



УДК 536.25  
ГРНТИ 78.25.39

## РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГАЗАМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА АЭРОДРОМАХ БАЗИРОВАНИЯ

*В.А. СУМИН, кандидат физико-математических наук, доцент  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
В.И. РЯЖСКИХ, доктор технических наук, профессор  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

Методами имитационного моделирования проведен анализ обеспеченности аэродромов жидким азотом с целью выявления необходимого и достаточного количества воздуходелительных установок для обеспечения азотом самолетов при различных режимах летной напряженности. Показано, что при среднем расходе для обеспечения боевой готовности полка требуется непрерывная работа трех воздуходелительных установок в течение 20 дней, что не позволяет сделать стратегический запас (с учетом испаряемости) на период перезагрузки воздуходелительных установок, а также ставит под угрозу боеготовность, в случае непредвиденной (экстренной) боевой ситуации, требующей использования всех имеющихся ресурсов.

*Ключевые слова:* электрогазовая служба, воздуходелительная установка, криогенные жидкости, имитационное моделирование, метод Монте-Карло.

## DEVELOPMENT OF SIMULATION TOOLS FOR THE STUDY OF AIRCRAFT GAS SUPPLY DYNAMIC CHARACTERISTICS AT AIRFIELDS

*V.A. SUMIN, Candidate of Physical and Mathematical sciences, Associate Professor  
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)  
V.I. RYAZHSKIY, Doctor of Technical sciences, Professor  
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

Simulation methods were used to analyze the availability of liquid nitrogen at airfields in order to identify the necessary and sufficient number of air separation units to provide nitrogen to aircraft under various flight stress conditions. It is shown that at an average consumption, to ensure the combat readiness of the regiment, continuous operation of three air separation units is required for 20 days, which does not allow making a strategic reserve (taking into account evaporation) for the period of reloading air separation units, and also jeopardizes combat readiness, in case of an unforeseen (emergency) combat situation requiring the use of all available resources.

*Keywords:* electric gas service, air separation plant, cryogenic liquids, simulation modeling, Monte Carlo method.

**Введение.** Для обеспечения выполнения ВВС боевых задач и поддержания боеготовности авиационной техники требуется необходимое и достаточное количество кислорода и азота в различных фазовых состояниях [1]. Этот функционал возложен на электрогазовую службу ВВС [2], включая получение сжиженного газа на воздуходелительных установках (ВРУ), транспортирование и хранение с последующей газификацией [3].



В отличие от ВВС армий США и НАТО в Российских ВВС реализуется концепция наземной заправки кислородом и азотом бортов летательных аппаратов [4–5].

Применение бортовых систем генерации дыхательных смесей OBOGS имеет существенный недостаток – нехватка кислорода [6].

Извлечение азота и кислорода из воздуха осуществляется ВРУ АКДС-70М, СКДС-70М, ТРЖК-3М, ТКДС-100В [7].

Современные ВРУ реализованы по интегративному принципу, обеспечивающему универсальность добываемых газов в различных фазовых состояниях, климатических условиях, заданной производительности и т.д. ВРУ используются в виде передвижной мобильной установки на шасси с возможностью оперативного развертывания и передислокации, что обеспечивает своевременное снабжение газами авиационных частей и соединений [8]. Необходимое и достаточное количество ВРУ может быть оценено по полной картине боевых действий с оценкой их интенсивности при различных сценариях конфликта. Существующие нормативно правовые акты Министерства обороны предписывают содержать и наращивать материальные запасы, что при существующей структурной организации электрогазового обеспечения ВВС выполнить с требуемой эффективностью в особый период практически невозможно.

**Актуальность.** Современное состояние электрогазового обеспечения ВВС РФ свидетельствует о том, что отсутствует системный подход к решению задачи снабжения аэродромов сжиженными газами. Задача обеспеченности аэродромов кислородом и азотом решается бессистемно стохастически, что влечет за собой следующие проблемы: невозможность своевременного обеспечения дозаправок самолетов газами в зависимости от требуемой срочности действий в условиях боевой напряженности; неоптимальное использование мощностей ВРУ в пределах армии; отсутствует необходимое и достаточное количество ВРУ, требуемое в условиях повышенной боевой напряженности.

