DOI: 10.15593/2224-9982/2020.60.02

УДК 62-233.2: 621.3.07

Р.В. Мормуль¹, А.С. Голдобин², Д.А. Павлов³

¹ Пермский военный институт войск национальной гвардии, Пермь, Россия

² ПАО «Научно-производственное объединение «Искра»», Пермь, Россия

³ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

КОНЦЕПЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОСЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ В СОСТАВЕ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА «УРАЛ»

Предложена концепция применения композиционных материалов для оптимального проектирования осевого вентилятора системы охлаждения газотурбинной установки в составе газоперекачивающего агрегата «Урал».

ГПА серии «Урал» разработки ПАО «НПО «Искра»» предназначены для реконструкции действующих и оснащения вновь строящихся цехов компрессорных станций магистральных газопроводов, дожимных компрессорных станций, подземных хранилищ газа. ГПА в зависимости от мощности оснащены газотурбинными установками на базе авиационных или судовых двигателей. Типы и изготовители применяемых компрессоров определяются назначением агрегата и требуемыми характеристиками.

Слабым звеном конструкции ОВ является высокая чувствительность рабочего колеса к ударной осевой нагрузке и низкая технологичность его производства и ремонта. Таким образом, в исследуемой осевой высоконагруженной вентиляторной системе авторами статьи предложена технология изготовления лопаток рабочего колеса из металла и покрытия из КМ.

Конструктивное исполнение ОВ с коаксиальным расположением лопаток промышленного назначения имеет ряд своих особенностей. В спроектированной конструкции широко используются стеклопластики и цветные металлы, сплавы алюминия и бесщеточный электродвигатель с подшипниками качения. В разработанной конструкции ОВ лопатки его рабочего колеса могут быть ориентированы под различным углом атаки, формируя различный диапазон аэродинамических характеристик.

Проведена серия вычислительных экспериментов по определению аэродинамических и прочностных характеристик ОВ.

В соответствии с результатами численного моделирования и экспериментальной отработки на стенде подтверждена работоспособность конструкции ОВ.

Ключевые слова: осевой вентилятор, лопатка, рабочее колесо, направляющий аппарат, армированный композиционный материал, аэродинамика, прочность, ГТУ, ГПА, адгезия, численное моделирование.

R.V. Mormul¹, A.S. Goldobin², D.A. Pavlov³

¹ Perm Military Institute of National Guard Forces, Perm, Russian Federation

² PJSC "Research and Production Association "Iskra", Perm, Russian Federation

³ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

THE CONCEPT OF APPLICATION OF COMPOSITE MATERIALS FOR OPTIMUM DESIGN OF THE AXIAL FAN OF GTI COOLING SYSTEM IN THE COMPOSITION OF GPU "URAL"

The concept of the use of composite materials (CM) for the optimal design of an axial fan (AF) for the cooling system of a gas turbine installation (GTI) as part of the Ural gas pumping unit (GPU) is proposed.

GPU of the Ural series developed by PJSC "Research and production association "Iskra" are intended for the reconstruction of existing and equipping newly built workshops of compressor stations (CS) of gas pipelines, booster compressor stations (BCS), and underground gas storages (UGS). GPU depending on power are equipped with gas turbine units (GTU) based on aircraft or ship engines. The types and manufacturers of compressors used are determined by the purpose of the unit and the required characteristics.

A weak link in the design of the AF is the high sensitivity of the impeller to impact axial load and the low adaptability of its production and repair. Thus, in the studied axial high-load fan system, the authors proposed a technology for manufacturing impeller vanes from metal and coatings from CM.

The design of the AF with a coaxial arrangement of industrial blades has a number of its own characteristics. Fiberglass and non-ferrous metals, aluminum alloys and a brushless electric motor with rolling bearings are widely used in the designed

design. In the developed AF design, the blades of its impeller can be oriented at different angles of attack, forming a different range of aerodynamic characteristics.

