденной конвекции // Новые решения в области упрочняющих технологий: взгляд молодых специалистов: материалы Международной научно-практической конференции; В 2-х томах, Т. 1., Юго-Зап. гос. ун-т., Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2016. С. 301–303.
7. Хвостов А.А., Журавлев А.А., Целюк Д.И. Теплообмен между нагретым электрическим проводником и воздухом в условиях вынужденной конвекции // Новая наука: от идеи к результату: Междунар. науч. периодич. издание по итогам Междунар. науч.-практ. конф. Стерлитамак : АМИ, 2017. № 1 (1). С. 189–191.

#### REFERENCES

1. Kozlov A.V., Shapovalov A.S., Iavchunovskii V.Ia. Sravnitel'nyi analiz kharakteristik otkrytykh spiralei i TENov v sostave elektronagrevatel'nykh priborov. Ch. 1. Raschet teplovykh polei v statsionarnykh i nestatsionarnykh rezhimakh // Voprosy prikladnoi fiziki. Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta. Vyp. 15., 2008. S. 53–58.
2. Kozlov A.V., Shapovalov A.S., Iavchunovskii V.Ia. Sravnitel'nyi analiz kharakteristik otkrytykh spiralei i TENov v sostave elektronagrevatel'nykh priborov. Ch. 2. Eksperimental'noe issledovanie statsionarnykh i nestatsionarnykh rezhimov // Voprosy prikladnoi fiziki. Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta. Vyp. 15., 2008. S. 58–63.
3. Khvostov A.A., Zhuravlev A.A., Tseliuk D.I., Zhuravlev E.A. Modelirovanie nagreva odnorodnogo elektricheskogo provodnika protekaiushchim tokom // Tekhnika i bezopasnost' ob"ektov ugolovno-ispolnitel'noi sistemy: sbornik materialov Mezhduna-rodnoi nauchno-prakticheskoi mezhvedomstvennoi konferentsii / FKOOU VO Voronezh-skii institut



FSIN Rossii. Voronezh: Izdatel'sko-poligraficheskii tsentr «Nauchnaia kniga», 2016. S. 328–329.

4. Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv / pod red. A.N. Ostrikova. SPb.: Giord, 2012. 616 s.

5. Bolgarskii A.V., Mukhachev G.A., Shchukin V.K. Termodinamika i teploperedacha. M.: Vysshiaia shkola, 1975. 495 s.

6. Zhuravlev A.A., Tseliuk D.I. Matematicheskaiia model' nagreva provodnika elektricheskim tokom v usloviiakh estestvennoi i vynuuzhdennoi konveksii // Novye resheniia v oblasti uprochniaushchikh tekhnologii: vzgliad molodykh spetsialistov: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii; V 2-kh tomakh, T. 1., Iugo-Zap. gos. un-t., Kursk: Izd-vo ZAO «Universitetskaia kniga», 2016. S. 301 – 303.

7. Khvostov A.A., Zhuravlev A.A., Tseliuk D.I. Teploobmen mezhdu nagretym elektricheskim provodnikom i vozdukhom v usloviiakh vynuuzhdennoi konveksii // Novaia nauka: ot idei k rezul'tatu: Mezhdunar. nauch. periodich. izdanie po itogam Mezhdunar. nauch. prakt. konf. Sterlitamak : AMI, 2017. № 1(1). S. 189 – 191. © Рязских В.И., Иванов А.В., Хвостов А.А., Журавлев А.А., 2017.

© Рязских В.И., Иванов А.В., Хвостов А.А., Журавлев А.А., 2017

«Воздушно-космические силы. Теория и практика». Материал поступил в редколлегию 09.06.2017 г.

Рязских Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией ВВС), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессор Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru

Иванов Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, начальник научно-исследовательского управления научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией ВВС), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессор Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru

Хвостов Анатолий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией ВВС), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессор Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru

Журавлев Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией ВВС), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессор Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru