

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Анисимова И.В., Никифорова С.В. Численное моделирование одной задачи пограничного слоя на основе разностной схемы повышенного порядка.....</i>	3
<i>Попов И.А., Гортышов Ю.Ф., Степанова Ю.С., Попов И.А. Исследование теплообмена при кипении воды на сетчато-микроструктурированной горизонтальной поверхности в условиях свободной конвекции.....</i>	11

МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Баженов И.М., Лизунов А.А., Лизунов С.А., Маслов А.И. Совершенствование методов проектирования электромеханических систем поворота солнечных батарей</i>	21
<i>Габдрахманов А.Т., Шафигуллин Л.Н., Галиакбаров А.Т., Исрафилов И.Х., Гимазетдинова Ч.А. Разработка технологии SLM для получения новых сплавов на основе металлических порошковых композиций нержавеющей стали 316L и бронзы БрО10</i>	29
<i>Галимов Э.Р., Федяев В.Л., Шарафутдинова Э.Э., Галимова Н.Я., Ганиев М.М., Галимов Р.И. Технология получения и свойства теплопроводных углеродных пен</i>	34
<i>Бабушкин В.М., Гаямов Р.А., Мингалеев Г.Ф., Салимов Р.И. Разработка и апробация учебно-имитационной игры как инструмента формирования компетенций бережливого производства ...</i>	38
<i>Круглов Е.П., Шацилло Е.И., Галимов Э.Р., Беляев А.В., Сироткина Л.В. Исключение коробления лопаток турбины при их изготовлении</i>	43
<i>Лапин И.В. Анализ химического состава, структуры и свойств сталей газопроводных труб после длительной эксплуатации.....</i>	46
<i>Федяев В.Л., Беляев А.В., Федяев Р.В. Оптимизация работы складов предприятий промышленности, торговли</i>	51
<i>Шарафутдинова Э.Э. Обеспечение кадровой безопасности в организации машиностроительной отрасли</i>	56

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

<i>Астраханцев Ю.Г., Белоглазова Н.А., Иголкина Г.В. Особенности построения и применения феррозондовых инклинометров.....</i>	62
<i>Валитов Р.Р., Азов М.С., Чикрин Д.Е., Киселев С.К. Модели входных информативных сигналов, определение выходных параметров и особенности построения доплеровской системы измерения путевой скорости и угла сноса вертолета с одной приемопередающей антенной</i>	73
<i>Ехлаков Ф.В., Кривошеев С.В. Двухканальный датчик угловой скорости</i>	82
<i>Козлов В.К., Валиуллина Д.М., Сабитов А.Х., Минегалиев И.М. Информативность показателей пробивного напряжения и мутности для контроля технического состояния изоляции трансформаторного оборудования.....</i>	91
<i>Петухова Е.А. Роль межфазной поляризации и скин-эффекта в микроволновом экранировании полимерных композитов</i>	96
<i>Сустин А.И., Пудовкин А.П., Панасюк Ю.Н. Повышение точности дальномерного канала информационно-измерительной и управляющей системы с применением динамической весовой третичной обработки информации.....</i>	102

CONTENTS

PHYSICAL SCIENCE

<i>Anisimova I.V. and Nikiforova S.V. Numerical simulation of a single-problem boundary layer problem based on a higher-order difference scheme.....</i>	3
<i>Popov I.A., Gortyshov Yu.F., Stepanova Yu.S., and Popov I.A. Study of pool boiling heat transfer of water on a mesh-microstructured horizontal surface.....</i>	11

MECHANICAL ENGINEERING

<i>Bazhenov I.M., Lizunov A.A., Lizunov S.A., and Maslov A.I. Improving design methods for electromechanical solar panel rotation systems</i>	21
<i>Gabdakhmanov A.T., Shafigullin L.N., Galiakbarov A.T., Israfilov I.Kh., and Gimazetdinova Ch.A. Development of SLM technology for producing new alloys based on metal powder compositions of stainless steel 316L and bronze BrO10</i>	29
<i>Galimov E.R., Fedyayev V.L., Sharafutdinova E.E., Galimova N.Ya., Ganiev M.M., and Galimov R.I. Production technology and properties of thermally conductive carbon foam</i>	34
<i>Babushkin V.M., Galyamov R.A., Mingaleev G.F., and Salimov R.I. Development and testing of an educational simulation game as a tool for developing lean manufacturing competencies</i>	38
<i>Kruglov E.P., Shatsillo E.I., Galimov E.R., Belyaev A.V., and Sirotkina L.V. Elimination of turbine blade warping during their manufacturing</i>	43
<i>Lapin I.V. Analysis of chemical composition, structure and properties of gas pipes steels after long-term operation</i>	46
<i>Fedyayev V.L., Belyaev A.V., and Fedyayev R.V. Optimization of warehouse operation in industrial and trade enterprises</i>	51
<i>Sharafutdinova E.E. Ensuring human resources safety in the engineering industry</i>	56

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT MAKING AND COMMUNICATIONS

<i>Astrakhantsev Yu.G., Beloglazova N.A., and Igolkina G.V. Features of the construction and application of ferrosonde inclinometers</i>	62
<i>Valitov R.R., Azov M.S., Chikrin D.E., and Kiselyov S.K. Models of input information signals, determinations of output parameters and features of composition of Doppler system of measuring ground speed and drift angle of a helicopter with a single transmit/receive antenna.....</i>	73
<i>Ekhlav F.V. and Krivosheev S.V. Two-channel angular velocity sensor</i>	82
<i>Kozlov V.K., Valiullina D.M., Sabitov A.Kh., and Minegaliev I.M. Informativeness of breakdown voltage and turbidity indicators for monitoring the technical condition of transformer equipment insulation</i>	91
<i>Petukhova E.A. The role of interfacial polarization and skin effect in microwave shielding of polymer composites</i>	96
<i>Sustin A.I., Pudovkin A.P., and Panasyuk Yu.N. Improving the accuracy of the rangefinder channel of the information-measuring and control system with the use of dynamic weighting tertiary information processing</i>	102



УДК 536.8, 519.6

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОЙ ЗАДАЧИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ОСНОВЕ РАЗНОСТНОЙ СХЕМЫ ПОВЫШЕННОГО ПОРЯДКА

И.В. Анисимова, С.В. Никифорова

Рассмотрена математическая модель задачи обтекания цилиндрического тела сверхзвуковым потоком газа в области пограничного слоя. Классические разностные схемы недостаточно точно описывают краевую дифференциальную задачу ввиду того, что ее решения допускают области больших градиентов. В связи с этим на трехточечном шаблоне была построена и обоснована разностная схема повышенного порядка, обеспечивающая адекватный учет аппроксимационной вязкости, соизмеримой с величиной шага сетки. Выполнен численный эксперимент, который позволил оценить эффективность схемы повышенного порядка.

Ключевые слова: пограничный слой, разностная схема, аппроксимационная вязкость, оценка погрешности.

Введение

В связи с разработкой различных технических устройств авиамоторостроения, использующих в качестве рабочего тела жидкость или газ, а также оптимизацией режимов их работы возникает необходимость численного моделирования движения этой среды в соответствующих условиях. Несмотря на то что число публикаций, связанных с вопросами численного моделирования задач аэрогидродинамики, очень велико [1–4], тем не менее остается достаточно много нерешенных проблем. В частности, одной из основных задач является сокращение времени и объемов необходимых вычислений на ЭВМ, что может быть достигнуто как за счет повышения быстродействия и возможностей вычислительной техники, так и за счет увеличения эффективности методов, используемых при численном моделировании.

В данной работе был описан, обоснован и применен конечноразностный метод численного моделирования течений пограничного слоя на непроницаемом цилиндрическом теле.

