

УДК 628.8:697.9:004.414.23:519.876.5:303.094.7:004.942

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-2-396-410

**Для цитирования:** Имитационная модель системы обеспечения внутриклиматических характеристик «чистых» производственных помещений предприятий космической промышленности / Д. А. Жуйков, В. П. Назаров, М. Г. Лазеев и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 2. С. 396–410. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-2-396-410.

**For citation:** Zhuikov D. A., Nazarov V. P., Lazeev M. G., Chernenko V. V., Tolstopyatov M. I. [Simulation model of the system for ensuring the intraclimatic characteristics of clean industrial premises of space industry enterprises]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 2, P. 396–410. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-2-396-410.

## **Имитационная модель системы обеспечения внутриклиматических характеристик «чистых» производственных помещений предприятий космической промышленности**

Д. А. Жуйков<sup>1\*</sup>, В. П. Назаров<sup>1</sup>, М. Г. Лазеев<sup>2</sup>,  
В. В. Черненко<sup>1</sup>, М. И. Толстопятов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31

<sup>2</sup>Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск, Красноярского края, ул. Ленина, 52

\*E-mail: dimitri\_z@inbox.ru

*Создание современных изделий ракетно-космической техники обеспечивается на предприятиях космической промышленности крупномасштабным производственно-технологическим комплексом, объединяющим основные производственные и вспомогательные подразделения, инженерно-технологические и эксплуатационные службы, выполняющие сложные задачи по повышению качества и надежности выпускаемой продукции.*

*Наиболее ответственные операции технологических процессов сборки и испытаний космических аппаратов выполняются в так называемых «чистых помещениях» (ЧП), в которых нормативной отраслевой документацией регламентируется концентрация аэрозольных пылевидных частиц, а также задаются параметры температурно-влажностного режима. С целью контроля внутриклиматического состояния чистых помещений и управления работой теплоэнергетического оборудования соответствующего назначения предлагается разработать цифровой двойник производственного ЧП и системы поддержания стабильности внутриклиматических характеристик этого помещения с учетом протекающих технологических процессов и отдельных операций с большим объемом функциональных возможностей.*

*В качестве исходной модели данной системы рассматривается имитационная модель объекта исследования, которой является ЧП, располагаемое в типовом промышленном здании. Установлены граничные условия модели, определены основные факторы тепловлажностного состояния внутреннего объема, разработана методика расчета теплопритоков от различных тепловых источников.*

*С учетом аэродинамических характеристик вентиляционного оборудования представлены рекомендации по математическому определению параметров воздушных потоков (приток и удаление воздушных масс при работе вентиляционного оборудования).*

*В результате разработки расчетных методик получена замкнутая система неявных нелинейных уравнений, которая решается численными методами бисекции с заданной точностью.*

*Имитационная модель ЧП является базовой основой для построения цифрового двойника объекта, концепция которого предполагает, что объект может быть представлен в виде физической и виртуальной системы. Одновременно отображение и взаимодействие реального и виртуального*

(цифрового) объектов дает возможность сформировать конкретные рекомендации по поддержанию требуемых параметров (температуры, влажности, скорости потока), оптимизации режимов эксплуатации и обслуживанию реального производственного ЧП для сборки и испытаний современных конкурентоспособных космических аппаратов.

*Ключевые слова:* ракетно-космическая техника, термозодинамика, чистые помещения, внутриклиматические параметры, имитационная модель.

## **Simulation model of the system for ensuring the intraclimatic characteristics of clean industrial premises of space industry enterprises**

D. A. Zhuikov<sup>1\*</sup>, V. P. Nazarov<sup>1</sup>, M. G. Lazeev<sup>2</sup>,  
V. V. Chernenko<sup>1</sup>, M. I. Tolstopyatov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
<sup>2</sup>Joint-Stock Company "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems"  
52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
\*E-mail: dimitri\_z@inbox.ru

*The creation of modern products of rocket and space technology is provided at the enterprises of the space industry by a large-scale production and technological complex that unites the main production and auxiliary units, engineering, technological and operational services that perform complex tasks to improve the quality and reliability of products.*

*The most important operations of the technological processes of assembly and testing of spacecraft are carried out in the so-called "clean rooms" (PE), in which the concentration of aerosol dust particles is regulated by the regulatory industry documentation, as well as the parameters of the temperature and humidity regime are set. In order to control the internal climatic condition of clean rooms and control the operation of heat and power equipment for the appropriate purpose, it is proposed to develop a digital twin of a production clean room and a system for maintaining the stability of the internal climatic characteristics of this room, taking into account the ongoing technological processes and individual operations with a large amount of functionality.*

*As an initial model of this system, a simulation model of the object of study is considered, which is a clean room located in a typical industrial building. The boundary conditions of the model are established, the main factors of the heat and humidity state of the internal volume are determined, a method for calculating heat flows from various heat sources is developed.*

*Taking into account the aerodynamic characteristics of the ventilation equipment, recommendations are presented for the mathematical determination of the parameters of air flows (inflow and removal of air masses during the operation of ventilation equipment).*

*As a result of the development of computational methods, a closed system of implicit nonlinear equations is obtained, which is solved by numerical bisection methods with a given accuracy.*

*The simulation model of the state of emergency is the basic basis for constructing a digital twin of an object, the concept of which assumes that the object can be represented as a physical and virtual system. At the same time, the display and interaction of real and virtual (digital) objects makes it possible to form specific recommendations for maintaining the required parameters (temperature, humidity, flow rate), optimizing the operating modes and maintenance of a real clean production room for the assembly and testing of modern competitive spacecraft.*

*Keywords:* rocket and space technology, thermogasdynamics, clean rooms, industrial premises, indoor climatic parameters.

## Введение

Высокие темпы развития наукоемких отраслей промышленности обуславливают увеличение объема выпускаемой продукции, которая должна удовлетворять всем предъявляемым техническим требованиям и стандартам. На мировом рынке наблюдается возрастающая тенденция производства космических аппаратов (КА) широкого класса и назначения при высоком качестве и надежности долговременной эксплуатации.