A series of computational experiments was carried out to determine the aerodynamic and strength characteristics of the AF.

In accordance with the results of numerical modeling and experimental testing at the stand, the performance of the AF structure was confirmed.

Keywords: axial fan, blade, impeller, guiding apparatus, reinforced composite material, aerodynamics, strength, gas turbine engine, gas treatment unit, adhesion, numerical simulation.

Введение

В турбомеханике лопаточных машин широкое применение получили осевые вентиляторы (ОВ) [1–3], которые отличаются:

- по направлению вращения (влево и вправо);
- количеством и материалом изготовления лопаток;
- по величине создаваемого воздушного давления;
- эксплуатационным техническим характеристикам: производительности, частоте вращения, напряжению сети, КПД, потребляемой мощности, шумовым параметрам;
- условиям эксплуатации во взрывоопасных, высокотемпературных, пылевых, дымных и агрессивных средах, внешнего использования и для работы в помещениях;
- по способу установки: в каналы, на крышу, на опору, для многозональной разводки;
- по возможности и схемам регулирования скорости и защите двигателя;
- по параметрам энергосбережения.

Исследуемые ОВ состоят из РК, установленного на вал асинхронного трехфазного

электродвигателя ВА160М2БУХЛ1 с короткозамкнутым ротором.

Рабочее колесо (РК) содержит лопатки особой геометрии, расположенные под углом к направлению перемещаемого потока воздуха. Оно размещено внутри металлической обечайки (корпуса), что способствует увеличению количества перемещаемого воздуха.

Конструктивное исполнение осевого направляющего аппарата (НА) представляет собой переходную муфту в виде конфузора, внутри которого распложены поворотные лопатки. Величина угла поворота лопаток позволяет регулировать поток, формировать его начальное направление. Диаметр конфузора НА ограничивает параметры струи, исключая формирование дополнительных вихревых течений, и обеспечивает первоначальную закрутку потока. Таким образом, лопатки ОВ получают организованный воздушный объем, создающий существенно меньшее аэродинамическое сопротивление, увеличивая при этом коэффициент полезного действия (КПД) осевой лопаточной машины. Конструктивное исполнение исследуемого ОВ показано на рис. 1, его технические характеристики приведены в таблице.

Рис. 1. Конструктивное исполнение исследуемого ОВ

Технические характеристики ОВ

№ п/п	Параметр	Значение
1	Производительность, м ³ /ч	29 000–36 000
2	Номинальный диаметр РК, мм	800
3	Температура перемещаемой среды, °С	(–60)...(+60)
4	Полное давление, кПа	0,4–1,5
5	Номинальная частота вращения электродвигателя, об/мин	3000
6	Номинальная мощность электродвигателя, кВт	18,5

Проектируемый ОВ [1–3] должен отвечать следующим требованиям:

- взрывозащищенность;
- достаточная жесткость конструкции статорных элементов для снижения уровня корпусной вибрации;
- обеспечивать ресурсную прочность конструктивных элементов при заявленных аэродинамических нагрузках при исключении обрыва лопаток;
- возможность иметь оптимальный профиль лопаток РК, при этом уровень акустического шума не должен превышать 80 дБ.

Проектирование и производство ОВ полностью металлических конструктивных элементов сопровождается:

- высоким уровнем акустического шума (до 120 дБ);

– коррозией металла в агрессивных средах (рис. 2);

- большими габаритно-массовыми характеристиками;
- абразивным износом;
- обмерзанием лопаток (рис. 2).

Для решения вышеуказанных проблем авторами статьи для несущих деталей конструкции ОВ предложена концепция применения покрытия из композитных материалов (КМ).