Была модифицирована математическая модель ламинарного пограничного слоя на непроницаемом цилиндрическом теле при обтекании его совершенным газом под нулевым углом атаки. Модель изначально представляла собой начально-краевую задачу с дифференциальными уравнениями в частных производных. С использованием перехода к переменным Дородницына [5, 6] была упрощена структура исходных уравнений и появилась возможность применения методов группового анализа за счет выявления симметрий модели. Следующим шагом после приведения системы к безразмерной форме было построение обобщенного инфинитезимального оператора, включающего производные по всем независимым и зависимым переменным. Это позволило определить класс преобразований, сохраняющих структуру уравнений. Поиск таких преобразований задачи сводится к решению системы определяющих уравнений, связывающих компоненты оператора. Дальнейший анализ проводился для упрощенного случая, соответствующего физически обоснованным допущениям: число Прандтля полагалось равным единице, функция, описывающая изменение вязкости, принималась постоянной, а температура стенки задавалась фиксированным значением. При этих допущениях система уравнений существенно упрощалась: коэффициенты становятся постоянными, что сделало модель более удобной для дальнейшей редукции. Один из найденных операторов симметрии использовался для выделения инвариантной переменной, что позволило перейти от системы в частных производных к эквивалентной фактор-системе обыкновенных дифференциальных уравнений, зависящих только от одного аргумента. Затем математическая модель была модифицирована с целью отображения бесконечной расчетной области с пограничным слоем в ко-

нечный сегмент. В итоге модифицированная математическая модель представляла собой начально-краевую дифференциальную задачу, содержащую систему нелинейных дифференциальных уравнений первого и второго порядка с малым параметром при старшей производной. Как правило, в области определения решения у таких уравнений существуют подобласти вблизи стенки с большими градиентами. В связи с этим вопрос построения монотонных разностных схем для численного решения уравнений Навье – Стокса, позволяющих корректно проводить расчеты, является одной из важных проблем вычислительной гидродинамики.

Для данной математической модели было сформировано уравнение с дифференциальным оператором, действующим в банаховом пространстве. В сеточной области для решения первого и второго уравнений был применен метод линеаризации Пикара, а затем была построена схема повышенного порядка на трехточечном шаблоне, имеющая погрешность аппроксимации порядка $O(h^4)$ в классе достаточно гладких решений. Для третьего уравнения составлена разностная схема методом Рунге – Кутты с порядком аппроксимации $O(h^4)$ в общем виде на решении. Было выполнено обоснование условий монотонности и устойчивости схемы на решении задачи.

Был описан алгоритм решения разностной задачи методом прогонки и методом Рунге – Кутты. Итерационный процесс был выполнен с использованием контроля сходимости по итерационным параметрам по нелинейности и невязке. Были представлены сравнения расчетов, полученных с использованием схемы повышенного порядка и классической разностной схемы для анализа эффективности.

Модификация математической модели

Уравнения ламинарного пограничного слоя на непроницаемом цилиндрическом теле при обтекании его совершенным газом под нулевым углом атаки возьмем в виде [7–9]

$$\begin{cases} \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{dp}{dx} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right); \\ \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) = 0; \\ \rho \left(u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \frac{1}{Pr} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \left(1 - \frac{1}{Pr} \right) \frac{\partial u}{\partial y} \left(\mu u \frac{\partial u}{\partial y} \right). \end{cases} \quad (1)$$

К системе (1) добавляются граничные условия из работ [7–9]:

$$\begin{aligned} u = 0, v = 0, H = H_w(x) &\text{ при } y = 0, x > 0; \\ u \rightarrow U_e(x), H \rightarrow H_e &\text{ при } y \rightarrow \infty; \\ u = U_e(0), H = H_e &\text{ при } x = 0, y > 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Задача (1) – (2) представляет собой начально-краевую задачу с дифференциальными уравнениями в частных производных на бесконечной области, в которой использованы следующие обозначения: ось x направлена вдоль контура тела, ось y перпендикулярна оси x по направлению внешней нормали; u, v – проекции вектора скорости на координатные оси; p – давление; $p = \rho R T$, где ρ – плотность, R – газовая постоянная, T – температура газа; $H = C_p T + \frac{u^2}{2}$ – полная энталпия, где C_p – теплоемкость при постоянном давлении; Pr – число Прандтля; $\mu = \mu_{e0} \tau b(\tau)$, где μ – вязкость газа, $b(\tau)$ – известная функция безразмерной температуры $\tau = T/T_{e0}$; $H_w(x) = C_p T_w(x)$, где T_w – заданная температура наружной стороны обшивки (допускается, что она равна температуре пристеночного слоя газа); индекс « e » соответствует параметрам газа на внешней границе пограничного слоя, индекс « 0 » – в точке полного торможения потока, индекс « w » – параметрам газа на стенке.

В работе [5] с использованием перехода к переменным Дородницина задача (1) – (2) была приведена к форме, позволяющей учитывать влияние изменений температуры и плотности в направлении, перпендикулярном стенке области. Это преобразование осуществлялось заменой пространственных координат на обобщенные переменные, зависящие от безразмерной температуры и параметров внешнего потока. Далее вводились новые безразмерные переменные и функции, в частности обобщенные координаты и соответствующие компоненты скорости и функции тока [5, 10]. Такая замена упростила структуру исходных уравнений и сделала возможным применение методов группового анализа за счет выявления симметрий модели.

На следующем шаге, после приведения системы к безразмерной форме, был построен обобщенный инфинитезимальный оператор, включающий производные по всем независимым и зависимым переменным. Это позволило определить класс преобразований, сохраняющих структуру уравнений [11]. После сделанных преобразований исходная задача свелась к решению системы определяющих уравнений, связывающих компоненты оператора. Частное решение этой системы позволило выявить конкретные законы симметрии, характерные для рассматриваемой модели.

Дальнейший анализ проводился для упрощенного случая, соответствующего физически обоснованным допущениям: число Прандтля полагалось равным единице, функция, описывающая изменение вязкости, принималась постоянной, а температура стенки задавалась фиксированным значением. При этих допущениях система уравнений существенно упростилась: коэффициенты стали постоянными, что сделало модель более удобной для дальнейшей редукции. Один из найденных операторов симметрии использовался для выделения инвариантной переменной, что позволило перейти от системы в частных производных к эквивалентной фактор-системе обыкновенных дифференциальных уравнений, зависящих только от одного аргумента [6]:

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{2} \xi I_1 - I_3 \right) \frac{dI_1}{d\xi} + \frac{d^2 I_1}{d\xi^2} + C^* \left(1 - I_2 - I_1^2 \right) = 0; \\ \frac{1}{2} \xi \frac{dI_1}{d\xi} - \frac{dI_3}{d\xi} = 0; \\ \left(\frac{1}{2} \xi I_1 - I_3 \right) \frac{dI_2}{d\xi} + \frac{d^2 I_2}{d\xi^2} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Границные условия примут следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{при } \xi = 0: \quad I_1 = 0, \quad I_3 = 0, \quad I_2 = 1 - \tau_w; \\ \text{при } \xi \rightarrow \infty: \quad I_1 \rightarrow 1, \quad I_2 \rightarrow 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь: C^* , τ_w – произвольные постоянные.

Система (3) – (4) представляет собой начально-краевую дифференциальную задачу, содержащую систему нелинейных дифференциальных уравнений первого и второго порядка с малым параметром при производной, который может принимать значения, соизмеримые с шагом сетки. При применении к таким дифференциальным задачам классических разностных схем в случае равномерной сетки возникают неприемлемые погрешности ввиду того, что возникает аппроксимационная (схемная) вязкость. Для численного решения данной дифференциальной задачи пограничного слоя на равномерной сетке построим схему повышенного порядка аппроксимации [12–16]. Порядок аппроксимации на трехточечном шаблоне будет увеличен до четвертого за счет первого дифференциального приближения и введения регуляризатора.

Модифицируем математическую модель (3) – (4) с целью отображения бесконечной расчетной области с пограничным слоем $\xi \in [0; \infty)$ в конечную $z \in [0; 1]$ с помощью замены переменной [15]:

$$z = \frac{\xi}{1 + \xi}, \quad (5)$$

откуда

$$\xi = \frac{z}{1 - z}. \quad (6)$$

С учетом преобразований система (3) примет следующий вид:

$$\begin{cases} (1-z)^4 \frac{d^2 I_1}{dz^2} + \left[\left(\frac{1}{2} \xi(z) I_1 - I_3 \right) (1-z)^2 - 2(1-z)^3 \right] \frac{dI_1}{dz} + C^* (1 - I_2 - I_1^2) = 0; \\ (1-z)^2 \frac{dI_3}{dz} = \frac{1}{2} \xi(z) (1-z)^2 \frac{dI_1}{dz}; \\ (1-z)^4 \frac{d^2 I_2}{dz^2} + \left[\left(\frac{1}{2} \xi(z) I_1 - I_3 \right) (1-z)^2 - 2(1-z)^3 \right] \frac{dI_2}{dz} = 0, \end{cases} \quad (7)$$

где $\xi(z) = \frac{z}{1-z}$.