КА, по сравнению с другими изделиями машиностроения, имеют ряд конструктивно-технологических особенностей, которые в значительной мере определяют техническое содержание, объем и структуру сборочных, монтажных и испытательных работ, а также используемое основное и вспомогательное оборудование.

К таким особенностям КА относятся значительные габариты изделий: сложность геометрических форм и малая жесткость деталей конструкции; требования по ограничению массы изделия; большое количество систем, агрегатов и приборов, входящих в состав КА; высокая стоимость изготовления и эксплуатации на всех этапах жизненного цикла КА.

Изготовления КА относятся к единичному и мелкосерийному типу производств и представляет собой совокупность передовых технологических процессов, основанных на современных достижениях науки и техники. Оборудование производственно-технологического комплекса должно обеспечивать качественное изготовление и испытание всех деталей, узлов, агрегатов приборов изделия и, следовательно, их работоспособность в течение всего срока активного существования КА в космическом пространстве.

Особые требования предъявляются к чистоте внутренних полостей и коммуникаций аппаратов. Металлические и неметаллические частицы пылевидной и аэрозольной субстанции могут вызвать короткое замыкание электрических цепей, стать причиной заклинивая подвижных элементов и нарушения герметичности клапанов, редукторов, регуляторов в пневмогидросистемах. В пилотируемых КА посторонние пылевидные частицы и биологические микроорганизмы могут создать угрозу безопасности жизнедеятельности экипажа. По существующим отраслевым нормативным техническим условиям наличие посторонних предметов внутри КА не допускается, а суммарная масса загрязнений, например, для крупного кислородного бака не должна превышать 0,01 г [1].

На предприятиях космической промышленности наиболее ответственные операции технологических процессов сборки и испытаний КА, а также окончательная сборка КА выполняются в так называемых «чистых помещениях» (ЧП), в которых концентрация аэрозольных частиц пыли не должна превышать допустимых в соответствии с ГОСТ [1] значений. Для исключения возможности проникновения в ЧП аэрозольных загрязнений из примыкающих помещений более низкого класса чистоты, необходимо использовать принцип физического барьера (герметичные ограждающие конструкции, тамбур-шлюзы), а также при помощи приточно-вытяжной вентиляции создавать и поддерживать избыточное давления по отношению к примыкающим помещениям в пределах от 5 до 20 Па [2].

В соответствии с ГОСТ [3], в ЧП необходимо регулярно проводить текущий контроль концентрации аэрозольных частиц и избыточного давления, а в соответствии с требованиями конструкторской документацией на изделия вести контроль температуры и относительной влажности воздуха. Следует отметить, что в течение производственного процесса в чистых помещениях может проявляться повышение концентрации аэрозольных частиц, обусловленное повышением технологической активности персонала.

Для исключения негативного влияния человеческого фактора при проведении регулярного контроля параметров ЧП, на предприятиях должна внедряться автоматизированная система обеспечения внутриклиматических параметров ЧП (АСОВКП ЧП). В ходе эксплуатации АСОВКП ЧП, поддержание избыточного давления и распределение воздушных потоков производственных помещений является довольно сложной задачей и зависит не только от таких очевидных факторов, как производительность вентиляционных систем и выполнение организаци-

онных мероприятий (использование тамбуршлюзов, контроль состояния оконных и дверных проемов, въездных ворот и т. д.), но и метеорологической обстановки за пределами здания.

В связи с этим возникает необходимость разработки цифрового двойника АСОВКП чистых производственных помещений предприятий космической промышленности [4–6].

Концепция термина «цифровой двойник» (ЦД) предполагает, что каждый объект можно представить в виде физической и виртуальной системы так, что виртуальная модель отображает физическую модель и наоборот [7]. Концепция взаимодействия физического объекта в реальном мире с его цифровым двойником в виртуальном пространстве и наличие прямой и обратной связи между ними в целом отображает идею ЦД.

На основе актуализированной модели ЦД могут быть сформированы рекомендации по оптимизации режима эксплуатации и обслуживания реального объекта. Например, модель может предсказать возможность отказа определенного узла, рекомендовать время профилактического обслуживания, проведения техосмотра и прочие ключевые мероприятия.

Основой для построения цифрового двойника является имитационная модель объекта, которая является частным случаем математической модели явления, которая представляет процесс с определенной точностью [8].

### **Постановка задачи исследования**

Объектом исследования принимается ЧП, которое находится в типовом промышленном здании, предназначенном для сборки и испытаний изделий ракетно-космической техники. Здание имеет общий объем циркулирующего воздуха и разделено на «чистые зоны»: высокий пролет, низкий пролет отметка 1, низкий пролет отметка 2, низкий пролет отметка 3.

Основные положения к ЧП задаются следующими нормами [9–15] и условиями:

- основные геометрические параметры здания (высота, ширина, ширина низкого пролета, ширина высокого пролета, длина);
- параметры наружного воздуха (приведены в [13]);
- кратность воздухообмена по притоку и вытяжке определяется расчетом, но принимается не менее 3-кратного в час [9];
- персонал работает в две смены. 1-я с 8:00 до 17:00, 2-я с 16:45 до 1:15. Одновременное нахождение персонала на каждом этаже от 20 до 30 человек;
- энергоемкое технологическое оборудование, тепловыделение которого стоит рассматривать при расчетах, в производственных помещениях нет тепловыделения или оно незначительное.

Поступающий в помещение воздух, подготовленный вентиляционными системами, должен обеспечивать гарантированное поддержание климатических параметров в помещении независимо от атмосферных параметров и солнечной активности с наружи помещения, откуда он берется для подготовки перед подачей в производственные помещения. Это расход воздуха зависит от тепловлагопритоков, системы приточно-вытяжной вентиляции и инфильтрации здания в целом.

Для управления производительностью приточных (и вытяжных) агрегатов должны использоваться частотные преобразователи, которые поддерживают работу приточной вентиляции на 70–80 % мощности от максимальной, поскольку увеличение производительности до 100 % приводит к появлению громких шумов от вибрации воздуховодов и возникновению воздушных потоков в помещении, превышающих допустимые нормы, предусмотренные СанПиН. Учитывая также, что основными климатическими параметрами в помещении является температура (18–22 °С) и относительная влажность (40–60 %), производительность приточной установки в максимальном режиме не всегда допустима.