Целью исследования является анализ обеспеченности аэродромов кислородом и азотом с целью выявления необходимого и достаточного количества ВРУ на примере аэродрома базирования авиации ВВС и ПВО на основе имитационной модели стохастического типа.

#### **Синтез математической модели.**

Переменные модели – стохастические, их значения не могут быть точно установлены или предсказаны, что обусловлено недостаточностью информации о них. Неопределенность вероятностных переменных связана с вероятностным характером описываемых ими процессов. Не зная точных исходных данных, используя компьютерные технологии, возможно непрерывно и случайным образом генерировать значения исходных величин и идентифицировать значения выходной переменной. Для оценки характеристик исследуемых совокупностей применен аппарат теории вероятности и теории случайных функций [9–11].

При построении математической модели использованы имитационный подход и метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). В основе вычислений по методу статистических испытаний лежит случайный выбор чисел из заданного вероятностного распределения. Имеется большое число вычислительных алгоритмов, которые позволяют получить длинные последовательности псевдослучайных чисел. Повторяющиеся испытания реализуются путем генерации случайных совокупностей этих параметров. Статистические результаты получаются в результате обработки этих совокупностей. Вероятность того, что результаты отличаются от истинных не более чем на заданную величину, есть функция количества испытаний или размера сгенерированных выборок.

Далее строится функциональная модель эмпирической зависимости необходимого количества ВРУ, обеспечивающих непрерывное получение газов (кислорода и азота) для авиационной техники с целью обеспечения боеготовности авиационного полка в течение заданного временного периода.

Построение функциональной модели включает в себя следующие этапы:

- 1) Валидация входных параметров.



2) Выбор факторов, определяющих вариативность вычисляемого параметра (факторы, влияющие на определение количества боевых вылетов, необходимость в плановом и внеплановом техническом обслуживании (ТО), возможные потери боевой техники).

3) Построение плана и условий проведения модельного эксперимента, который включает в себя: выбор аэродрома базирования; выбор единицы исследования (звено, эскадрилья, полк), условия, накладываемые на функционирование системы в зависимости от требуемой срочности действий (действия по плану, действия по вызову, действия немедленно по готовности).

4) Обработка результатов экспериментов с построением в виде регрессионной зависимости математической модели электрогазового обеспечения аэродромов от выбранных факторов.

**Входные параметры и выбор факторов их определяющих.** Валидация входных данных прежде всего должна обеспечить корректность выбора и представления параметров и верификацию модели. Так как большинство входных параметров представлены в виде непрерывных случайных величин, то для их идентификации зададим функцию плотности. Выбор равномерного распределения для задания случайных величин обусловлен равной вероятностью получения любого целого значения из некоторого замкнутого интервала, что соответствует условию задачи.

Непрерывная случайная величина  $\gamma$  имеет равномерное распределение в интервале  $[a, b]$ , если ее плотность вероятности  $f(x)$  задается формулой

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 0, & x < a, \quad x > b \end{cases}.$$

Графически функция плотности имеет следующий вид (рисунок 1).

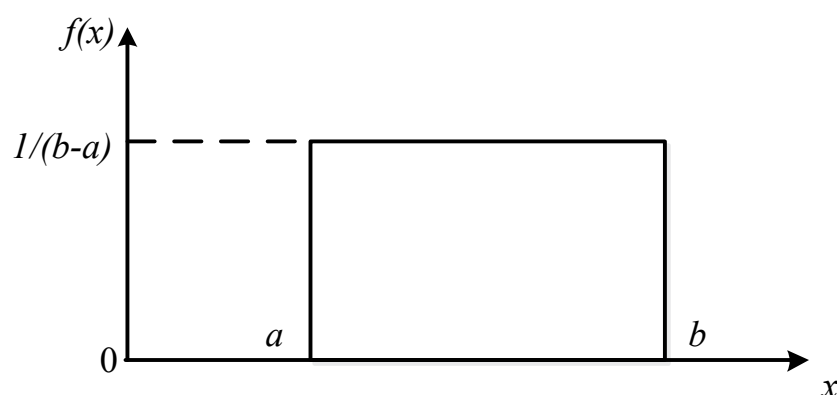


Рисунок 1 – Плотность вероятности равномерного распределения

Большая часть расчетов по методу Монте-Карло осуществляется с использованием псевдослучайных чисел из интервала  $[0, 1]$ , которые на выходе дают равномерное распределение, причем случайное число  $x_i$  из интервала  $[0, 1]$  преобразуется в случайное число  $x'_i$  для интервала  $[a, b]$ :

$$x'_i = (b-a) \cdot x_i + a.$$

Основными параметрами, определяющими функционирование системы, являются:

1) Количество вылетов одного самолета за выбранный период времени – равномерно распределенная случайная величина, интервал задания которой определяется на основе нормативных документов [12], а также анализа имеющейся статистической информации.



