



УДК 629.7.063.017  
ГРНТИ 78.25.13

## ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АГРЕГАТОВ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ ВОЗДУШНОГО СУДНА С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ КАЧЕСТВА АВИАЦИОННОГО ТОПЛИВА

*Е.В. ФЕТИСОВ, кандидат технических наук, доцент  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
И.И. ЗАВЯЛИК  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
М.В. ТРОФИМЧУК  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

В статье описана разработанная система моделирования в среде MATLAB Simulink, позволяющая моделировать, исследовать и прогнозировать техническое состояние агрегатов топливной системы воздушного судна в зависимости от изменения качества авиационного топлива.

*Ключевые слова:* надежность; топливная система; агрегат; параметр; техническое состояние.

## APPLICATION FOR ASSESSMENT SIMULATION TECHNICAL STATE OF UNITS FUEL SYSTEM AIRCRAFT IN VIEW OF CHANGES IN QUALITY AVIATION FUEL

*E.V. FETISOV, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
MESCAF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)  
I.I. ZAVYALIK  
MESCAF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)  
M.V. TROFIMCHUK  
MESCAF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

The article describes a simulation system developed in an environment MATLAB Simulink, is allows to model, explore and predict the technical condition of the units of the fuel system of the aircraft, depending on changes in the quality of aviation fuel.

*Keywords:* reliability; fuel system; assembly; setting; technical condition.

**Введение.** В процессе совершенствования авиационных комплексов (АК) и функциональных систем воздушного судна (ВС), направленном на повышение уровня боеготовности и эффективности их применения, ужесточаются требования к эксплуатационным свойствам ВС. Отличительными чертами перспективных АК являются: разнообразие режимов и условий эксплуатации, близость рабочих режимов к ограничениям по прочностным, температурным и функциональным параметрам. Надежность топливной системы (ТС) является одним из главных условий надежности ВС, так как эта система предназначена для размещения на борту ВС определенного количества топлива и его постоянной и безотказной подачи в двигатель как в полете, при любых возможных эволюциях и перегрузках самолета, так и на земле и зависит от качества



применяемого топлива. В связи с этим актуальными являются проблемы повышения надежности авиационных двигателей (АД) ВС и создания новых, более совершенных методик ее оценки.

**Актуальность.** ТС ВС представляет собой сложную техническую систему (СТС), включающую большое число узлов, элементов и агрегатов и протекающих в них различных физико-химических процессов, с большим числом параметров, определяющих их техническое состояние.

Анализ надежности ТС как СТС имеет свои специфические особенности. Влияние различных отказов и снижение работоспособности элементов системы по-разному скажутся на надежности всей системы.

При анализе надежности СТС все ее элементы и компоненты целесообразно разделить на следующие группы:

1) элементы, отказ которых практически не влияет на работоспособность системы. Отказы (т.е. неисправное состояние) этих элементов могут рассматриваться изолированно от системы;

2) элементы, работоспособность которых за рассматриваемый период времени практически не изменяется;

3) элементы, ремонт или регулировка которых возможна при работе изделия или во время остановок, не влияющих на его эффективность;

4) элементы, отказ которых приводит к отказам системы.

Следовательно, возникает необходимость введения дополнительных ограничений при оценке надежности:

1. Представляя ТС как СТС с использованием агрегативного подхода при моделировании ее функционального состояния, [1] необходимо учитывать, что рассматриваемая система обладает развитой иерархической структурой с разделением на ТС самолета и ТС двигателя позволяет говорить о том, что агрегаты, которые входят в топливо-регулирующую аппаратуру (ТРА) обеспечивают функционирование АД не по одному, а по нескольким каналам управления. Что существенно снижает вероятность достоверности в оценке надежности ТС ВС.