### **Описание имитационной модели**

Имитационная модель разрабатывается с использованием рекомендаций, изложенных в работах [16–19].

Значения всех конструктивных и справочных данных задаются и сохраняются в компьютерной базе данных (БД). Определяемые параметры будут зависеть как от наружных, так и внут-

ренных параметров воздуха, а также от режима эксплуатации помещения или коэффициента эксплуатации помещения (КЭП)  $\eta$ , который принимает следующие значения:  $\eta = 1$  – день;  $\eta = 0$  – ночь.

КЭП оказывает влияние на значения суточных температур и влажности атмосферного воздуха:

$$t_a = t_{ан} - \Delta t_{ан}(1 - \eta),$$

$$\varphi_a = \varphi_{ан} - \Delta \varphi_{ан}(1 - \eta).$$

Важной характеристикой ЧП является тепловлажностное состояние воздуха, которое определяется по термодинамическим зависимостям насыщенного и сухого воздуха, которые представляют собой связь между термодинамическими параметрами: давление  $p$ , температура  $T$ , относительная влажность  $\varphi$ , энтальпия (теплосодержание)  $h$ , влагосодержание  $d$ , атмосферное давление  $p_{ан}$ . Взаимосвязь параметров описывается по термодинамическим зависимостям [20].

Существенным образом на тепловлажностное состояние воздуха оказывают влияние тепло- и влаготритики.

Теплопритоки в помещения осуществляются следующими способами:

- 1) через ограждающие конструкции здания;
- 2) от солнечной радиации;
- 3) с наружным воздухом;
- 4) от людей;
- 5) от оборудования.

Теплопритоки в помещения через ограждающие конструкции определяются по законам конвективного теплообмена и зависят от статического давления  $p_b$  и температуры воздуха в помещении  $t_b$ , от статического давления  $p_a$  и температуры атмосферного воздуха  $t_a$ , значение которой изменяется как в течение года, так и в течение суток, а также скорости атмосферного воздуха. Кроме того, из-за негерметичности окон и наличия различных отверстий и щелей в ограждающих конструкциях с подветренной стороны и недостаточного подпора давления здания, наружный атмосферный воздух может проникать в здание.

Теплопритоки в помещения через ограждающие конструкции зависят также от коэффициента теплопередачи, который определяется с учетом термического сопротивления стен, пола и перекрытий, и конвекции воздуха. Параметры ограждающих конструкций здания задаются в базе данных.

Теплопритоки через стены зависят от коэффициента теплопередачи, который зависит от суммарного термического сопротивления стен:

$$k_d(t_b, p_b, t_a, p_a, w_a) = \frac{1}{R_s(t_b, p_b, t_a, p_a, w_a)}.$$

Общая формула для определения теплопритоков через ограждающие конструкции имеет вид

$$Q(t_b, t_a, p_b, p_a, w_a) = k_d(t_b, t_a, p_b, p_a, w_a)F(t_a - t_b).$$

Так как восточная стена граничит со второй частью здания, в которой поддерживаются нормальные температурные режимы, то температурный напор  $(t_a - t_b) = 0$ , т. е. теплопритоки отсутствуют.

В результате получим окончательные теплопритоки через ограждающие конструкции:

$$1. \text{ юг } \longrightarrow k_{д\text{ю}}(t_b, t_a, p_b, p_a, k_{w\text{ю}}w_a) \longrightarrow Q_{\text{ю}} = k_{д\text{ю}}F_{\text{юс}}(t_a - t_b);$$

$$2. \text{ запад } \longrightarrow k_{дз}(t_b, t_a, p_b, p_a, k_{wз}w_a) \longrightarrow Q_{\text{ю}} = k_{дз}F_{зв}(t_a - t_b);$$

$$3. \text{ север } \longrightarrow k_{дс}(t_b, t_a, p_b, p_a, k_{wс}w_a) \longrightarrow Q_{\text{с}} = k_{дс}F_{с\text{ю}}(t_a - t_b).$$

Суммарный теплоприток через ограждающие конструкции

$$Q_{lw} = Q_{ю} + Q_3 + Q_c.$$

Кроме того, существуют теплопритоки от смежных помещений и на основании [17; 18; 20; 21], принимаем температуру подвала  $t_{пдв} = 7^\circ\text{C}$  и чердачного помещения  $t_ч = 12^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплопередачи для пола 1-го этажа и перекрытия чердака определяется аналогично, как для стен:

$$k_{дч} = k_д(t_в, t_{out}, p_в, p_а, k_{wв} w_а).$$

Тогда теплоприток подвала будет

$$Q_{пдв} = k_{д.пдв} F_{прк} (t_в - t_{out}).$$

Тогда теплоприток чердачного помещения будет

$$Q_{1ч} = k_{дч} F_{прк} (t_в - t_{out}).$$

Теплопритоки от солнечной радиации  $Q_{1с}$  рассчитывают при температуре воздуха более  $10^\circ\text{C}$  [20] и складываются из теплопритоков через массивные ограждения зданий (стены, кровли, покрытия и т. д.) и теплопритоков через световые проемы (окна, витрины и т. д.):

$$Q_{1с} = Q_{1с.мо} + Q_{1с.сн}.$$

Теплоприток от солнечной радиации через наружные стены определяют по формуле

$$Q_{1с.мо} = k_д (F - F_{сум.ок}) \Delta t_c,$$

где  $F$  – площадь, поверхности, облучаемая солнцем;  $F_{сум.ок}$  – суммарная площадь остекления здания;  $\Delta t_c$  – избыточная разность температур, характеризующая действие солнечной радиации в летнее время. Значения избыточной разности температур зависят от ориентации по сторонам горизонта, задается и хранится в базе данных:  $\Delta t_{с юг} = 8,5$ ,  $\Delta t_{с запад} = 10,2$ ,  $\Delta t_{с север} = 0$ .