$P(k, a, b)$  – непрерывная случайная величина, распределенная равномерно на интервале  $[a, b]$ , где  $a$  – минимальное количество вылетов при допущении, что самолет прошел плановое ТО [13];  $b$  – максимально допустимое количество вылетов, определяемое нормативной документацией, необходимой дальностью полета, поставленной боевой задачей;  $k$  – число реализаций случайной величины  $P$ .

2) Количество вылетающих самолетов  $Q(k)$  – линейная комбинация неслучайных величин: штатного числа самолетов на аэродроме, самолетов, проходящих ТО и случайной величины  $dQ(k)$  – процентного изменения единиц авиационной техники, вышедшей из строя по различным причинам, равномерно распределенного на интервале  $[0, v]$ , где  $v$  также определяется на основе нормативных документов и статистического анализа.

3) Расход азота и кислорода на заправку (дозаправку) одного самолета взят в соответствии с нормативными документами.

Входные данные для расчета на примере аэродрома базирования авиации ВВС и ПВО представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для статистического моделирования

Обозначения	Значение	Единицы измерения	Наименование
$k$	1000, 10000		количество реализаций, размер случайной совокупности
$Q_{01}$	36	шт.	штатное количество самолетов определяется для каждого аэродрома по нормативным документам (на примере аэродрома базирования авиации ВВС и ПВО)
$P(k,a,b)$	[2, 4]		случайная величина количества вылетов, равномерно распределенного в заданном интервале
$Q(k)$		шт.	случайная функция, вычисляемая как разность штатного количества авиационной техники на аэродроме, количества единиц на ТО и количества единиц, учтенных как потери и незапланированное ТО
$dQ(k)$	[0, 14]	%	случайное распределение процентного изменения количества единиц боевой техники по причине внепланового ТО или потерь
$R_a$	50	кг	средний расход азота при подготовке самолета
$R_o$	10	кг	средний расход кислорода
$t$	20	дней	рассматриваемый временной период, обусловленный временем работы ВРУ
$V_{gru\_t}$	70	кг/час	количество вырабатываемого сжиженного газа одной ВРУ

Реализация метода Монте-Карло осуществлена на вычислительной платформе Mathcad [14] (рисунок 2).

Случайные функции суммарного расхода азота и кислорода за рассматриваемый период построены по соотношениям:

$$F(t, R_a, k, a, b) = \sum_{i=1}^t R_a \cdot P_i(k, a, b) \cdot Q_i(k), \quad (1)$$

$$F_o(t, R_o, k, a, b) = \sum_{i=1}^t R_o \cdot P_i(k, a, b) \cdot Q_i(k), \quad (2)$$

с использованием свертки

$$F_o(t, R_a, R_o, k, a, b) = \alpha \cdot F_A + \beta \cdot F_o, \quad (3)$$

где  $\alpha, \beta$  – весовые коэффициенты, учитывающие время перенастройки ВРУ,  $\alpha + \beta = 1$ ; либо ими можно пренебречь, если это время незначительно  $\alpha = \beta = 1$ .



Проведен статистический и вероятностный анализ, т.е. построено распределение случайной величины и рассчитаны статистические характеристики: среднее, максимальное и минимальное значения, среднеквадратичное отклонение, коэффициент ковариации (коэф. ковариации) (рисунки 3–5).