Численное моделирование аэродинамических процессов в ОВ

Для решения задачи нелинейной аэродинамики ОВ [4, 5] использована замкнутая система уравнений Навье – Стокса:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{\partial \rho}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \rho + \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 - \text{уравнение неразрывности;} \\
 \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} + \vec{\nabla} p = \vec{\nabla} \cdot \tau - \text{уравнение импульса;} \\
 \rho \frac{\partial E}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) E + p \vec{\nabla} \cdot \vec{u} = \Phi - \vec{\nabla} \cdot \vec{q} - \text{закон сохранения внутренней энергии;} \\
 p = \rho R T, R = R^g / M - \text{уравнение состояния;} \\
 \tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \text{тензор вязких напряжений;} \\
 E = R T / (\gamma - 1) - \text{уравнение для внутренней энергии;} \\
 \Phi = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\mu}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right)^2 - \text{диссипативная функция;} \\
 \frac{\partial \vec{u}}{\partial n} \Big|_{\Omega} = 0, u(0, x) \Big|_{\Gamma_1} = u_0, p(0, x) \Big|_{\Gamma_1} = p_0, p(t, x) \Big|_{\Gamma_2} = p_1 - \text{граничные условия.}
 \end{array} \right. \quad (1)$$

Рис. 2. Дефекты металлоконструкции ОВ: а – коррозия; б – обледенение

В системе уравнений (1) введены обозначения: $\rho, P, T, E, \vec{u}, \vec{n}, \vec{q}, \mu, \gamma, R^g, Pr, \vec{\nabla}$ – плотность, давление, температура, внутренняя энергия, поле скорости, вектор нормали, тепловой поток, сдвиговая вязкость, показатель адиабаты, универсальная газовая постоянная, число Прандтля, оператор Гамильтона соответственно.

Замкнутая система уравнений (1) разрешается численно методом контрольных объемов [6].

Результаты вычислительного эксперимента по определению аэродинамических характеристик ОВ в пространстве полей течений приведены на рис. 3.

При вращении РК ОВ в межлопаточном пространстве генерируется вихревое течение, обусловленное наличием у воздушного потока тангенциальной и осевой компоненты скорости.

Максимальная скорость аэродинамического потока достигается на выходной кромке лопаток ОВ и составляет $\sim 32,5$ м/с.

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния элементов ОВ

Компоненты (проекции) вектора перемещений в цилиндрической системе координат для трехмерной задачи можно записать следующим образом:

$$\{u\}^T = \{u_r, u_\theta, u_z\}.$$

Геометрические соотношения, определяющие деформацию [7–9] деталей ОВ, запишем в виде

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\vec{\nabla}\vec{u} + \vec{\nabla}\vec{u}^T). \quad (2)$$

В уравнении (2) введены следующие обозначения: $\tilde{\sigma}, \tilde{\varepsilon}, \vec{\nabla}\vec{u}$ – тензор напряжений, деформаций и дисторсии; $\vec{\nabla}$ – оператор Гамильтона, $\vec{\nabla} = \vec{e}^i \frac{\partial}{\partial q^i}$.

Компоненты тензора деформаций и напряжений вычисляются следующим образом:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}; \\ \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r}; \\ \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}; \\ \varepsilon_{rz} = \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r}; \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)}((1-\mu)\varepsilon_r + \mu\varepsilon_\theta + \mu\varepsilon_z); \\ \sigma_\theta = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)}((1-\mu)\varepsilon_\theta + \mu\varepsilon_r + \mu\varepsilon_z); \\ \sigma_z = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)}((1-\mu)\varepsilon_z + \mu\varepsilon_r + \mu\varepsilon_\theta); \\ \sigma_{rz} = \frac{E}{2(1+\mu)}\varepsilon_{rz}. \end{cases} \quad (4)$$

В выражениях (3) и (4) введены следующие обозначения: E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z, \varepsilon_{rz}$ – радиальные, окружные, осевые и сдвиговые деформации; $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \sigma_{rz}$ – ради-

альные, окружные, осевые и касательные напряжения.