Следовательно, теплоприток от солнечной радиации через массивные ограждения зданий равен

$$Q_{1с.мо} = Q_{1с.мо.в} + Q_{1с.мо.ю} + Q_{1с.мо.з} + Q_{1с.мо.с}.$$

Теплопритоки от солнечной радиации через световые проемы для кондиционируемых помещений  $Q_{1с.св}$  подсчитываются отдельно для каждой стороны горизонта:

$$Q_{1с.св} = Q_{ок} F \tau.$$

где  $Q_{ок}$  – удельный теплоприток от солнечной радиации через окна, определяется по справочнику из БД,  $\text{Вт/м}^2$ ;  $F$  – площадь светового проема,  $\text{м}^2$ ;  $\tau = 1$  – коэффициент, учитывающий затенение светового проема.

Находим теплопритоки от солнечной радиации через световые проемы

$$Q_{1с.св.ю} = Q_{ок.ю} F_{ю}$$

$$Q_{1с.св.з} = Q_{ок.з} F_з$$

$$Q_{1с.св.с} = Q_{ок.с} F_с.$$

Общий теплоприток от солнечной радиации через световые проемы

$$Q_{1с.св} = Q_{1с.св.с} + Q_{1с.св.ю} + Q_{1с.св.з}.$$

Общий теплоприток от солнечной радиации

$$Q_{1c} = Q_{1c.mo} + Q_{1c.cb}.$$

Тогда общий теплоприток через ограждающие конструкции

$$Q_1 = Q_{1w} + Q_{1пдв} + Q_{1ч} + Q_{1c}.$$

Теплопритоки, выделяющиеся при проведении технологических операциях, отсутствуют

$$Q_2 = 0 \text{ Вт}.$$

Теплопритоки с наружным воздухом недопустимы, так как обеспечивается избыточное давление воздуха в помещении. Однако из-за негерметичности окон и наличия различных отверстий и щелей в ограждающих конструкциях с подветренной стороны и недостаточного внутреннего избыточного давления наружный атмосферный воздух может проникать в здание. Тогда теплопритоки определяются

$$Q_3 = \rho L_{\text{эксф}} (i_a - i_b) \text{ Вт},$$

где  $L_{\text{эксф}}$  – расход воздуха через негерметичности здания с подветренной стороны

$$L_{\text{эксф}} = n_{\text{эксф}} F_{\text{эксф}} w_{\text{эксф}},$$

где  $n_{\text{эксф}}$  – количество различных отверстий и щелей в ограждающих конструкциях;  $F_{\text{эксф}}$  – площадь одного отверстия,  $w_{\text{эксф}}$  – среднерасходная скорость, которая определяется через местное гидравлическое сопротивление проникания наружного воздуха за счет ветрового давления и согласно [22], где  $\zeta_s = 1,5$  – коэффициент местного сопротивления, как для глубокого отверстия в стенке с неограниченной площадью;  $l$  – толщина стены,  $\Delta p_w$  – ветровой подпор за счет воздухопроницаемости ограждающих конструкций, который согласно [14] «Тепловая защита зданий» принимаем по формуле

$$\Delta p_{\text{ветер}} = 0,55hg(\rho_a - \rho_b) + 0,03g\rho_a w_a^2.$$

Тогда

$$\Delta p_w = p_b - (p_a + \Delta p_{\text{ветер}}),$$

где  $h$  – высота здания.

Тогда получим выражение для определения объемного расхода воздуха при эксфильтрации  $L_{\text{эксф}}$ .

Теплопритоки, выделяемые персоналом, подсчитывают по формуле

$$Q_{4л} = q_{\text{чел}} n, \text{ Вт},$$

где  $q_{\text{чел}}$  – количество теплоты, выделяемое одним человеком, и, в соответствии с рекомендациями, род работы персонала определяется как работа средней тяжести  $q_{\text{чел}} = 112 \text{ Вт}$ ;  $n$  – максимальное число людей, находящихся в помещении.

С учётом коэффициента эксплуатации помещения  $\eta$  число людей, находящихся в помещении определяется

$$n_d = n\eta.$$

Теплопритоки от оборудования находятся по формуле

$$Q_5 = \Sigma NK_0 K_n,$$

где  $\Sigma N$  – суммарная мощность тепловыделяющего оборудования;  $K_n$  – коэффициент использования оборудования в течение смены в пересчете на 1 рабочий час (среднее значение  $K_n = 0,95$ );

$K_o$  – коэффициент, учитывающий одновременность работы однотипного оборудования (среднее значение  $K_o = 0,9$ ). Перечень оборудования и осветительной аппаратуры приведены в справочнике БД.

Находим теплопритоки от оборудования

$$Q_{5об} = \Sigma N_{об} K_o K_{и} \eta .$$

Теплопритоки от электрического освещения

$$Q_{5свет} = \Sigma n_{свет} K_o K_{и} ,$$

где  $N_{свет}$  – мощность осветительной аппаратуры.

Скрытые теплопритоки от влажной уборки помещения

$$Q_{5скр} = W_{4об} r ,$$

где  $r$  – теплота парообразования;  $W_{4об}$  – влагопритоки (см. ниже).

Определение суммарной тепловой нагрузки

$$Q_5 = Q_{об} + Q_{свет} + Q_{5скр} .$$

Тогда суммарные теплопритоки будут

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 .$$

Таким образом, определён полный тепловой поток в помещении в зависимости от параметров атмосферного воздуха и воздуха в помещении, а также с учетом коэффициента эксплуатации помещения, скорости и направления ветра.

Влагопритоки так же влияют на внутриклиматические параметры воздуха в ЧП. Влагоприток  $W_{вз}$  с наружным воздухом, поступающим в помещение без предварительной тепловлажностной обработки, определяют по формуле

$$W_{вз} = L_{вз} (d_n - d_b) 10^{-3} , \text{ кг/с} ,$$

где  $d_n, d_b$  – влагосодержание наружного воздуха и воздуха в помещении, г/кг.