	$Z1(1000) = 2.367 \times 10^3$	расход за один день	
Испаряемость за период n дней			$lsp\_a(n) := b_{,1} \cdot 24 \cdot n$ $lsp\_a(1) = 36$
Наличие на начало 1 периода	$N\_a := Vru\_max$		$N\_a = 4.782 \times 10^4$
ВРУ за сутки	$Vru\_1 := R_{2,5} \cdot 24$		$Vru\_1 = 1.68 \times 10^3$

### Среднее число вылетов:

$$\text{mean}(P(10000)) = 3.006$$

### Среднее число самолетов (рост):

$$\begin{aligned} x_{\min} &:= \text{mean}(Q1(10000)) \\ \text{mean}(Q1(10000)) &= 19.801 \end{aligned}$$

Наличие за первый период с1 по 20 день

$$\text{Nal1}(k, d) := \begin{cases} \text{for } i \in 1..d \\ k\_ni \leftarrow Vru\_1 - Z1(k) - lsp\_a(1) \\ \text{Nal1} \leftarrow N\_a + \sum_{i=1}^d (k\_ni) \\ \text{Nal1} \end{cases}$$

Наличие за второй период с 21 по 30 день

$$\text{Nal2}(k, d) := \begin{cases} \text{for } i \in 1..d \\ k\_ni \leftarrow -Z1(k) - lsp\_a(1) \\ \text{Nal2} \leftarrow \text{Nal1}(k, 20) + \sum_{i=1}^d (k\_ni) \\ \text{Nal2} \end{cases}$$

$$\text{Nal}(g, k) := \begin{cases} \text{Nal1}(k, 20) & \text{if } 0 \leq g \leq 20 \\ \text{Nal2}(k, 10) & \text{if } 21 \leq g \leq 30 \\ \text{break} \end{cases}$$

Рисунок 2 – Ввод и обработка исходных данных

$\text{mean}(S\_ao1) = 9.205 \times 10^4$	среднее	$\text{mean}(S\_ao) = 9.574 \times 10^4$
$\text{max}(S\_ao1) = 9.509 \times 10^4$	максимальное	$\text{max}(S\_ao) = 9.834 \times 10^4$
$\text{min}(S\_ao1) = 8.883 \times 10^4$	минимальное	$\text{min}(S\_ao) = 9.252 \times 10^4$
$\text{var}(S\_ao1) = 8.409 \times 10^5$	дисперсия	$\text{var}(S\_ao) = 8.906 \times 10^5$
$\text{stdev}(S\_ao1) = 917.011$	ср. кв. отклонение	$\text{stdev}(S\_ao) = 943.729$
$\text{Cov}(S\_ao1) = 9.962 \times 10^{-3}$	коэф. ковариации	$\text{Cov}(S\_ao) = 9.857 \times 10^{-3}$