Механические упругие напряжения [7–9] и деформации связаны между собой соотношениями

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^m\}.$$

Свойство ортотропности КМ и свойство симметрии матрицы $[D]$ позволяют записать

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{E_r}{\nu} \left(1 - \mu_r^2 \frac{E_z}{E_\theta} \right) & \frac{E_r}{\nu} \mu_r (1 + \mu_r) & \frac{E_r}{\nu} \mu_r \left(1 + \mu_r \frac{E_z}{E_\theta} \right) & 0 \\ \frac{E_r}{\nu} \mu_r (1 + \mu_r) & \frac{E_\theta}{\nu} \left(1 - \mu_\theta^2 \frac{E_r}{E_z} \right) & \frac{E_r}{\nu} \mu_z \left(1 + \mu_z \frac{E_z}{E_\theta} \right) & 0 \\ \frac{E_r}{\nu} \mu_r \left(1 + \mu_r \frac{E_z}{E_\theta} \right) & \frac{E_r}{\nu} \mu_r \left(1 + \mu_r \frac{E_r}{E_z} \right) & \frac{E_z}{\nu} \left(1 - \mu_z^2 \frac{E_r}{E_\theta} \right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{rz} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Рис. 3. Карта распределения аэродинамических характеристик ОВ:
а – поля скорости, м/с; б – давления, кПа; в – величины полного давления, кПа, и потребляемой мощности, Вт, от производительности, м³/ч, и циклической частоты вращения, об/мин

В матрице (5): $E_r = E_\theta = E_z$, $\mu_r = \mu_\theta = \mu_z$ – модули упругости и коэффициенты Пуассона в радиальном, кольцевом и осевом направлениях соответственно; G_{rz} – модуль сдвига,

$$v = 1 - \mu_r^2 \left(\frac{E_r}{E_z} + \frac{E_z}{E_\theta} \right) - \mu_r^2 \frac{E_r}{E_\theta} (1 + 2\mu_r).$$

Конечно-элементная аппроксимация

Топология каждой ячейки конечно-элементной сетки (рис. 4) фиксирована и является одним из свойств, определяющих тип конечного элемента [10].

Для отдельного конечного элемента выстраивается выражение функционала энергии как функции перемещения узлов несущих деталей конструкции ОВ, принадлежащих только этому конечному элементу [10].

Перемещение в любой точке внутри элемента $\{u\}$ определено с помощью узловых перемещений $\{q\}$ и функций формы N_i :

$$\{u\} = [N]\{q\},$$

где

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & \dots \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & \dots \end{bmatrix}.$$

Деформации конструкционных материалов ОВ выражаются через узловые перемещения формулой

$$\{\varepsilon\} = [\tilde{B}]\{q\}, \quad (6)$$

где

$$[\tilde{B}] = [B][N]. \quad (7)$$

Матрица $[\tilde{B}]$ получена дифференцированием по пространственным координатам функции формы:

$$[\tilde{B}_i] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{r} \frac{\partial N_i}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial N_i}{\partial \theta} & \frac{\partial N_i}{\partial r} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{1}{r} \frac{\partial N_i}{\partial \theta} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial r} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Кинематические и силовые граничные условия запишутся в виде

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \bar{U}, \bar{x} \in \Gamma_U; \\ \bar{n}\bar{\sigma}|_{\Gamma_F} &= \bar{F}. \end{aligned} \quad (9)$$

В результате формируется результирующая система алгебраических уравнений

$$[K]\{U\} = \{R\}. \quad (10)$$

Численная реализация решения (6)–(10) МКЭ получена в пакете прикладных программ ANSYS Work Bench 17.2.

Результаты вычислительного эксперимента

На рис. 5 представлена карта распределения интенсивности эквивалентных напряжений в элементах конструкции РК ОВ при действии инерционной центробежной силы, генерируемой частотой вращения его лопаток 3000 об/мин (~ 314 рад/с).