2. ТС является жизненно важной системой, потому что проявление отказа может привести к потере ВС. Таким образом, определяется задача по прогнозированию возможных состояний системы с учетом влияния различных эксплуатационных факторов. При этом возможность прогнозирования технического состояния агрегатов ТС определяется особенностью их конструкции, характеризуемой наличием определенной параметрической избыточности в совокупности каналов управления. То есть необходимо анализировать динамику изменения индивидуальных запасов надежности отдельных систем на основе результатов измерения параметров, определяющих их работоспособность. Появляется возможность с общих позиций теории параметрической избыточности изучать физические процессы, предшествующие возникновению отказов ТС, и строить их модели, используемые, в частности, для осуществления прогнозирования технического состояния систем ВС.

3. Надежность ТС ВС и работоспособность агрегатов во многом зависят от качества применяемого авиационного топлива. В этом случае, решая задачи прогнозирования уровня надежности агрегатов ТС с учетом их взаимодействия с рабочим телом (авиационным топливом), необходимо брать за основу сведения, полученные в процессе эксплуатации или в результате математического моделирования функционирования ТС, позволяющих выявлять конкретные изделия, которые в ближайшем будущем должны отказать.

Авторами в программном продукте MATLAB Simulink разработана система имитационного моделирования функционирования ТС ВС, разработаны математические модели агрегатов ТС АД ВС, реализованные в MATLAB Simulink и позволяющие мо-



делировать, исследовать и прогнозировать уровень надежности агрегатов ТС с учетом изменения качества используемого авиационного топлива, принимая во внимание чувствительность агрегатов ТС к загрязнениям, определяемую зависимостью выходных параметров агрегата от размера и концентрации частиц загрязнений [2].

Сущность разработанного метода моделирования функционирования агрегатов ТС с учетом изменения качества авиационного топлива базируется на совокупности следующих принципов:

1. Представление моделируемого агрегата АД ВС (насоса-регулятора (НР)) в виде А-схемы (рис.1).

НР состоит из скомпонованных в одном агрегате:

- качающего узла с дозирующим устройством;
- регулятора частоты вращения и автомата приемистости;
- регулятора направляющего аппарата компрессора высокого давления (НА КВД) и входного направляющего аппарата компрессора низкого давления (ВНА КНД).

2. НР обеспечивает функционирование АД по следующим каналам управления:

- дозирование топлива в основную камеру сгорания (ОКС);
- управление поворотными лопатками направляющего аппарата компрессора высокого давления (НА КВД);
- управление поворотными закрылками входного направляющего аппарата компрессора низкого давления (ВНА КНД);
- подачу команды в форсажный насос (ФН) на переключение топливопитания форсажной камеры (ФК);
- питание ФК при малых расходах топлива;
- блокировку (по частоте вращения ротора высокого давления (РВД)) срабатывания ограничителей комплексного регулятора двигателя (КРД);
- выдачу гидравлических команд другим агрегатам топливной системы;
- выключение двигателя;
- поддержание давления топлива, питающего механизмы автоматики на режиме авторотации.