Так как воздух проходит предварительную тепловлажностную обработку, то считаем, что приточный воздух имеет такое же влагосодержание, как и внутренний воздух помещения, тогда

$$W_{вз} = 0 .$$

Влагопритоки, выделяемые персоналом,  $W_{л}$  (в) подсчитывают по формуле

$$W_{л} = w_{чел} n , \text{ кг/с} ,$$

где  $w_{чел}$  – влаговыделение одного человека, кг/с;  $n$  – число людей в помещении. Значения влаговыделений от человека зависят от температуры и рода работы и сохраняются в справочнике БД.

Влагопритоки от технологического оборудования отсутствуют, но в здании проводится влажная уборка горизонтальных поверхностей каждый час. Тогда влагопритоки от влажной уборки с учетом площади высокого пролета и 3-х уровней низкого пролета будут

$$W_{об} = \frac{w_y (F_{прк1} + 3F_{прк2}) \eta}{3600} , \text{ кг/с} ,$$

где  $w_y$  – расход воды при влажной уборке горизонтальных поверхностей каждый час. В результате суммарные влагопритоки составят

$$W = W_{вз} + W_{л} + W_{4об} .$$

**Определение внутриклиматических параметров**

Согласно первому закону термодинамики в общем виде, тепловой поток определяется

$$Q = L_n \rho \Delta i, \quad (1)$$

где  $Q$  – тепловой поток, Вт;  $\rho$  – плотность;  $\Delta i$  – изменение энтальпии воздуха;  $L_n$  – объемный расход воздуха, который определяется из режима работы вентилятора системы кондиционирования воздуха.

**Определение объемного расхода приточного воздуха**

Аэродинамические характеристики вентиляторов определены при испытаниях опытных образцов в соответствии с ГОСТ 10921–90. Все характеристики радиальных вентиляторов приведены к нормальной плотности воздуха  $\rho_n = 1,2 \text{ кг/м}^3$  на входе в вентилятор, соответствующей нормальным атмосферным условиям:  $p_n = 101325 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст.}$  – барометрическое давление;  $t_n = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  – температура воздуха;  $T_n = 293 \text{ К}$  – абсолютная температура воздуха;  $\varphi_n = 50 \%$  – относительная влажность воздуха.

При перемещении вентилятором воздуха с плотностью  $\rho_a$ , отличной от нормальной плотности воздуха  $\rho_n$ , характеристика вентилятора должна быть пересчитана по формулам

$$\begin{aligned} L &= L_{\text{внт}}, \\ \frac{p_{\text{уд}}}{p_y} &= \frac{\rho_a}{\rho_n}, \\ \frac{N_d}{N_{\text{внт}}} &= \frac{\rho_a}{\rho_n}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $L_{\text{внт}}$  – номинальная производительность вентилятора,  $N_{\text{внт}}$  – номинальная потребляемая мощность,  $p_{\text{уд}}$  – номинальное полное давление,  $L_d$  – действительная производительность,  $p_{\text{уд}}$  – действительное полное давление,  $N_d$  – действительная потребляемая мощность.

Если вентиляторы будут эксплуатироваться при частоте вращения  $n'$ , отличной от частоты вращения  $n$ , приведенной в каталоге, то пересчет параметров вентиляторов должен осуществляться по формулам

$$\begin{aligned} \frac{L'}{L} &= \frac{n'}{n}; \\ \frac{p_v'}{p_v} &= \left(\frac{n'}{n}\right)^2; \\ \frac{N'}{N} &= \left(\frac{n'}{n}\right)^3, \end{aligned}$$

где параметры со штрихом соответствуют числу оборотов  $n'$ .

Тогда объемный расход приточного воздуха определяется

$$\begin{aligned} \frac{L_{\text{п}}}{L_d} &= (k_N), \\ \frac{p_{\text{п}}}{p_d} &= \left(\frac{L_{\text{п}}}{L_d}\right)^2, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{д}}} = (k_N)^2,$$

где  $k_N$  – коэффициент регулирования вентилятора по угловой скорости, который принимает значения от 0 до 1.

Однако, согласно теории гидрогазодинамики, реальный расход приточного воздуха  $L_{\text{пр}}$  определяется на основе пересечения гидравлической характеристики системы объекта и напорной (аэродинамической) характеристики вентилятора. Поэтому необходимо составить систему уравнений для описания энергетического баланса воздушных потоков системы установок.

Для обеспечения воздушного подпора в ЧП необходимо, чтобы величина расхода приточного воздуха превышала величину расхода вытяжного воздуха на 20–25 %, тогда уравнение неразрывности для ЧП будет определяться как сумма приточного расхода равная сумме вытяжного расхода и расхода от инфильтрации и эксфильтрации

$$\Sigma L_{\text{пр}} = \Sigma L_{\text{вт}} + \Sigma L_{\text{ин}} + L_{\text{эксф}}. \quad (4)$$

Так как давление в помещении зависит от множества параметров, то подпор в общем виде можно представить в виде выражения

$$\Delta p_{\text{подп}} = p_{\text{в}} - p_{\text{а}} = f(p_{\text{а}}, t_{\text{а}}, w_{\text{а}}, \varphi_{\text{а}}, t_{\text{в}}, \varphi_{\text{в}}, \Sigma L_{\text{пр}}).$$

#### Определение действительного расхода приточного воздуха

Для каждой приточной и вытяжной установки необходимо определить гидравлические потери в воздуховодах с учетом фильтров и шумоглушителей.

В общем случае гидравлические потери определяются, согласно [22]:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho w^2 \left( \lambda \frac{x}{D_{\text{г}}} + \zeta_s \right), \quad (5)$$

где  $x$  – длина воздуховода;  $D_{\text{г}} = 4F / \Pi$  – гидравлический диаметр воздуховода;  $F$  – площадь сечения воздуховода;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения;  $\zeta_s$  – сумма коэффициентов местного сопротивления;  $w = L_{\text{н}}/F$  – среднерасходная скорость;  $L_{\text{н}}$  – проектный расход.