Рисунок 3 – Статистические реализации: а) k=1000; б) k=100000

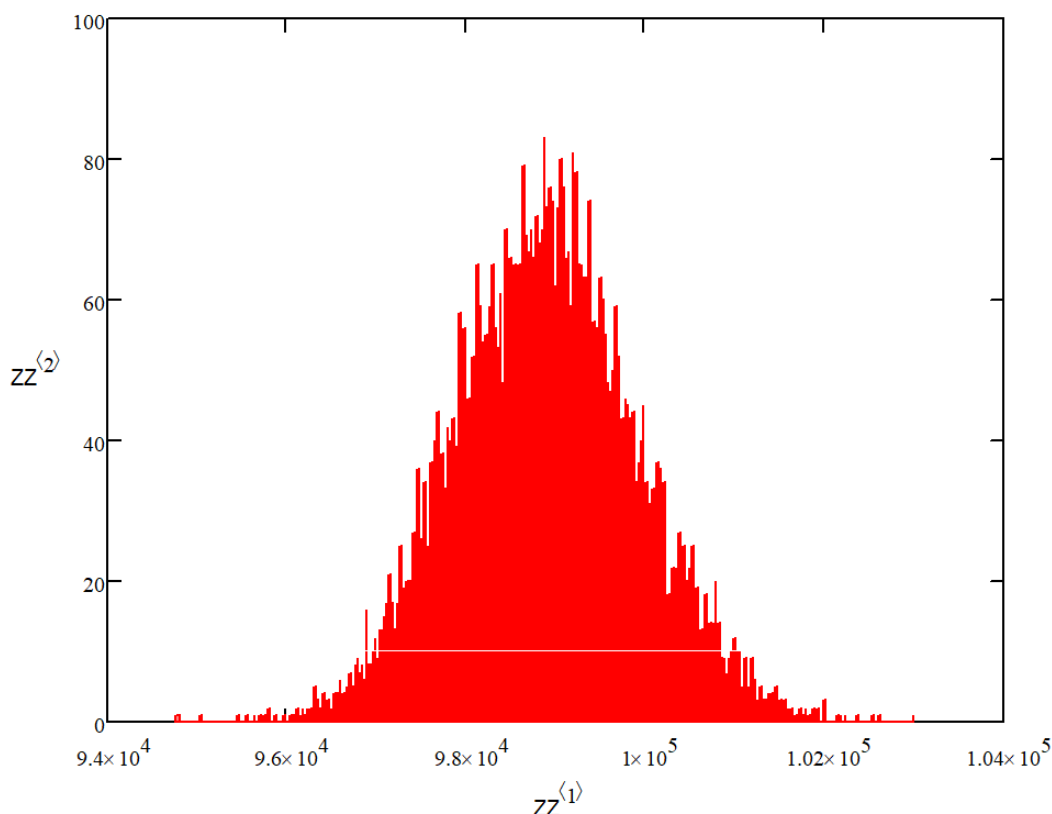


Рисунок 4 – Гистограмма распределения для 10000 реализаций

$\max(ZZ^{(2)}) = 83$	$\text{median}(ZZ) = 4.744 \times 10^4$	– медиана
	$\text{skew}(ZZ) = 3.457 \times 10^{-3}$	– асимметрия
	$\text{kurt}(ZZ) = -1.999$	– эксцесс
	$\text{mean}(S\_ao1) = 9.205 \times 10^4$	– среднее
	$\text{var}(S\_ao1) = 8.409 \times 10^5$	– дисперсия
	$\text{stdev}(S\_ao1) = 917.011$	– среднее квадр. отклонение
	$\text{Cov}(S\_ao1) = 9.962 \times 10^{-3}$	– коэф. ковариации

Рисунок 5 – Основные характеристики распределения

Выборки 1000 и 10000 реализаций дают очень близкие результаты по числовым характеристикам.

Как правило, требуется знать наилучший и наихудший сценарии возможных событий. Статистические показатели для ожидаемого расхода: минимальные значения – (89,690 т, 91,050 т), максимальные значения – (96,620 т, 97,070 т), средние – ожидаемые значения (93,230 т, 94,410 т), представленные для двух случайных выборок, включающих 1000 и 10000 реализаций модели, практически не отличаются. Разброс значений относительно среднего (коэффициент ковариации) составляет 1 % (рисунок 6).