Анализ результатов численного моделирования напряженно-деформированного состояния элементов ОВ показал, что максимальная интенсивность эквивалентных напряжений при исключении локального концентратора напряжений реализуется в районе входной кромки и в корневом сечении лопаток, изготовленных из сплава АМг6, и составляет 52 МПа.

Коэффициент запаса прочности элементов конструкции определен по действующей интенсивности эквивалентных напряжений:

$$\eta_{\min} = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\max}^{i\text{-eqv}}} > 5,$$

где σ_B – предел прочности сплава АМг6, $\sigma_B = 315$ МПа; $\sigma_{\max}^{i\text{-eqv}}$ – максимальная интенсивность эквивалентных напряжений, $\sigma_{\max}^{i\text{-eqv}} = 52$ МПа.

В целях снижения массы конструкции лопаток РК и стоимости их изготовления, повышения запаса прочности авторами статьи предложена концепция применения покрытия из КМ [11–14].

Остов лопатки изготавливается из сплава АМг6. В нем посредством перфорации формируются отверстия, диаметр которых должен быть определен из условий обеспечения хорошей адгезионной прочности [15] системы металл–композиционное покрытие и ресурсной прочности ОВ.

а

б

Рис. 4. Конечно-элементная модель рабочего колеса ОВ:
а – металлоконструкция; б – с покрытием из КМ

Рис. 5. Распределение интенсивности эквивалентных напряжений, МПа, в несущих деталях конструкции ОВ

Увеличение площади контакта адгезива и субстрата [15] приводит к увеличению прочности адгезионного соединения.

В качестве технологии изготовления конструктивных элементов ОВ из КМ можно применить:

- метод прямого прессования на гидравлическом прессе;
- выкладку заготовки пропитанного наполнителя;
- аддитивные технологии (3D-печать);
- литье под давлением на термопластавтоматах.

На рис. 6, 7 представлена карта распределения параметров НДС в элементах конструкции РК ОВ с учетом покрытия из КМ.

Стендовая отработка конструкции ОВ системы охлаждения ГТУ в составе ГПА «Урал»

На рис. 8 представлен стенд для отработки ОВ системы охлаждения газотурбинной установки (ГТУ) в составе газоперекачивающего агрегата (ГПА) «Урал», изготовленная металлоконструкция ОВ – на рис. 9.

Рис. 6. Распределение интенсивности эквивалентных напряжений, МПа, в несущих деталях металлоконструкции ОВ

Рис. 7. Распределение параметров НДС в композиционном покрытии ПА СВ 30-1ЭТМ: а – осевых напряжений, МПа; б – сдвиговых деформаций

Рис. 8. Стенд для отработки ОВ системы охлаждения ГТУ в составе ГПА «Урал»

Рис. 9. Металлоконструкция ОВ системы охлаждения ГТУ в составе ГПА «Урал»

Результаты испытаний (пробные пуски) подтвердили работоспособность ОВ системы охлаждения ГТУ в составе ГПА «Урал».

Заключение

Разработан комплекс научно-технических решений для оптимального проектирования ОВ системы охлаждения ГТУ в составе ГПА «Урал» с использованием покрытий из

КМ. Численно и экспериментально подтверждена работоспособность металлоконструкции ОВ.

Разработанная авторами методика расчета является универсальной и позволяет оптимальным образом проектировать конструкции ОВ из других конструкционных материалов с точки зрения веса, аэродинамики и прочности.

Библиографический список

1. Попов Н.А. Разработка реверсивных осевых вентиляторов главного проветривания шахт: дис. ... д-ра техн. наук / ИГД СО РАН. – Новосибирск, 2001. – 282 с.
2. Козюрин С.В., Попов Н.А. Анализ частот и форм колебаний сдвоенных листовых лопаток рабочих колес осевых вентиляторов // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: тез. докл. междунар. науч.-практ. конф., г. Кемерово, 10–13 сентября 2002 г. – Кемерово, 2002. – С. 31–32.
3. Караджи С.В. Разработка системы измерения пульсаций давления на вращающемся колесе осевой лопаточной машины // Компрессорная техника и пневматика. – 2012. – № 1. – С. 26–29.