После упрощения система (7) примет окончательный вид:

$$\begin{cases} (1-z)^4 \frac{d^2 I_1}{dz^2} + \left[\left(\frac{z}{2(1-z)} I_1 - I_3 \right) (1-z)^2 - 2(1-z)^3 \right] \frac{dI_1}{dz} + C^* (1 - I_2 - I_1^2) = 0; \\ (1-z)^4 \frac{d^2 I_2}{dz^2} + \left[\left(\frac{z}{2(1-z)} I_1 - I_3 \right) (1-z)^2 - 2(1-z)^3 \right] \frac{dI_2}{dz} = 0; \\ \frac{dI_3}{dz} = \frac{z}{2(1-z)} \frac{dI_1}{dz}. \end{cases} \quad (8)$$

При замене (5) – (6) граничные условия (4) преобразуются следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{при } \xi = 0 \Rightarrow z = 0 : I_1 = 0, I_3 = 0, I_2 = 1 - \tau_w; \\ \text{при } \xi \rightarrow \infty \Rightarrow z \rightarrow 1 : I_1 \rightarrow 1, I_2 \rightarrow 0. \end{aligned} \quad (9)$$

В системе (8) – (9) первое уравнение описывает продольную составляющую скорости, второе уравнение – распределение температуры, третье уравнение определяет поперечную составляющую скорости. Система (8) – (9) представляет собой начально-краевую дифференциальную задачу, содержащую систему нелинейных дифференциальных уравнений первого и второго порядка с малым параметром при старшей производной. Построим разностную задачу на основе схемы повышенного порядка.

Разностная задача на основе схемы повышенного порядка

Сформируем дифференциальную задачу в операторном виде:

$$LI = f, \quad (10)$$

где $I = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix}$ – вектор-функция; L – заданный дифференциальный оператор, действующий в банаховом

пространстве:

$$LI = \begin{cases} (1-z)^4 \frac{d^2 I_1}{dz^2} + \left[\left(\frac{z}{2(1-z)} I_1 - I_3 \right) (1-z)^2 - 2(1-z)^3 \right] \frac{dI_1}{dz} + C^* (1 - I_2 - I_1^2), & 0 \leq z \leq 1; \\ (1-z)^4 \frac{d^2 I_2}{dz^2} + \left[\left(\frac{z}{2(1-z)} I_1 - I_3 \right) (1-z)^2 - 2(1-z)^3 \right] \frac{dI_2}{dz}, & 0 \leq z \leq 1; \\ \frac{dI_3}{dz} - \frac{z}{2(1-z)} \frac{dI_1}{dz}; \\ I_1(0); \\ I_2(0); \\ I_1(1); \\ I_2(1); \\ I_3(0); \end{cases} \quad (11)$$

$$f = \begin{cases} 0; \\ 0; \\ 0; \\ 0; \\ 1 - \tau_w; \\ 1; \\ 0; \\ 0. \end{cases} \quad (11)$$

Отметим, что первое и второе дифференциальные уравнения системы (10) относятся к классу уравнений с малым параметром при старшей производной: $\varepsilon = (1-z)^4 \ll 1, (z \rightarrow 1)$. Для нахождения численного решения краевой задачи (10) рассмотрим конечно-разностную схему повышенного порядка точности [17].

В сеточной области

$$\Omega_h = \left\{ z_n : z_n = z_{n-1} + h, n = 1, 2, \dots, N, z_0 = 0, z_N = 1, h = \frac{1}{N} \right\}$$

введем в рассмотрение разностные операторы первой и второй производных:

$$\lambda_x = \frac{I_{i+1} - I_i}{h}; \quad \lambda_{xx} = \frac{I_{i+1} - 2I_i + I_{i-1}}{h^2}.$$

Для численного решения первого и второго дифференциальных уравнений из системы (10) применим метод линеаризации Пикара [15, 18]:

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{d^2 I_1^{k+1}}{dz^2} + f_1(z, I_1^k) \frac{dI_1^{k+1}}{dz} + f_2(z, I_1^{k+1}) &= 0; \\ \varepsilon \frac{d^2 I_2^{k+1}}{dz^2} + f_1(z, I_1^k) \frac{dI_2^{k+1}}{dz} &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Опуская индекс k -й итерации по нелинейности, получим:

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{d^2 I_1}{dz^2} + f_1 \frac{dI_1}{dz} + f_2 &= 0; \\ \varepsilon \frac{d^2 I_2}{dz^2} + f_1 \frac{dI_2}{dz} &= 0, \end{aligned} \quad (13)$$

где $f_1 = \left(\frac{z}{2(1-z)} I_1^k - I_3 \right) (1-z)^2 - 2(1-z)^3$; $f_2 = C^* \left(1 - I_2 - (I_1^k)^2 \right)$ – известные функции. Заметим, что при таком способе линеаризации требуется задавать только начальную итерацию по нелинейности $I_1^0(z)$ и $I_2^0(z)$. После линеаризации система (11) будет выражаться следующим образом:

$$LI = f, \quad (14)$$

где

$$LI = \begin{cases} \varepsilon \frac{d^2 I_1}{dz^2} + f_1 \frac{dI_1}{dz} + f_2, & 0 \leq z \leq 1; \\ \varepsilon \frac{d^2 I_2}{dz^2} + f_1 \frac{dI_2}{dz}, & 0 \leq z \leq 1; \\ \frac{dI_3}{dz} - f_3; & \\ I_1(0); & \\ I_2(0); & \\ I_1(1); & \\ I_2(1); & \\ I_3(0). & \end{cases} \quad f = \begin{cases} 0; \\ 0; \\ 0; \\ 0; \\ 1 - \tau_w; \\ 1; \\ 0; \\ 0. \end{cases}$$

Здесь $f_3 = \frac{z}{2(1-z)} \frac{dI_1}{dz}$.

Первое и второе уравнения системы одинакового типа с малым параметром при старшей производной аппроксимируем схемой на трехточечном шаблоне, имеющей погрешность аппроксимации порядка $O(h^4)$ в классе достаточно гладких решений I_1 и I_2 [13–15], а для третьего уравнения составим разностную задачу схемой метода Рунге – Кутты с порядком аппроксимации $O(h^4)$ в общем виде на решении I_3 :

$$L_h I^h = f^h; \quad (15)$$

$$L_h I^h = \begin{cases} \varepsilon_i^* \lambda_{xx} I_{1_i} + f_{1_i} \lambda_x I_{1_i} + f_{2_i}, & i = 0, 1, \dots, N; \\ \varepsilon_i^* \lambda_{xx} I_{2_i} + f_{1_i} \lambda_x I_{2_i}; \\ \frac{I_{3_{i+1}} - I_{3_i}}{h} - G(z_i, f_{3_i}); \\ I_{1_0}; \\ I_{2_0}; \\ I_{1_N}; \\ I_{2_N}; \\ I_{3_0}. \end{cases} \quad f^h = \begin{cases} 0; \\ 0; \\ 0; \\ 0; \\ 1 - \tau_w; \\ 0; \\ 1; \\ 0. \end{cases}.$$

Здесь

$$\begin{aligned} \varepsilon_i^* &= \left(\varepsilon_i + \frac{f_{1_i}^2 h^2}{12 \varepsilon_i} \right); \quad \varepsilon_i = (1 - z_i)^4; \quad f_{1_i} = \left(\frac{z_i}{2(1 - z_i)} I_{1_i}^k - I_{3_i} \right) (1 - z_i)^2 - 2(1 - z_i)^3; \\ f_{2_i} &= C^* \left(1 - I_{2_i} - (I_{1_i}^k)^2 \right); \quad G(z_i, f_{3_i}) = \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4), \quad k_1 = f_3(z_i, I_{3_i}); \\ k_2 &= f_3 \left(z_i + \frac{h}{2}, I_{3_i} + \frac{k_1 h}{2} \right); \quad k_3 = f_3 \left(z_i + \frac{h}{2}, I_{3_i} + \frac{k_2 h}{2} \right); \quad k_4 = f_3 \left(z_i + h, I_{3_i} + k_3 h \right). \end{aligned}$$

В нашем случае разностная схема (15) монотонна при любом $\varepsilon > 0$ и устойчива, так как выполнены условия теорем 1, 2 из работы [13]: f_1 не меняет знака на сегменте и $\exists \delta > 0 : |f_1| + f_2 > \delta \quad \forall z \in \Omega^0$, где $\Omega^0 = [0, 1] / \Omega_h$. Следовательно, разностная схема не может быть плохо обусловленной.