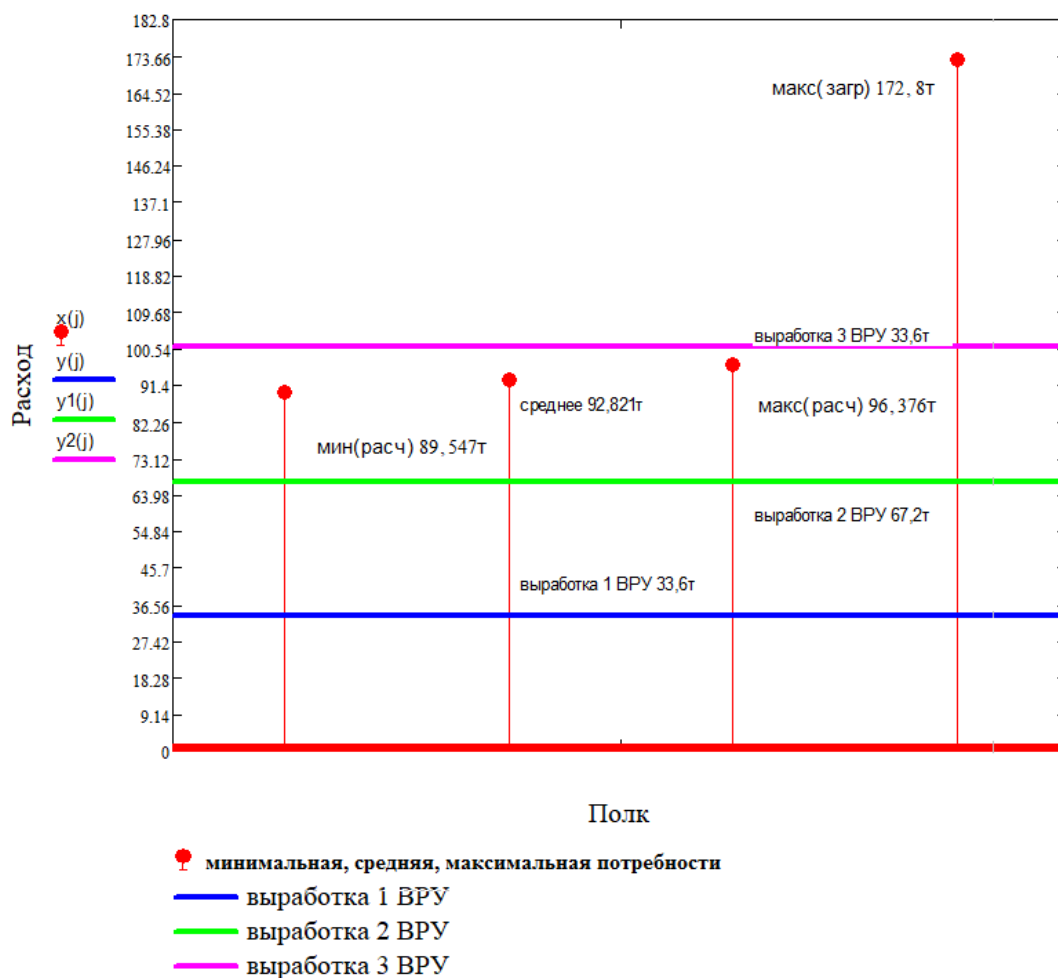


Рисунок 6 – Соотношение моделируемого расхода и количества азота, вырабатываемого ВРУ

**Выводы.** Анализ рассмотренных сценариев имитационной модели показал, что для обеспечения боевой готовности полка требуется непрерывная работа трех ВРУ в течение отчетного периода, то есть 20 дней, но даже это не позволяет сделать стратегический запас (с учетом испаряемости) на период перезагрузки ВРУ, а также ставит под угрозу боеготовность, в случае непредвиденной (экстренной) боевой ситуации, требующей использования всех имеющихся ресурсов. Это приводит к необходимости постановки и решения оптимизационной транспортно-логистической задачи, позволяющей непрерывно обеспечить снабжение аэродромов сжиженными газами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сазонов Д.Ф., Лунин А.С., Матвеев А.И. Инженерно-авиационное обеспечение государственной авиации. Ч. 1. Самара: Самар. Гос. аэрокос. ун-т, 2006. 145 с.
2. Приказ Министра обороны РФ от 03 июня 2014 г. № 333 «Об утверждении руководства по войсковому (корабельному) хозяйству в Вооруженных Силах Российской Федерации».
3. Руководство по автомобильной и электрогазовой службе авиации Вооруженных Сил СССР. М.: Воениздат, 1983. 128 с.
4. Приказ Минобороны РФ от 27 апреля 2009 г. № 265 «Об утверждении Федеральных авиационных правил медицинского обеспечения полетов государственной авиации».
5. Beeson H.D., Smith S.R., Stewart W.F. Safe Use of Oxygen and Oxygen Systems: Handbook for Design, Operation, and Maintenance. ASTM International, 2007. 135 p.



6. Pilots Kept Losing Oxygen and the Military Had No Idea Why. Now There's a Possible Fix / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.nytimes.com/2018/12/27/magazine/air-force-hypoxia-pilots-navy.html> (дата обращения 02.05.2020).
7. Свит Т.Ф. Основы разделения воздуха методом глубокого охлаждения и ректификации: учебное пособие / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2005. 132 с.
8. Коршак А.А. Основы транспорта, хранения и переработки нефти и газа: учебн. пособие / А.А. Коршак. Ростов н/д: Феникс, 2015. 365 с.
9. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учебное пособие / Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. 5-е изд., стер. М.: КНОРУС, 2016. 448 с.
10. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. 2-е изд., исправл. и дополн. М.: Физматлит. 2002. 496 с.
11. Кораблев Ю.А. Имитационное моделирование: учебник / Ю.А. Кораблев. М.: КНОРУС, 2017. 146 с.
12. Приказ Министра обороны РФ от 24.09.2004 № 275 «Об утверждении Федеральных авиационных правил производства полетов государственной авиации».
13. Приказ Министра обороны РФ от 27.03.2001 № 130 (ред. от 29.12.2014) «Об утверждении Перечня воинских должностей военнослужащих, проходящих военную службу по контракту, постоянно работающих на аэродромах, полигонах, технических и стартовых позициях по непосредственному обслуживанию летательных аппаратов и обеспечению их полетов».
14. Бородачѳв С.М. Имитационное моделирование в экономике: учебное пособие / С.М. Бородачѳв. Екатеринбург: УрФУ, 2010. 81 с.