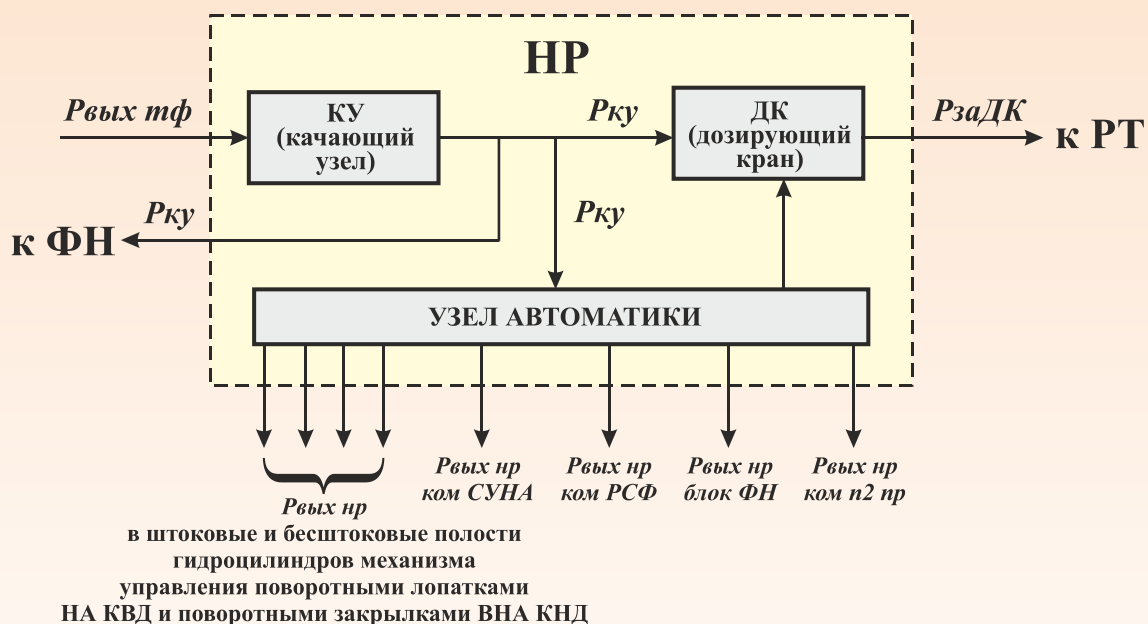


Рисунок 1 – Графическое изображение агрегата АД ВС НР в виде А-схемы



3. В основу математической модели функционирования агрегата ТС АД ВС с учетом изменения качества авиационного топлива заложена зависимость значения выходного параметра агрегата ТС от размера и концентрации частиц загрязнений:

$$X_{(t)} = X_0 \exp \left\{ -\sigma_i T_\lambda N_{io}^2 \left[ 1 - \exp \left( -\frac{2t}{T_\lambda} \right) \right] \right\}; \quad (1)$$

где  $X_{(t)}$  – фактическое значение параметра;  $X_0$  – паспортное значение параметра;  $\sigma_i$  – коэффициент изнашивания, характеризующий отношение объема разрушений к квадрату размера частиц загрязнений;  $T_\lambda$  – постоянная времени разрушения;  $N_{io}$  – начальная штучная концентрация частиц загрязнений определенной размерной фракции.