Численный расчет задачи пограничного слоя

Для численного решения первого и второго уравнений разностной задачи (15) воспользуемся следующим двухпараметрическим итерационным процессом [15, 18]:

$$\begin{aligned} \frac{I_{1_i}^{k+1} - I_{1_i}^k}{t} &= \varepsilon_i^* \lambda_{xx} I_{1_i}^{k+1} + f_{1_i} \lambda_x I_{1_i}^{k+1} + f_{2_i}, \quad i = 0, 1, \dots, N; \\ \frac{I_{2_i}^{k+1} - I_{2_i}^k}{t} &= \varepsilon_i^* \lambda_{xx} I_{2_i}^{k+1} + f_{1_i} \lambda_x I_{2_i}^{k+1}; \\ I_{3_{i+1}}^{k+1} &= I_{3_i}^{k+1} + h G(z_i, f_{3_i}), \end{aligned} \quad (16)$$

где t – итерационный шаг по нелинейности.

Алгоритм реализации состоял из нескольких шагов.

1. По заданным значениям $I_1^0(z), I_2^0(z)$ в узлах сетки $i = \overline{1, N-1}$ методом прогонки вычислялись значения $I_1^1(z)$ и $I_2^1(z)$ ($i = 1, \dots, N-1$), причем матрицы системы разностных уравнений (16) имели диагональное преобладание.

2. С использованием метода Рунге – Кутты четвертого порядка для третьего уравнения вычислялись значения $I_3^i(z)$, $i = \overline{1, N}$.

3. Проводили итерации по нелинейности, последовательно выполняя шаги 1, 2 до условия $\|I_{1_i}^{k+1} - I_{1_i}^k\| \& \|I_{2_i}^{k+1} - I_{2_i}^k\| < \eta$, $i = \overline{0, N}$, $k = 1, 2, \dots$, где « k » – индекс итерации по нелинейности. Все итерации проводились с контролем невязки первого и второго уравнения системы (16).

4. Убедившись в сходимости итерации по нелинейности, полученные значения для $I_{1_i}^{k+1}$, $I_{2_i}^{k+1}$, $I_{3_i}^{k+1}$ на $(k+1)$ -м слое принимали за значения на k -м слое: $I_{1_i}^k = I_{1_i}^{k+1}$, $I_{2_i}^k = I_{2_i}^{k+1}$, $I_{3_i}^k = I_{3_i}^{k+1}$.

Численное решение реализовывалось в программной среде Wolfram Mathematica, данные $C^* = 0,5$; $\tau_w = 0,5$ были взяты из работы [6].

В таблице приведены расчетные данные скорости сходимости по итерациям и нормы невязки $\delta = \|b - A \cdot I^h\|_{R^n}$ решений схемой повышенного порядка и классической схемой.

t	η	h	Классическая схема		Схема повышенного порядка	
			k	δ	k	δ
10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10	$3,01457752 \cdot 10^{-14}$	2	$1,27105748 \cdot 10^{-13}$
10^{-3}	10^{-2}	10^{-2}	10	$3,60112705 \cdot 10^{-12}$	2	$3,82670638 \cdot 10^{-12}$

Здесь δ находилась как максимальное значение невязки численных решений для I_1 и I_2 ; t – итерационный шаг по нелинейности; η – точность; h – шаг сетки. На сетке с постоянным шагом схема повышенного порядка показывает более высокую скорость сходимости для заданной точности, чем классическая разностная схема.

Заключение

В данной работе была модифицирована математическая модель, описывающая ламинарный пограничный слой на непроницаемом цилиндрическом теле при обтекании его совершенным газом под нулевым углом атаки. Отображением бесконечной расчетной области с граничным слоем в конечный сегмент модель была выражена начально-краевой задачей с дифференциальным оператором, действующим в банаховом пространстве. Для линеаризации нелинейных дифференциальных уравнений модели на сечальной области был использован метод Пикара. Поскольку классические разностные схемы недостаточно точно описывают граничный слой в связи с тем, что решения таких уравнений допускают области больших градиентов порядка малого параметра, то для соответствующей математической модели на трехточечном шаблоне была построена схема повышенного порядка $O(h^4)$, которая хорошо учитывает аппроксимационную вязкость, соизмеримую с величиной шага сетки. Сравнительный анализ результатов показал, что на сетке с постоянным шагом схема повышенного порядка имеет более высокую скорость сходимости и точность по сравнению с классической разностной схемой. Таким образом, при численном моделировании задач пограничного слоя схема повышенного порядка оказывается предпочтительнее по причине того, что при небольших вычислительных затратах дает более точный результат.

Работа выполнена за счет предоставленного в 2024 г. Академией наук Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и прикладных научных работ в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаев С.А. и др. Гидродинамика и теплообмен в щелевых каналах с перспективными поверхностными интенсификаторами // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 4. С. 146–152.
2. Молчанов А.М. и др. Численное моделирование сверхзвуковых течений с неравновесными химическими реакциями // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2023. № 3. С. 3–11.

3. Луцик В.Г., Макарова М.С., Решмин А.И. Численное моделирование управления турбулентным потоком на входе в трубу с целью ламинаризации течения // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2023. № 1. С. 81–96.
4. Гайфуллин А.М., Щеглов А.С. Пристенные ламинарные закрученные струи // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2023. № 6. С. 67–74.
5. Дородницын А.А. Ламинарный пограничный слой в сжимаемом газе // Сб. теоретических работ по аэродинамике. М.: Оборонгиз, 1957. С. 140–173.
6. Никифорова С.В. О новых фактор-системах уравнений пограничного слоя при сверхзвуковых режимах течения // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2004. № 3. С. 65–67.
7. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. М.: Физматгиз, 1963. Ч. 2. 728 с.
8. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1979. 847 с.
9. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 711 с.
10. Лю-Шень-Цюань. Расчет ламинарного пограничного слоя в сжимаемом газе при наличии отсоса или вдува // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1962. № 5. С. 868–883.
11. Ибрагимов Н.Х. Азбука группового анализа. кибернетика. М.: Знание, 1989. 48 с.
12. Ильин А.М. Разностная схема для дифференциального уравнения с малым параметром при старшей производной // Математические заметки. 1969. № 2. С. 237–248.
13. Задорин А.И., Игнатьев В.И. О численном решении уравнения с малым параметром при старшей производной // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1983. № 3. С. 620–628.
14. Тушева Л.А., Шокин Ю.И., Яненко Н.Н. О построении разностных схем повышенного порядка аппроксимации на основе дифференциальных приближений // Некоторые проблемы вычислительной и прикладной математики: Сб. Новосибирск: Наука, 1975. 312 с.
15. Игнатьева И.В. О некоторых численных алгоритмах решения приближенных и полных уравнений Навье – Стокса: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Чебоксары, 1998. 20 с.
16. Игнатьев В.Н. О схеме повышенного порядка аппроксимации для расчета уравнений турбулентного пограничного слоя // Численные методы механики сплошной среды. 1972. № 2. С. 52.
17. Анисимова И.В., Игнатьев В.Н. Разностные схемы повышенного порядка в задачах тепломассо-переноса // Химическая физика и мезоскопия. 2023. № 3. С. 303–309.
18. Ковеня В.М., Яненко Н.Н. Метод расщепления в задачах газовой динамики. Новосибирск: Наука, 1983. 319 с.