4. Емин О.Н., Карасев В.Н., Ржавин Ю.А. Выбор параметров и газодинамический расчет осевых компрессоров и турбин авиационных ГТД: учеб. пособие. – М.: Дипак, 2003. – 156 с.
5. Проектный термогазодинамический расчет основных параметров авиационных лопаточных машин / А.Н. Белоусов, Н.Ф. Мусаткин, В.М. Радко, В.С. Кузьмичев; Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Самара, 2006. – 316 с.
6. Волков К.Н. Применение метода контрольного объема для решения задач механики жидкости и газа на неструктурированных сетках // Вычислительные методы и программирование. – 2005. – Т. 6, вып. 1. – С. 43–60.
7. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. – М.: Наука, 1980. – 512 с.
8. Аннин Б.Д., Бытев В.О., Сенашов С.И. Групповые свойства уравнений упругости и пластичности. – Новосибирск: Наука СО, 1985. – 142 с.
9. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости: пер. с англ. / под ред. Г.С. Шапиро. – М.: Наука, 1979. – 560 с.
10. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / пер. с англ. А.А. Шестакова. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
11. Адашкин А.М. Материаловедение и технология металлических, неметаллических и композиционных материалов: учеб. пособие. – М.: Инфра-М: Форум, 2017. – 107 с.
12. Бакулин В.Н., Гусев Е.Л., Марков В.Г. Методы оптимального проектирования и расчета композиционных конструкций: в 2 т. Т. 1. Оптимальное проектирование конструкций из композиционных и традиционных материалов. – М.: Физматлит, 2008. – 256 с.
13. Ханин М.В., Зайцев Г.П. Изнашивание и разрушение полимерных композиционных материалов. – М.: Химия, 2016. – 256 с.
14. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / под ред. А.А. Берлина. – СПб.: Профессия, 2009. – 556 с.
15. Сумм Б.Д. Основы коллоидной химии. – М.: Академия, 2006. – 239 с.

References

1. Popov N.A. Razrabotka reversivnykh oseykh ventilyatorov glavnogo provetrivaniya shakht. [Working out of reversible axial fans of the main airing of mines]. Doctor's thesis, Novosibirsk, IGD SO RAN, 2001, 282 p.
2. Kozyurin S.V., Popov N.A. Analiz chastot i form kolebaniy sdvoyennykh listovykh lopatok rabochikh koles oseykh ventilyatorov [Analysis of frequencies and waveforms of twin leaf blades of axial fan impellers]. *Energeticheskaya bezopasnost Rossii. Novye podkhody k razvitiyu ugolnoi promyshlennosti* [Energy Safety of Russia. New Approaches to Development of Coal Industry.], International Scientific–Practical Conference Proceedings, Kemerovo, 2002, pp. 31–32.
3. Karaji K.B. Razrabotka sistemy izmereniya pulsatsiy davleniya na vrashchayushchikhsya kolesakh oseyoy lopatochnoy mashiny [Development of a system for measuring pressure pulsations on the rotating wheels of an axial blade machine]. *Kompressorная техника и пневматика*, 2012, no. 1, pp. 26–29.
4. Emin O.N., Karasev V.N., Rzhavin Yu.A. Vybory parametrov i gazodinamicheskiy raschet oseykh kompressorov i turbin aviatsionnykh GTD: uchebnoye posobiye. [The choice of parameters and gas-dynamic calculation of axial compressors and turbines of aircraft gas turbine engines: a training manual]. Moscow: Deepak, 2003, 156 p.
5. Belousov A.N., Musatkin N.F., Radko V.M., Kuzmichev V.S. Proyektnyy termogazodinamicheskiy raschet osnovnykh parametrov aviatsionnykh lopatochnykh mashin. [Design thermogasdynamic calculation of the main parameters of aircraft blade machines]. Samara: Samara state aerospace university, 2006, 316 p.
6. K.N. Volkov. Primeneniye metoda kontrol'nogo obyema dlya resheniya zadach mekhaniki zhidkosti i gaza na nestrukturirovannykh setkakh. [Application of the control volume method for solving problems of fluid and gas mechanics on unstructured grids]. Numerical methods and programming, 2005, vol. 6, Is. 1, pp. 43–60.
7. Lurie A.I. Nelineynaya teoriya uprugosti [Nonlinear theory of elasticity]. Moscow: Nauka, 1980, 512 p.
8. Annin B.D., Bytev V.O., Senashov S.I. Gruppovye svoystva uravneniy uprugosti i plastichnosti. [Group properties of the equations of elasticity and plasticity]. Novosibirsk: Nauka SO, 1985, 142 p.
9. Timoshenko S.P., Goodier J.N. Teoriya plastichnosti [Theory of Elasticity]. New York: McGraw-Hill, 1970, 506 p.