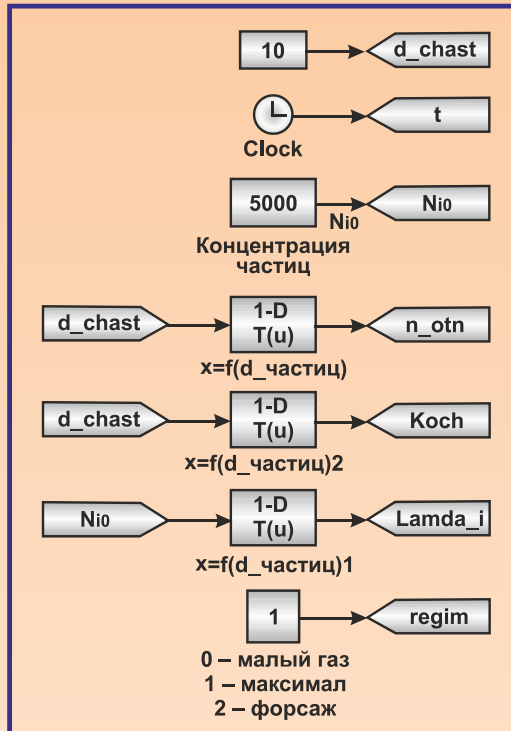
4. Применяя выражение (1) в решении поставленной задачи, и исходя из многоканальности работы НР для определения параметров агрегата, составим систему уравнений, описывающих процесс функционирования агрегата ТС АД ВС НР при изменении качества авиационного топлива:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{ку}(t) = P_{вых}^{m\phi} \exp \left\{ -\sigma_i T_\lambda N_{io}^2 \left[ 1 - \exp \left( -\frac{2t}{T_\lambda} \right) \right] \right\}; \\ P_{за ДК}(t) = P_{ку} \exp \left\{ -\sigma_i T_\lambda N_{io}^2 \left[ 1 - \exp \left( -\frac{2t}{T_\lambda} \right) \right] \right\}; \\ P_{ци на}^{кв\delta}(t) = P_{ци на}^{кв\delta} \exp \left\{ -\sigma_i T_\lambda N_{io}^2 \left[ 1 - \exp \left( -\frac{2t}{T_\lambda} \right) \right] \right\}; \\ P_{ци на}^{кн\delta}(t) = P_{ци на}^{кн\delta} \exp \left\{ -\sigma_i T_\lambda N_{io}^2 \left[ 1 - \exp \left( -\frac{2t}{T_\lambda} \right) \right] \right\}; \\ P_{ком}^{рс\phi}(t) = P_{ком}^{рс\phi} \exp \left\{ -\sigma_i T_\lambda N_{io}^2 \left[ 1 - \exp \left( -\frac{2t}{T_\lambda} \right) \right] \right\}; \\ P_{блок}^{\phi n}(t) = P_{блок}^{\phi n} \exp \left\{ -\sigma_i T_\lambda N_{io}^2 \left[ 1 - \exp \left( -\frac{2t}{T_\lambda} \right) \right] \right\}; \\ P_{вкл}^{сплн}(t) = P_{вкл}^{сплн} \exp \left\{ -\sigma_i T_\lambda N_{io}^2 \left[ 1 - \exp \left( -\frac{2t}{T_\lambda} \right) \right] \right\}; \\ P_{нр}^{рв\delta}(t) = P_{нр}^{рв\delta} \exp \left\{ -\sigma_i T_\lambda N_{io}^2 \left[ 1 - \exp \left( -\frac{2t}{T_\lambda} \right) \right] \right\}. \end{array} \right. \quad (2)$$

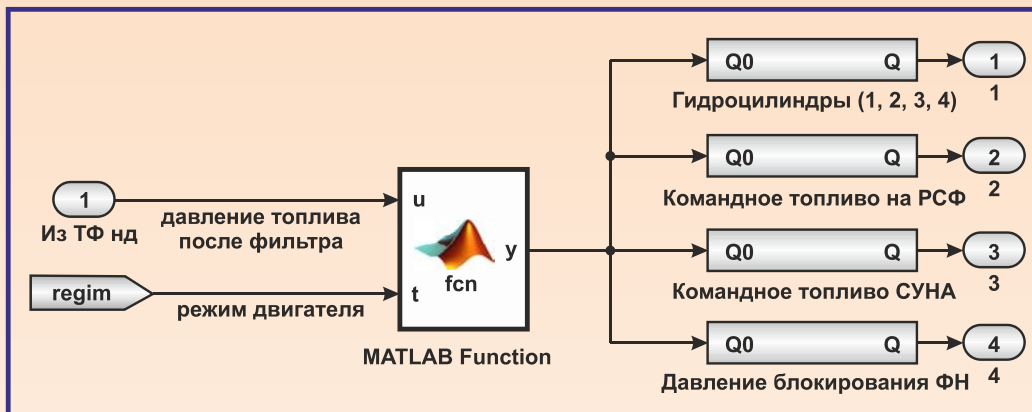
Разработанные принципы легли в основу созданной системы имитационного моделирования MATLAB Simulink, структура которой представлена на рисунке 2.