Поступила в редакцию 20.09.25

NUMERICAL SIMULATION OF A SINGLE-PROBLEM BOUNDARY LAYER PROBLEM BASED ON A HIGHER-ORDER DIFFERENCE SCHEME

I.V. Anisimova and S.V. Nikiforova

A mathematical model of the problem of a cylindrical body flow by a supersonic gas flow in the boundary layer area is considered. Classical difference schemes do not accurately describe the boundary differential problem due to the fact that its solutions allow for the areas of large gradients. In this regard, a higher-order difference scheme was constructed and justified on a three-point pattern, which provides an adequate account of the approximation viscosity, commensurable with the value of the grid step. A numerical experiment was performed, which allowed to evaluate the effectiveness of the higher-order scheme.

Keywords: boundary layer, difference scheme, approximation viscosity, error estimate.

Анисимова Ирина Викторовна – д-р физ.-мат. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: anisimovaiv1@rambler.ru

Никифорова Светлана Витальевна – канд. физ.-мат. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: svetlana1605@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ВОДЫ НА СЕТЧАТО-МИКРОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УСЛОВИЯХ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

И.А. Попов, Ю.Ф. Гортышов, Ю.С. Степанова, И.А. Попов

Представлены результаты экспериментального исследования процесса кипения воды на горизонтальной сетчато-микроструктурированной поверхности в условиях свободной конвекции. Получены сведения о механизмах развития кипения и коэффициентах теплоотдачи. Результаты сопоставлены с результатами экспериментальных исследований других типов микроструктурированных поверхностей.

Ключевые слова: кипение, теплоотдача, критический тепловой поток, интенсификация, сетчато-микроструктурированная поверхность.

Методами деформирующего резания возможно получение поверхностей для интенсификации теплоотдачи при кипении жидкостей в условиях свободной конвекции. Интенсификация теплоотдачи обеспечивается микроструктуризацией поверхности за счет механической обработки, заключающейся в подрезке поверхностного слоя и его отгиба. Возможно получение и использование микроструктурированных поверхностей кипения с двухмерным рельефом (микроребра), трехмерным рельефом (микроштырьки) и подповерхностными каналами (загнутые по вершинам микроребра) [1]. Метод позволяет создавать рельефы с размерами 30–600 мкм. Интенсификация теплоотдачи на микроструктурированных поверхностях достигается за счет увеличения устойчивых центров парообразования, изменения смачиваемости поверхности, развития поверхности теплообмена.

В работе рассматривается новый тип поверхности, полученной методом деформирующего резания – сетчато-микроструктурированная поверхность. Данные сетчато-микроструктурированные поверхности могут использоваться для интенсификации парообразования в технологическом оборудовании. Ранее в работах [2–5] было показано, что на подобных поверхностях интенсификация теплоотдачи увеличивалась в 2–6 раз в зависимости от типа и размеров элементов микроструктурированных поверхностей.

Поверхность сформирована обработкой начальной гладкой поверхности методом деформирующего резания с одной стороны поверхности в одном направлении с получением двухмерного рельефа (микроребер), а затем обработкой данным методом противоположной стороны во взаимно перпендикулярном направлении также с получением двухмерного рельефа (микроребер) (рис. 1, *а*). Выбор глубины подрезания таким образом, чтобы по основанию ребер поверхность прорезалась насквозь с образованием в основании элементов рельефа (микроребер) сквозных отверстий прямоугольного сечения.

Основные параметры исследованных сетчато-микроструктурированных поверхностей представлены на рис. 1, *б* и в таблице. Всего было изготовлено шесть рабочих поверхностей из трех образцов сетчато-микроструктурированных пластин. Размер поверхности нагрева образцов пластин: длина – 110 мм, ширина – 10 мм.

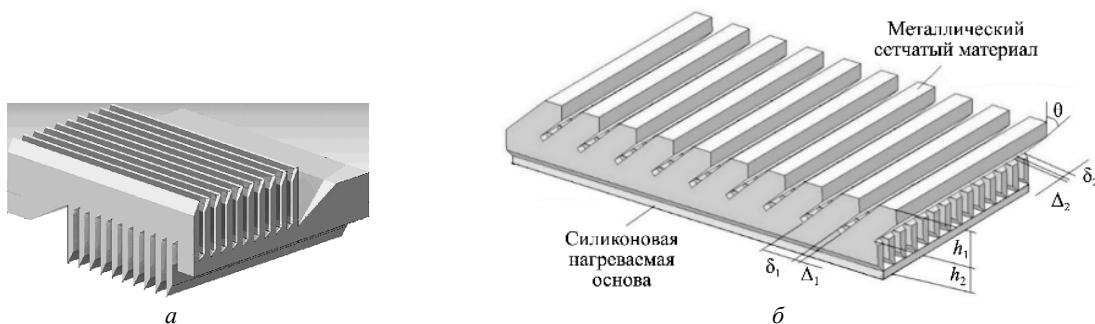


Рис. 1. Схема (*а*) и основные параметры (*б*) сетчато-микроструктурированных поверхностей и отдельных ячеек (*в*), полученных методом деформирующего резания (Начало)

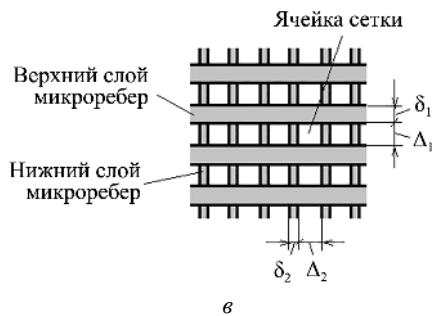


Рис. 1. Схема (а) и основные параметры (б) сетчато-микроструктурированных поверхностей и отдельных ячеек (в), полученных методом деформирующего резания (Окончание)

Номер образца	Материал	h_1 , мкм	h_2 , мкм	Δ_1 , мкм	Δ_2 , мкм	δ_1 , мкм	δ_2 , мкм	θ , град
1	BT1-0	250	80	60	20	70	30	90
2	BT1-0	80	250	20	60	30	70	83
3	BT1-0	250	80	60	20	70	30	90
4	BT1-0	80	250	20	60	30	70	83
5	BT1-0	200	100	50	30	80	50	83
6	BT1-0	100	200	30	50	80	50	90

На рис. 2 показаны элементы рельефа сетчато-микроструктурированных поверхностей (пластины) № 1–4, на рис. 3 – сетчато-микроструктурированных поверхностей № 5, 6. Для пластин № 1–4 размер ячеек сетки в основании ребер 20×60 мкм, а для пластин № 5, 6 – 30×50 мкм.

Сетчато-микроструктурированные пластины располагались без зазора на силиконовом основании, которое наносилось на теплоизолированную текстолитовую поверхность.

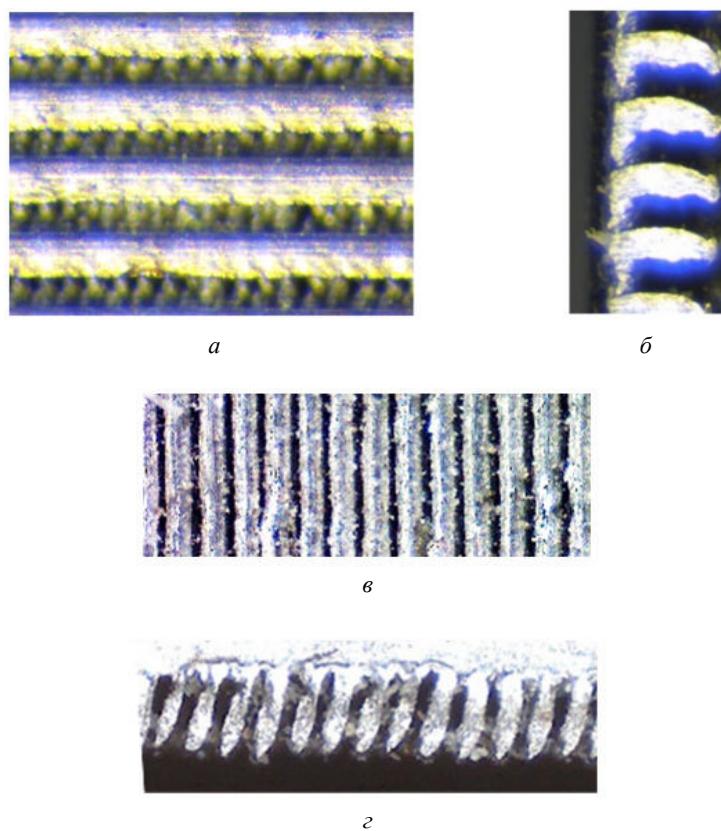


Рис. 2. Вид сверху (а), вид поперечного шлифа верхних рельефов (б), вид снизу (в) и вид поперечного шлифа нижних рельефов (г) сетчато-микроструктурированных поверхностей (пластины) № 1–4