Определение гидравлического сопротивления воздуховодов

Параметры воздуховодов приточной и вытяжной вентиляции задаются и сохраняются в БД. При наличии воздуховодов для каждого тройника скорость потока будет уменьшаться с уменьшением расхода, согласно выражению

$$L_2 = L_1 - L_3, \quad (6)$$

где  $L_1$  – расход на входе в тройник;  $L_2$  – расход на выходе тройника;  $L_3$  – расход в ответвление, который при известной площади определяется по выражению (5).

В результате, на основе (5), получим для каждой установки зависимости вида

$$\Delta p_{\text{при}} = f(L_{\text{при}}), \quad (7)$$

$$\Delta p_{\text{вти}} = f(L_{\text{вти}}). \quad (8)$$

Гидравлические потери от инфильтрации через дверные проемы зависят от коэффициента местного гидравлического сопротивления [22]

$$\zeta = f \left( \lambda, \frac{F_0}{F_1}, l \right). \quad (9)$$

где  $l$  – толщина дверей; для  $\lambda$  – коэффициент сопротивления трения см. в [22];  $F_0$  – площадь щели в дверном проеме;  $F_1$  – площадь дверной коробки.

Расход воздуха в вентиляционной шахте зависит от перепада давления в ЧП и атмосфере, а также наличия самотяги за вычетом гидравлического сопротивления канала

$$p_B - p_A + \frac{1}{2}\rho w_{вш0}^2 - \frac{1}{2}\rho w_{вш1}^2 + g(\rho_A - \rho_B)(z_{вш1} - z_{вш0}) = \Sigma \left( \frac{1}{2}\rho w_{вши}^2 \left( \lambda \frac{X_{вши}}{D_{вши}} + \zeta_{вши} \right) \right), \quad (10)$$

$$w_{вш0} = \frac{L_{вш0}}{F_{вш0}};$$

$$w_{вш1} = \frac{L_{вш1}}{F_{вш1}},$$

где  $(z_{вш1} - z_{вш0})$  – высота шахты;  $F_{вш0}$ ,  $F_{вш1}$  – площадь проходного сечения шахты на входе и выходе.

Аэродинамические характеристики вентиляторов

В общем случае аэродинамическая характеристика имеет вид

$$p_{вент}(L_{пр}) = k_{2v}L_{пр}^2 + k_{1v}L_{пр} + k_{0v}, \quad (11)$$

где  $k_v$  – коэффициент аэродинамической характеристики, который определяется по диаграмме вентилятора по каталогам производителя. Характеристики вентиляторов, нагревателей и увлажнителей задаются и хранятся в БД.

Таким образом, получим систему нелинейных уравнений (4)–(11), решение которой позволит найти расходы  $L_{пр}$  и  $L_{вт}$ , а также давление в ЧП и величину подпора.

### Определение внутриклиматических параметров приточного воздуха

На вход в приточную систему кондиционирования подаются атмосферный воздух, параметры температуры  $t_a$  и относительной влажности  $\phi_a$  которой известны, а энтальпию и влагосодержание  $i_a$ ,  $d_a$  определяем по этим известным  $t_a$ ,  $\phi_a$ .

Энтальпия приточного воздуха определяется на основе подведенной мощности в СКВ

$$N_{СКВ} = L_{пр}\rho_B(i_a - i_n),$$

тогда с учетом регулирования по мощности

$$i_n = i_a - \frac{k_N N_{СКВ}}{L_{пр}\rho_B}.$$

Влагосодержание приточного воздуха определяется на основе увлажнения воздуха в СКВ – подведенной воды с расходом  $W_{СКВ}$ :

$$W_{СКВ} = L_{пр}\rho_B(d_a - d_n),$$

тогда с учетом регулирования по мощности

$$d_n = d_a - \frac{k_N W_{СКВ}}{L_{пр}\rho_B}$$

массовый расход выходного потока составит  $M_{сум} = M_1 + M_2$ , а массовые доли  $g_1$  и  $g_2$  пара соответствующих потоков. Массовые доли каждого из компонентов смеси определяются по величинам массовых расходов  $M_1$  и  $M_2$  первого и второго потоков. Влагосодержание  $d$  и энтальпия  $h$  – параметры аддитивные, поэтому можно записать

$$d_{\text{см}} = g_1 d_1 + g_2 d_2,$$

$$h_{\text{см}} = g_1 d_1 + g_2 d_2 = g_1 h_1 + (1 - g_1) h_2.$$

Определение конечных внутриклиматических параметров воздуха в помещении

На основе изобарного термодинамического процесса тепловой поток определяется

$$Q = L_{\text{пр}} \rho_{\text{в}} (i_{\text{в}} - i_{\text{п}}).$$

Тогда при известных теплопритоках в помещение определим конечную энтальпию воздуха в помещении:

$$i_{\text{в}} = \frac{Q}{L_{\text{пр}} \rho_{\text{в}}} + i_{\text{п}}.$$

Конечное влагосодержание воздуха определяем на основе выражения

$$W = \rho_{\text{в}} L_{\text{пр}} (d_{\text{в}} - d_{\text{п}}).$$

Тогда получим

$$d_{\text{в}} = \frac{W}{L_{\text{пр}} \rho_{\text{в}}} + d_{\text{п}}$$

и окончательно сможет определить и температуру, и относительную влажность воздуха помещения.

### Методы решения

В результате получим замкнутую систему неявных нелинейных уравнений, которую можно решить численными методами, например, методом бисекции с заданной точностью [23].

На основе полученной имитационной математической модели может быть разработана компьютерная электронная модель [7] чистого помещения. Модель выполнена в компьютерной среде и представляет совокупность данных, хранящихся в базе данных, и программного кода, которая позволит создавать тонконастроенное ЧП и позволит моделировать и прогнозировать состояния ЧП с учетом реальной эксплуатации производственного цикла, а также сравнивать с разными состояниями существующих ЧП.