#### REFERENCES

1. Sazonov D.F., Lunin A.S., Matveev A.I. Inzhenerno-aviacionnoe obespechenie gosudarstvennoj aviacii. Ch. 1. Samara: Samar. Gos. a`erokos. un-t, 2006. 145 p.
2. Prikaz Ministra oborony RF ot 03 iyunya 2014 g. № 333 «Ob utverzhdanii rukovodstva po vojskovomu (korabel'nomu) hozyajstvu v Vooruzhennyh Silah Rossijskoj Federacii».
3. Rukovodstvo po avtomobil'noj i `elektrogazovoj sluzhbe aviicii Vooruzhennyh Sil SSSR. M.: Voenizdat, 1983. 128 p.
4. Prikaz Minoborony RF ot 27 aprelya 2009 g. № 265 «Ob utverzhdanii Federal'nyh aviacionnyh pravil medicinskogo obespecheniya poletov gosudarstvennoj aviicii».
5. Beeson H.D., Smith S.R., Stewart W.F. Safe Use of Oxygen and Oxygen Systems: Handbook for Design, Operation, and Maintenance. ASTM International, 2007. 135 p.
6. Pilots Kept Losing Oxygen and the Military Had No Idea Why. Now There's a Possible Fix / [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.nytimes.com/2018/12/27/magazine/air-force-hypoxia-pilots-navy.html> (data obrascheniya 02.05.2020).
7. Svit T.F. Osnovy razdeleniya vozduha metodom glubokogo ohlazhdeniya i rektifikacii: uchebnoe posobie / Alt. gos. tehn. un-t im. I.I. Polzunova. Barnaul: Izd-vo AltGTU, 2005. 132 p.
8. Korshak A.A. Osnovy transporta, hraneniya i pererabotki nefi i gaza: uchebnoe posobie / A.A. Korshak. Rostov n/d: Feniks, 2015. 365 p.
9. Ventcel' E.S., Ovcharov L.A. Teoriya sluchajnyh processov i ee inzhenernye prilozheniya: uchebnoe posobie / Ventcel' E.S., Ovcharov L.A. 5-e izd., ster. M.: KNORUS, 2016. 448 p.
10. Pugachev V.S. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika. 2-e izd., ispravl. i dopoln. M.: Fizmatlit. 2002. 496 p.
11. Korablev Yu.A. Imitacionnoe modelirovanie: uchebnik / Yu.A. Korablev. M.: KNORUS, 2017. 146 p.
12. Prikaz Ministra oborony RF ot 24.09.2004 № 275 «Ob utverzhdanii Federal'nyh aviacionnyh pravil proizvodstva poletov gosudarstvennoj aviicii».





13. Prikaz Ministra oborony RF ot 27.03.2001 № 130 (red. ot 29.12.2014) «Ob utverzhdenii Perechnya voinskih dolzhnostej voennosluzhaschih, prohodyaschih voennuyu sluzhbu po kontraktu, postoyanno rabotayuschih na a`erodromah, poligonah, tehnicheskih i startovyh poziciyah po neposredstvennomu obsluzhivaniyu letatel'nyh apparatov i obespecheniyu ih poletov».

14. Borodachev S.M. Imitacionnoe modelirovanie v `ekonomike: uchebnoe posobie / S.M. Borodachev. Ekaterinburg: UrFU, 2010. 81 p.

© Сумин В.А., Рязских В.И., 2021

Сумин Виктор Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник 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, vsum@rambler.ru.

Рязских Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник 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, ryazhskih\_vi@mail.ru.