10. Segerlind L. J. *Primeneniye metoda konechnykh elementov [Applied Finite Element Analysis]*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1976. 427 p.
11. Adaskin A.M. *Materialovedeniye i tekhnologiya metallicheskih, nemetallicheskih i kompozitsionnykh materialov: Uchebnoye posobiye [Material Science and Technology of metallic, non-metallic, and composite materials: a training manual]*. Moscow.: Infra-M, Forum, 2017, 107 p.
12. V.N. Bakulin, E.L. Gusev, V.G. Markov. *Metody optimalnogo proyektirovaniya i rascheta kompozitsionnykh konstruksiy. Optimalnoye proyektirovaniye konstruksiy iz kompozitsionnykh i traditsionnykh materialov. [Methods of optimal design and calculation of composite structures. Volume 1. Optimal design of structures from composite and traditional materials]*. Moscow: FIZMATLIT, 2008, vol. 1, 256 p.
13. M.V. Khanin, G.P. Zaitsev. *Iznashivaniye i razrusheniye polimernykh kompozitsionnykh materialov. [Wear and destruction of polymer composite materials]*. Moscow: Khimiya, 2016, 256 p.
14. Berlin A.A. *Polimernyye kompozitsionnyye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya [Polymer composite materials: structure, properties, technology]*. St. Petersburg: Professiya, 2009, 556 p.
15. Summ B.D. *Osnovy kolloidnoy khimii. [The basics of colloid chemistry]*. Moscow: Akademiya, 2006, 239 p.

Об авторах

Мормуль Роман Викторович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети», Пермский военный институт войск национальной гвардии (614112, г. Пермь, ул. Гремячий Лог, д. 1, e-mail: rmormul@yandex.ru).

Голдобин Алексей Сергеевич (Пермь, Россия) – начальник бюро службы маркетинга ПАО «НПО «Искра»» (614038, г. Пермь, ул. Академика Веденеева, д. 28, e-mail: gas802@iskra.perm.ru).

Павлов Дмитрий Александрович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергосистемы» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: pal07@yandex.ru).

About the authors

Roman V. Mormul (Perm, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Associate Professor of Computing Machines, Complexes, Systems and Networks Department, Perm Military Institute of National Guard Forces (1, Gremyachiy Log st., Perm, 614112, Russian Federation, e-mail: rmormul@yandex.ru).

Alexey S. Goldobin (Perm, Russian Federation) – Head of Bureau of Marketing Service, PJSC “Research and Production Association “Iskra” (28, Akademika Vedeneyeva st., Perm, 614038, Russian Federation, e-mail: gas802@iskra.perm.ru).

Dmitry A. Pavlov (Perm, Russian Federation) – PhD Student of Rocket and Space Technology and Power Plants Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: pal07@yandex.ru).

Получено 25.12.2019