### Заключение

Результаты научно-исследовательской работы могут быть использованы при проектировании и эксплуатации чистых производственных помещений предприятий космической промышленности. На этапе проектирования производственных помещений достаточно точно определять характеристики ЧП за счет валидированной имитационной модели. При эксплуатации ЧП по назначению можно наблюдать его состояние в реальном времени, предсказывать его будущее состояние на основе климатических прогнозов в регионе нахождения промышленного объекта и при необходимости своевременно реагировать на изменения характеристик внутриклиматической среды.

Цифровой двойник АСОВКП чистых производственных помещений предприятий применим на предприятиях, реализующих цифровую трансформацию в рамках стратегии перехода к Индустрии 4.0. В настоящее время космической отрасли отводится ведущая роль в создании современной инновационной (цифровой) экономики, укреплении обороны и безопасности страны. Создаваемый научный и инновационный задел в отрасли технологий обеспечивает повышение конкурентоспособности многих отраслей промышленности. Космические системы отнесены к приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в РФ, а технологии создания новых поколений ракетно-космической техники – к критическим технологиям, перечень которых утвержден Президентом РФ.

Анализ тенденций научно-технологического развития индустриально развитых стран выявил перспективы развития спутниковых технологий. В передовых космических компаниях считают, что успешное создание АСОВКП ЧП с учетом протекающих технологических процессов и отдельных операций позволит обеспечить надежность и качество производства изделий космической техники.

### Библиографические ссылки

1. ГОСТ Р ИСО 14644-1-2017. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Ч. 1. Классификация чистоты воздуха по концентрации частиц. М. : Стандартинформ, 2017. 35 с.
2. Анализ системы фильтрации чистых помещений высокотехнологичных производств / В. А. Гаврилин, А. С. Рябышенков, Х. У. Тхеин, Т. Пью // Экологические системы и приборы. 2019. № 5. С. 44–48.
3. ГОСТ Р ИСО 14644-2-2020 Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Ч. 2. Текущий контроль для подтверждения постоянного соответствия чистоты воздуха по концентрации частиц. М. : Стандартинформ, 2020. 16 с.
4. Применение методологии энергоэкологического анализа для исследования системы удаления воздуха чистых помещений в микроэлектронике / М. А. Гундарцев, В. И. Каракеян, А. С. Рябышенков, В. П. Шараева // Известия вузов. Электроника. 2021. Т. 26, № 3–4. С. 328–332.
5. Бородкин А. А. Алгоритм выбора элементов системы поддержания давления в чистых помещениях // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2020. № 4. С. 50–55.
6. Калечиц В. И. Компьютерные системы контроля параметров чистых производственных помещений // Чистые помещения и технологические среды. 2003. № 4. С. 23–31.
7. ГОСТ Р 57700.37-2021 Цифровые двойники изделий. Общие положения. М. : Стандартинформ, 2021. 15 с.
8. ГОСТ Р 57188-2016 Численное моделирование физических процессов. Термины и определения. М. : Стандартинформ, 2016. 12 с.
9. ГОСТ Р ИСО 14644-4-2002 Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. М. : Госстандарт России, 2002. 40 с.
10. ГОСТ Р 54578-2011. Воздух рабочей зоны. М.: Стандартинформ, 2011
11. ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. М. : Стандартинформ, 2016. 16с.
12. ГОСТ 30494-2011 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. М. : Стандартинформ, 2013. 15 с.
13. СП 131.13330.2020 СНиП 23-01-99 Строительная климатологи. М. : Минстрой России, 2020. 153 с.
14. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. М. : Минстрой России, 2012. 100 с.
15. СНиП 41-01-2003 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Нормы проектирования. М. : Госстрой России, 2004. 60 с.
16. Кокорин О. Я. Современные системы кондиционирования воздуха. М. : Издательство физико-математической литературы. 2003. 272 с.
17. Баркалов Б. В., Карпис Е. Е. Кондиционирование воздуха в промышленных, общественных и промышленных зданиях. М. : Стройиздат, 1982. 312 с.
18. Голубков В. П., Романова Т. М., Гусев В. А. Проектирование и эксплуатация установок кондиционирования воздуха и отопления. М. : Энергоатомиздат, 1988. 192 с.
19. Явнель Б. К. Курсовой и дипломное проектирование холодильных установок и систем кондиционирования воздуха. М. : Агропромиздат, 1989. 222 с.
20. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика / В. А. Ананьев, Л. Н. Балужева, А. Д. Гальперин и др. Изд. 3-е. М. : Евроклимат, 2001. 416 с.

21. Щекин Р. В. Справочник по теплоснабжению и вентиляции. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Киев : Будшельник, 1976. 416 с.
22. Идельчик И. Е., Корневский С. М., Бем Г. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М. О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1992. 672 с.
23. Burden, Richard L., Faires, J. Douglas. The Bisection Algorithm, Numerical Analysis (3rd ed.) Boston, Mass. Publ., 1985, 624 p.