### Исходные данные



### Решатель



### Отображение результатов

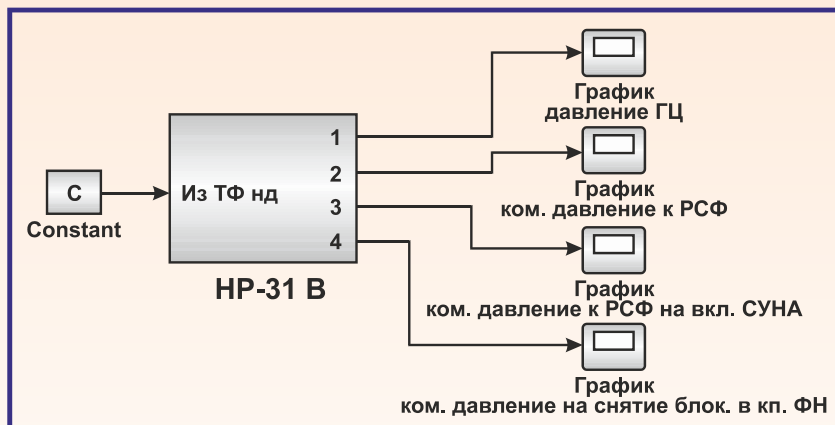


Рисунок 2 – Структура имитационного моделирования функционирования агрегата HP TC АД BC с учетом изменения качества авиационного топлива в среде MATLAB Simulink



Разработанный метод моделирования функционирования агрегата ТС ВС с учетом изменения качества авиационного топлива включает:

1. Блок исходных данных, в котором обеспечивается синтез модели, задаются и редактируются параметры, накладываются дополнительные условия и ограничения.
2. Решатель обеспечивает последовательную активацию моделей по заданным каналам агрегата НР, управление движением имитационной моделью от начальных условий к решению в соответствии с законом расчета.
3. Отображение и документирование результатов моделирования.

На рисунке 3 приведены результаты моделирования (расчета процесса) функционирования агрегата НР по каналам управления в зависимости от изменения размера и концентрации частиц загрязнений, содержащихся в авиационном топливе.