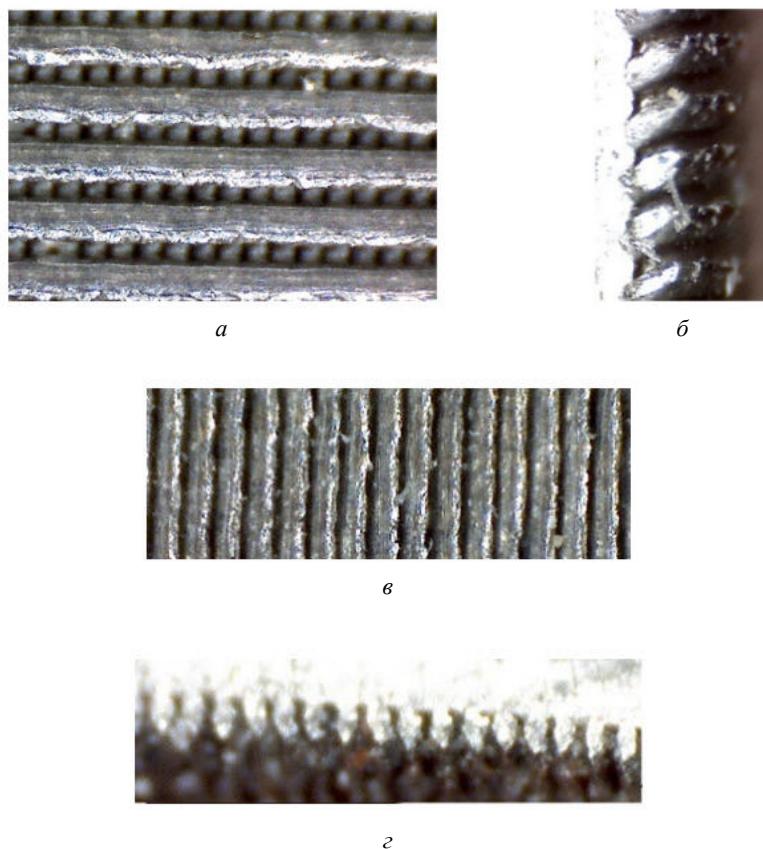


Рис. 3. Вид сверху (a), вид поперечного шлифа верхних рельефов (б), вид снизу (в) и вид поперечного шлифа нижних рельефов (г) сетчато-микроструктурированных поверхностей (пластины) № 5, 6

Исследование кипения в условиях свободной конвекции при атмосферном давлении проведено в кипятильной камере и с использованием методологии, описанной в работах [2–6]. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. При определении коэффициентов теплоотдачи не учитывалось увеличение поверхности кипения за счет микроструктуризации поверхности. Жидкость в кипятильной камере находилась при температуре насыщения. Температура поверхности кипения принималась по измерениям в среднем сечении по длине и в основании элементов рельефов на пластинах, обращенных верх. Из-за изменения температуры поверхности в ходе эксперимента за счет образования, развития, отрыва и подтока новой порции воды к центру парообразования (рис. 4) при обработке данных принимались средние значения температуры поверхности кипения во времени.

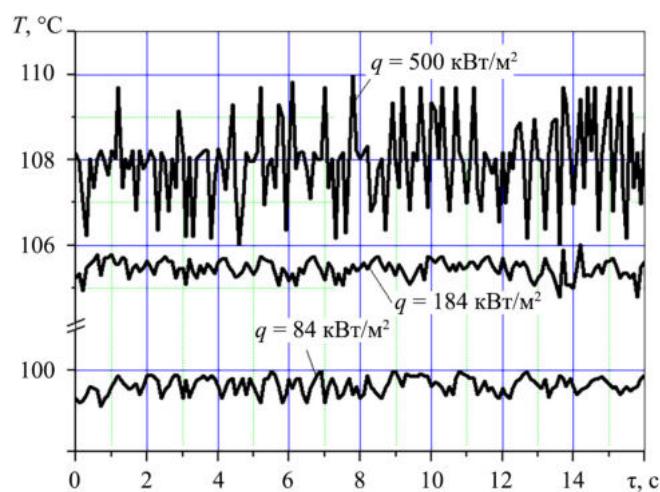


Рис. 4. Изменение температуры поверхности кипения № 6 во времени при различных тепловых нагрузках

Снятие экспериментальных данных проводилось на установившихся режимах. Перед проведением опытов предварительно проводилось «прикипение» поверхностей на режимах с тепловым потоком $q = 100 \text{ кВт/м}^2$ в течение 3–4 ч, когда устанавливались стабильные показания всех измерений из-за удаления потоками воды и отрывами пузырьков всех загрязнений и образования стабильного слоя окислов на элементах поверхностей.

В экспериментах осуществлялся омический нагрев сетчато-микроструктурированной поверхности. Рабочие образцы из сетчато-микроструктурированных пластин нарезались таким образом, что электрический ток протекал вдоль образца по низким микроребрам, высокие микроребра располагались поперек потока электрического тока.

На рис. 5 представлены результаты высокоскоростной съемки (4500 кадров/с, разрешение – 1024×896 пикселей) развития процесса кипения на сетчато-микроструктурированной поверхности № 1 при увеличении тепловой нагрузки.