## References

1. GOST R ISO 14644-1-2017. *Chistye pomeshcheniya i svyazannye s nimi kontroliruemye sredy. Chast' 1. Klassifikatsiya chistoty vozdukha po kontsentratsii chastits* [State Standard R ISO 14644-1-2017 Clean rooms and associated controlled environments. Part 1. Classification of air purity by particle concentration.]. Moscow, Standartinform Publ., 2017, 35p.
2. Gavrilin V. A., Ryabyshnikov A.S., Tkhein Kh.U., P'o T. [Analysis of the filtration system of clean rooms of high-tech industries]. *Ecological systems and devices*. 2019, No 5, P. 44–48
3. GOST R ISO 14644-2-2020 *Chistye pomeshcheniya i svyazannye s nimi kontroliruemye sredy. Chast' 2. Tekushchiy kontrol' dlya podtverzhdeniya postoyannogo sootvetstviya chistoty vozdukha po kontsentratsii chastits* [State Standard R ISO 14644-2-2020 Clean rooms and associated controlled environments. Part 2. Ongoing monitoring to confirm the constant compliance of air purity by particle concentration], Moscow, Standartinform Publ., Standartinform, 2020. 16 p.
4. Gundartsev M. A., Karakeyan V. I., Ryabyshnikov A. S., Sharaeva V. P. [Application of the methodology of energy-ecological analysis for the study of the clean room air removal system in microelectronics]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy*. 2021, Vol. 26, No. 3–4, P. 328–332. (In Russ.).
5. Borodkin A. A. [Algorithm for selecting elements of a pressure maintenance system in clean rooms] *AVOK: Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika*. 2020, No. 4, P. 50–55. (In Russ.).
6. Kalechits V. I. [Computer systems for monitoring the parameters of clean industrial premises]. *Chistye pomeshcheniya i tekhnologicheskie sredy*. 2003, No. 4, P. 23–31 (In Russ.).
7. GOST R 57700.37-2021. *Tsifrovye dvoyniki izdeliy. Obshchie polozheniya* [State Standard R 57700.37-2021. Digital doubles of products. General provisions]. Moscow, Standartinform Publ., 2021. 15 p.
8. GOST R 57188-2016. *Chislennoe modelirovanie fizicheskikh protsessov. Terminy i opredeleniya* [State Standard R 57188-2016. Numerical modeling of physical processes. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 12 p.
9. GOST R ISO 14644-4-2002. *Chistye pomeshcheniya i svyazannye s nimi kontroliruemye sredy* [State Standard R ISO 14644-4-2002. Clean rooms and controlled environments associated with them]. Moscow, Standartinform Publ., 2002. 40 p.
10. GOST R 54578-2011. *Vozdukh rabochey zony* [State Standard R 54578-2011 Air of the working area]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 9 p.
11. GOST 12.0.003-2015. *Sistema standartov bezopasnosti truda (SSBT). Opasnye i vrednye proizvodstvennyye faktory*. [State Standard 12.0.003-2015 System of Occupational safety Standards (SSBT). Dangerous and harmful production factors]. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 16 p.
12. GOST 30494-2011. *Zdaniya zhilye i obshchestvennye. Parametry mikroklimata v pomeshcheniyakh*. [State Standard GOST 30494-2011. Residential and public buildings. Indoor microclimate parameters]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 15 p.
13. SP 131.13330.2020 SNiP 23-01-99 *Stroitel'naya klimatologi*. [Set of rules 131.13330.2020 Building codes and regulations 23-01-99. Construction climatologists]. Moscow, Ministry of Construction of Russia Publ., 2020. 153 p.
14. SP 50.13330.2012 *Teplovaya zashchita zdaniy* [Set of rules 50.13330.2012 Thermal protection of buildings]. Moscow, Ministry of Construction of Russia Publ., 2012. 100 p.
15. SNiP 41-01-2003 *Otoplenie, ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukha. Normy proektirovaniya* [Building codes and regulations 41-01-2003 Heating, ventilation and air conditioning. Design standards]. Moscow, Gosstroy of Russia, 2004. 60 p.

16. Kokorin O. Ya. *Sovremennye sistemy konditsionirovaniya vozdukha* [Modern air conditioning systems]. Moscow, Izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury Publ., 2003, 272 p.
17. Barkalov B. V., Karpis E. E. *Konditsionirovanie vozdukha v promyshlennykh, obshchestvennykh i promyshlennykh zdaniyakh* [Air conditioning in industrial, public and industrial buildings]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982. 312 p.
18. Golubkov V. P., Romanova T. M., Gusev V. A. *Proektirovanie i ekspluatatsiya ustanovok konditsionirovaniya vozdukha i otopleniya*. [Design and operation of air conditioning and heating installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988, 192 p.
19. Yavnel' B. K. *Kursovoy i diplomnoe proektirovanie kholodil'nykh ustanovok i sistem konditsionirovaniya vozdukha* [Course and diploma design of refrigeration units and air conditioning systems]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1989, 222 p.
20. Anan'ev V. A., Balueva L. N., Gal'perin A. D. *Sistemy ventilyatsii i konditsionirovaniya. Teoriya i praktika* [Ventilation and air conditioning systems. Theory and practice]. Moscow, Euroclimate, 2001. 416 p.
21. Shehekin R. V. *Spravochnik po teplosnabzheniyu i ventilyatsii. Ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukha (kniga 2)* [Handbook of heat supply and ventilation. Ventilation and air conditioning (book 2)], Kiev, Budshel'nik Publ., 1976, 416 p.
22. Idel'chik I. E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam. Pod red. M. O. Shteynberga. 3-e izd., pererab. i dop* [Handbook of hydraulic resistances. Edited by M. O. Steinberg. 3rd ed., reprint and additional]. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 1992, 672 p.
23. Burden, Richard L., Faires, J. Douglas. *The Bisection Algorithm, Numerical Analysis (3rd ed.)* Boston, Mass. Publ., 1985, 624 p.

© Жуйков Д. А., Назаров В. П., Лазеев М. Г.,  
Черненко В. В., Толстопятов М. И., 2023

---

**Жуйков Дмитрий Александрович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры двигателей летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: 89440d8f7e36@mail.ru.

**Назаров Владимир Павлович** – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой двигателей летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Dla@sibsau.ru.

**Лазеев Максим Геннадьевич** – главный инженер – заместитель генерального директора; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: lazeev.maxim@yandex.ru.

**Черненко Валентина Викторовна** – старший преподаватель кафедры двигателей летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: 2887722@mail.ru.

**Толстопятов Михаил Игоревич** – кандидат технических наук, доцент кафедры двигателей летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: 8913039999@mail.ru.

**Zhuykov Dmitry Aleksandrovich** – Cand. Sc., Associate professor of the Department of Aircraft Engines; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: 89440d8f7e36@mail.ru.

**Nazarov Vladimir Pavlovich** – Cand. Sc., Professor, Head of the Department of Aircraft Engines; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: Dla@sibsau.ru.

**Lazeev Maksim Gennadevich** – Chief Engineer – Deputy General Director; Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: lazeev.maxim@yandex.ru.

**Chernenko Valentina Viktorovna** – Lecturer of Department of Aircraft Engines; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: 2887722@mail.ru.

**Tolstopyatov Mikhail Igorevich** – Cand. Sc., Associate professor of the Department of Aircraft Engines; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: 8913039999@mail.ru.

---