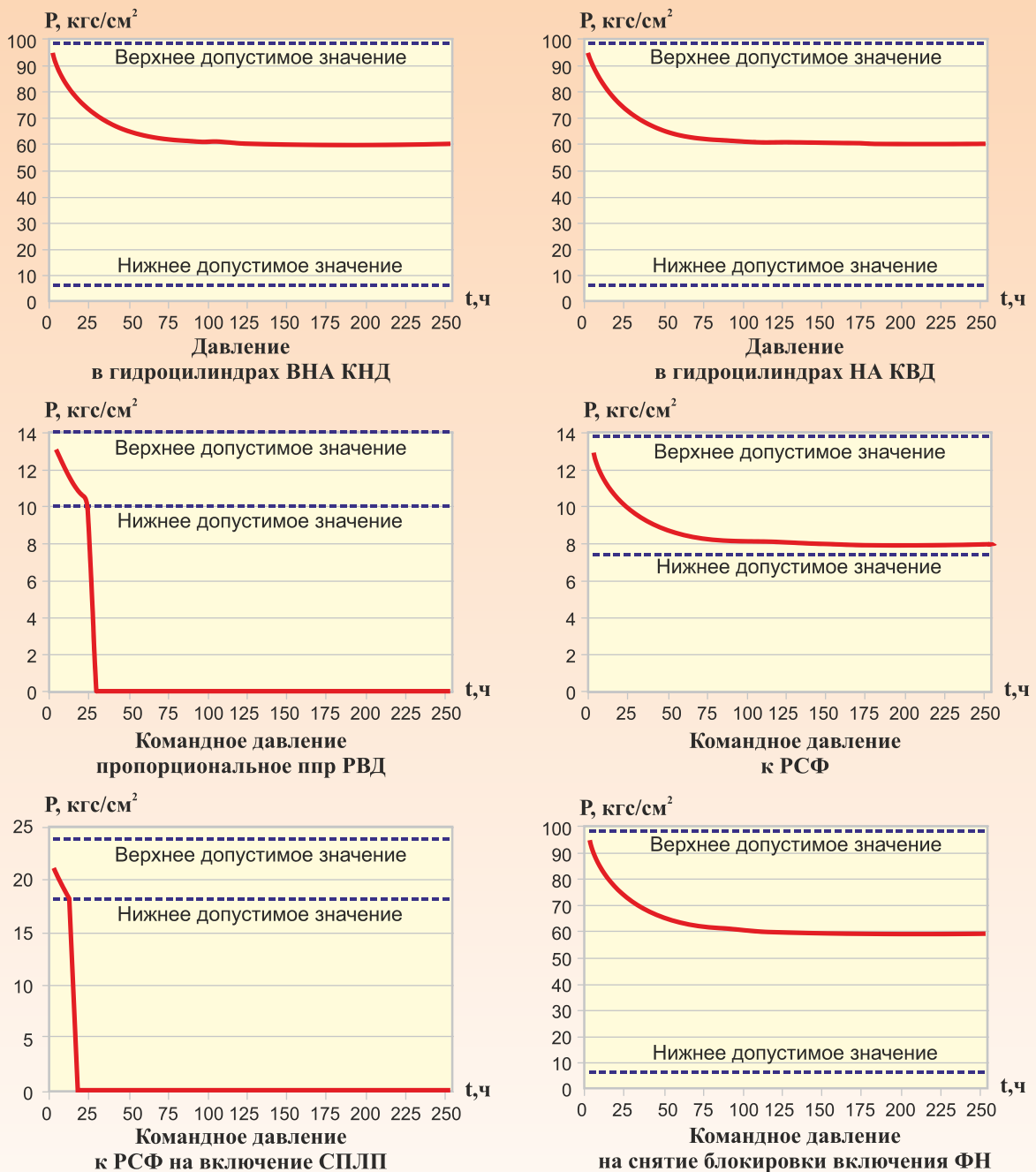


Рисунок 3 – Графические зависимости изменения давления на выходе из агрегата НР по каналам управления при диаметре частиц загрязнений  $D = 10$  мкм и концентрации частиц загрязнений  $N_i = 5000$  штук в  $100 \text{ см}^3$  авиационного топлива



Проверка адекватности модели функционирования агрегатов ТС осуществлялась на агрегате насос-регулятор (НР-31В) АД (АЛ-31Ф) при оценке изменения рабочих параметров по каналам управления в зависимости от времени при заданных параметрах загрязнения авиационного топлива.

**Выводы.** Результат моделирования показал, что даже на незначительном временном интервале возможно изменение работоспособности агрегата ТС по некоторым каналам управления, что может привести к проявлению отказа агрегата ТС. Проведение исследований с используемой моделью надежности агрегатов ТС с расширением диапазонов значений входных параметров и внутренних параметров системы (агрегатов АД) позволит получить достоверную оценку технического состояния агрегатов ТС при изменении качества авиационного топлива.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Совершенствование методического аппарата по оценке надежности топливной системы воздушного судна военного назначения / И.И. Завялик, А.Н. Стукалов, Е.С. Тютнев, Е.В. Фетисов // Авиация и космонавтика 2014: 13-я Междунар. конф. (17–21 ноября 2014). Москва. Тезисы. СПб.: Мастерская печати, 2014. С. 39–41.
2. Тимеркеев Р.Г., Сапожников В.М. Промышленная чистота и тонкая фильтрация рабочих жидкостей летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1986. 152 с.

#### BIBLIOGRAPHY

1. Improving the methodological apparatus for assessing the reliability of the fuel system of the aircraft for military purposes / I.I. Zavyalik, A.N. Stukalov, E.S. Tyutnev, E.V. Fetisov // Aviation and cosmonautics 2014: 13th Internat. conf. (On 17-21 Nov. 2014). Moscow. Theses. SPb.: Workshop Press, 2014. P. 39–41.
2. Timerkeev R.G., Sapozhnikov V.M. Industrial purity and fine filtration of working fluids for aircraft. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 152 p.

© Фетисов Е.В., Завялик И.И., Трофимчук М.В., 2017

Фетисов Евгений Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры инженерно-авиационного обеспечения, 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, vaiu@mil.ru

Завялик Иван Иванович, младший научный сотрудник научно-исследовательского отдела научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), 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, vaiu@mil.ru

Трофимчук Максим Васильевич, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), 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, vaiu@mil.ru