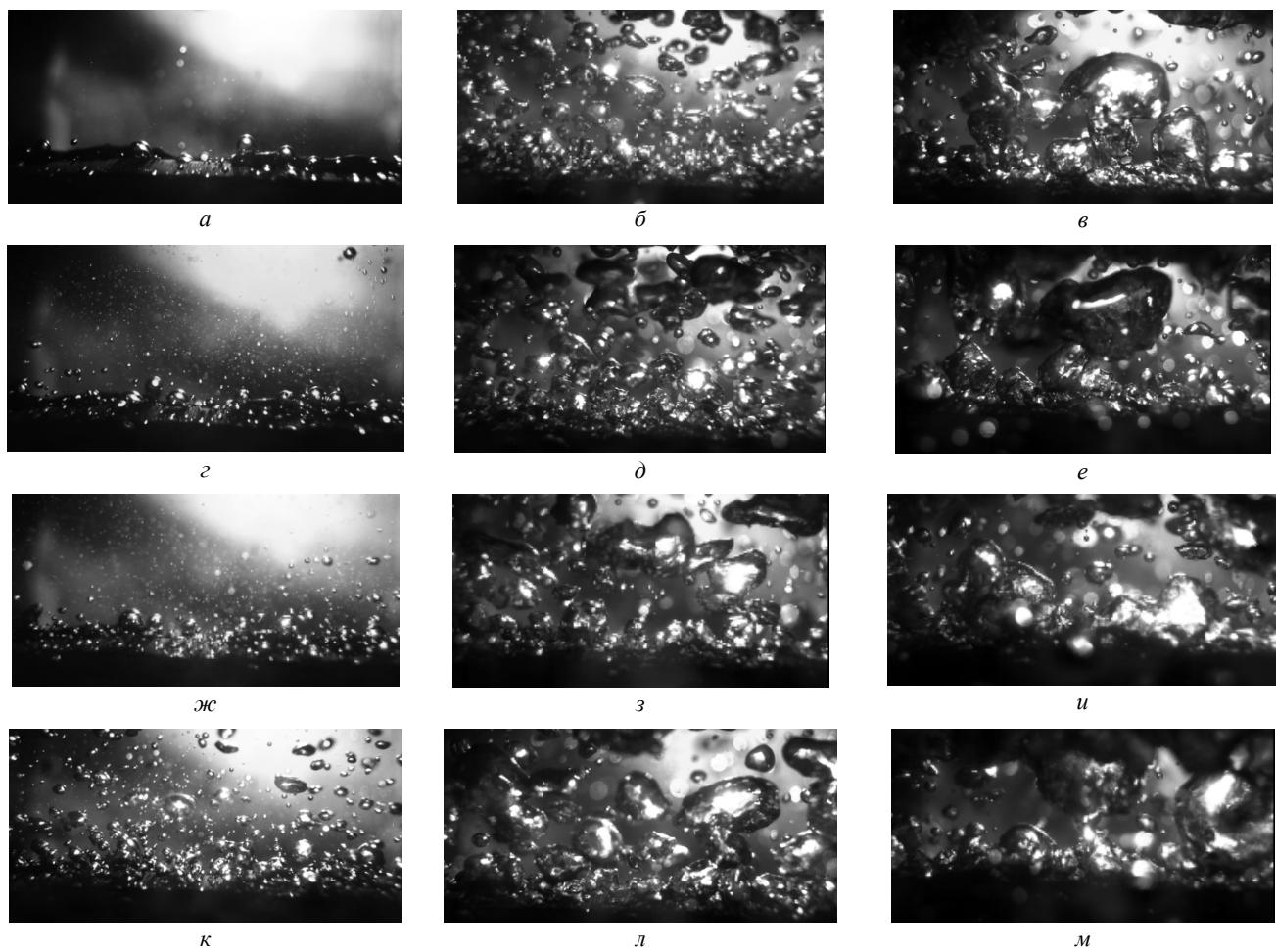


Рис. 5. Результаты визуализации динамики кипения на сетчато-микроструктурированной поверхности № 1:
 $a - q = 7,9 \text{ кВт}$; $b - q = 104,9 \text{ кВт}$; $c - q = 331,1 \text{ кВт}$; $d - q = 22 \text{ кВт}$; $e - q = 145,5 \text{ кВт}$; $f - q = 413,5 \text{ кВт}$; $g - q = 38 \text{ кВт}$;
 $h - q = 200,6 \text{ кВт}$; $i - q = 516 \text{ кВт}$; $j - q = 73,7 \text{ кВт}$; $k - q = 253,1 \text{ кВт}$; $l - q = 700 \text{ кВт}$

Исследования проведены при пузырьковом кипении с одиночными пузырьками и при их коагуляции до кризиса кипения, т. е. образования локального пленочного кипения, вызывающего местный резкий рост температуры образца и его прогар (рис. 6).

При тепловых нагрузках до 30 кВт/м^2 от отдельных ячеек отрываются с высокой частотой (до 10 Гц) пузырьки размером около 0,25–0,5 мм (рис. 7) (на фотографиях крупные пузырьки при $q \leq 38 \text{ кВт}$ не относятся к паровым и к поверхности кипения). С ростом нагрузки происходит увеличение диаметра отрывного пузырька до 0,8–1 мм (рис. 8, a), и частота отрыва снижается до 2,5 Гц. При тепловых нагрузках

около 70 кВт/м² диаметр пузырьков в момент отрыва достигает 2,5–3 мм. Далее, начиная с 100 кВт/м², происходит коагуляция пузырьков перед отрывом, и по мере подъема образуются пузыри значительных размеров (10–30 мм) (рис. 9, б). Однако, как видно по результатам визуализации кипения, на поверхности наблюдаются значительные площади, на которых отсутствуют паровые пузыри, что, возможно, объясняется входом жидкости в данных местах через ячейки сетчато-микроструктурированной поверхности в нижние подповерхностные каналы и снабжением водой центров парообразования (рис. 9).

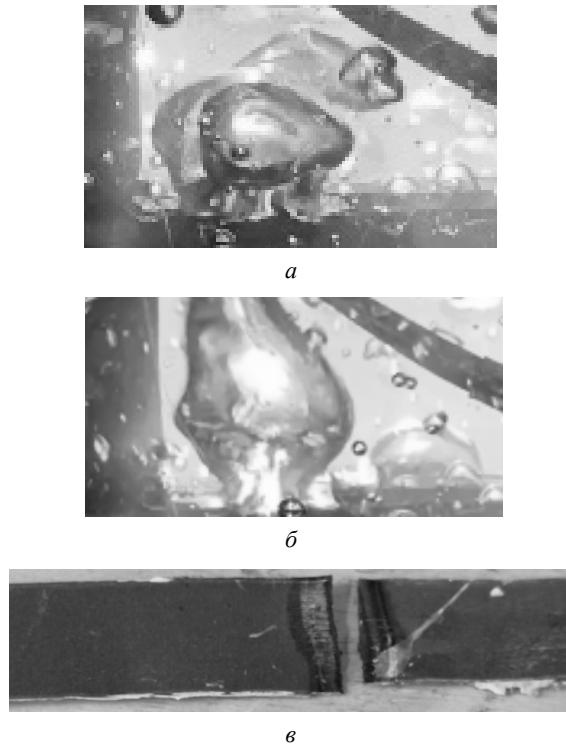


Рис. 6. Пример прогара поверхности № 3 при наступлении кризиса кипения: *а* – начало формирования локальной пленки пара и резкого повышения температуры под ней (локальное свечение); *б* – отрыв парового пузыря пара в месте прогара и локальное свечение в месте плавления металла поверхности; *в* – внешний вид прогара поверхности

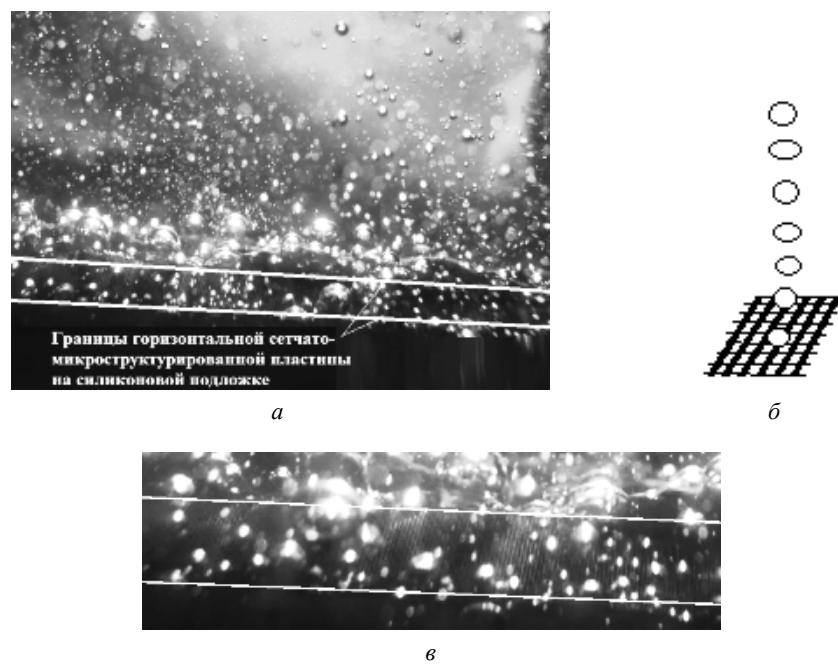
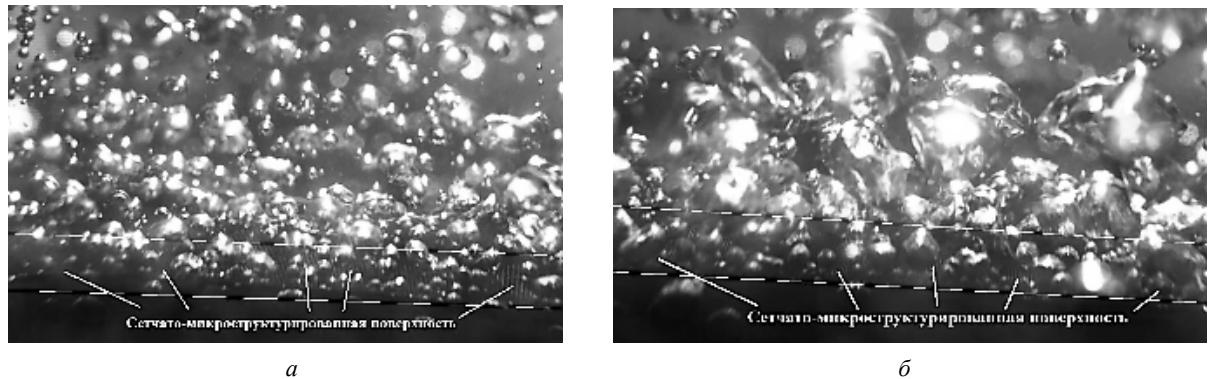


Рис. 7. Динамика парообразования на сетчато-микроструктурированной поверхности при $q = 25,3$ кВт/м²:
а – визуализация кипения (видеосъемка горизонтальной поверхности под углом);
б – схема образования и отрыва паровых пузырьков; *в* – визуализация поверхности

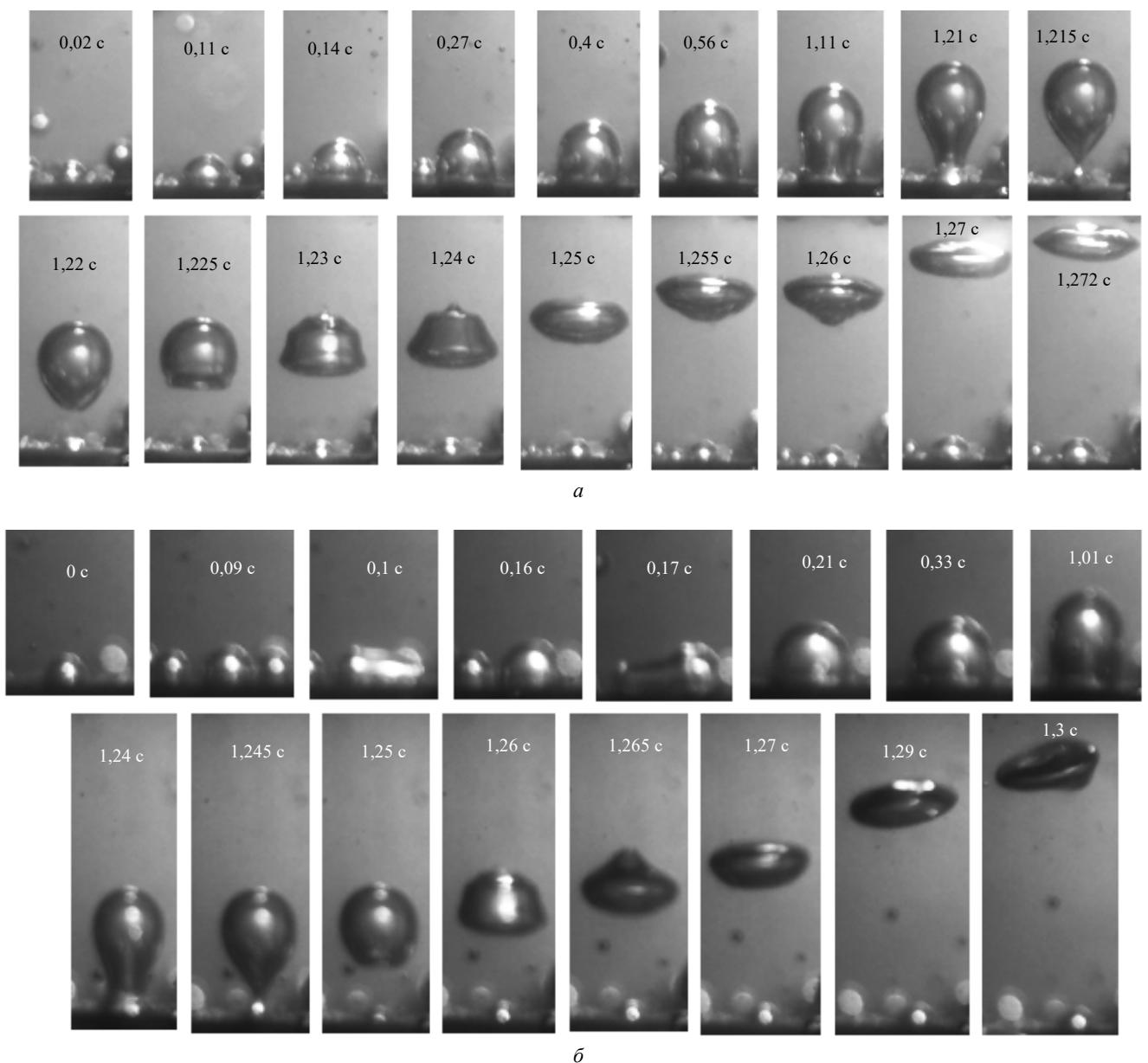


a

б

Рис. 8. Пузырьковое кипение высокой интенсивности на сетчато-микроструктурированной поверхности:
a – при $q = 64 \text{ кВт/м}^2$; *б* – при $q = 165,5 \text{ кВт/м}^2$

На рис. 9 показано возникновение и развитие парового пузырька на поверхности кипения № 5 при различных плотностях теплового потока.



a

б

Рис. 9. Результаты визуализации образования, роста и отрыва паровых пузырьков на поверхности кипения № 5:
a – $q = 38 \text{ кВт/м}^2$; *б* – $q = 56 \text{ кВт/м}^2$

Размер отрывного пузырька составлял около 2,5 мм, частота отрыва – 0,4 Гц. Зарождение паровых пузырьков происходит в центрах парообразования, в качестве которых выступают ячейки сетчатой структуры, под которыми сохраняются пузырьки воздуха, а затем и пара [1, 6]. Образование пара происходит как внутри объемов каналов между нижними рядами микроребер, так и в межреберных каналах верхних рядов ребер и на их вершинах. При тепловых нагрузках менее $q < 10 \div 40 \text{ кВт/м}^2$ наблюдалось образование одиночных паровых пузырьков (рис. 10, *a*). При больших нагрузках начинается работа уже рядом стоящих центров парообразования, и образующиеся паровые зародыши по мере зарождения и роста начинают коагулировать уже на поверхности, что приводит к более резкому росту паровых пузырей перед отрывом. Как видно из рис. 10, коагуляция со стоящими рядом зародышами паровых пузырей наблюдалась на 0,1 и 0,17-й секундах, затем рост парового пузыря происходит за счет подпитки паром от нескольких центров парообразования.

На рис. 10, 11 представлены результаты анализа теплоотдачи при кипении на сетчато-микроструктурированных поверхностях. На первой стадии проведено тестирование полученных результатов. Данные экспериментального исследования сравнили с результатами расчетов по формуле Михеева для кипения воды в большом объеме на гладкой поверхности (рис. 10, линия 1):

$$\alpha = 3,14 p^{0,1} q^{0,7}. \quad (1)$$

Результаты экспериментов хорошо согласуются с расчетными данными с отклонениями не более 10 %.

На второй стадии результаты, полученные при кипении на аналогичных сетчато-микроструктурированных поверхностях № 1–4, изготовленных из образцов различных партий производства, также удовлетворительно согласуются: расхождение составляет 16–18 % (см. рис. 10, 11). Для процессов кипения, отличающихся стохастичностью, это высокий уровень.

На рис. 10 данные для сетчато-микроструктурированных поверхностей также сравниваются с результатами расчетов по зависимости для кипения на микроструктурированных поверхностях с двумерным рельефом [7, 8] (рис. 10, линии 2–5):

$$\alpha/\alpha_0 = 4,71 K_q^{-0,155} (q/90)^{0,522} (h/l_0)^{0,22} (\Delta/l_0)^{0,19} (d/l_0)^{-0,36}. \quad (2)$$

Зависимость (2) получена в диапазоне изменения определяющих режимных и геометрических параметров $q = 3800 \div 2,17 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$; $K_q = 5 \div 11500$; $q/90 = 0,72 \div 1$; $h/l_0 = 0,09 \div 1,45$; $\Delta/l_0 = 0,002 \div 1,29$; $d/l_0 = 0,01 \div 1$; $Pr = 1,75 \div 35,7$; $F/F_0 = 1,66 \div 9,75$.

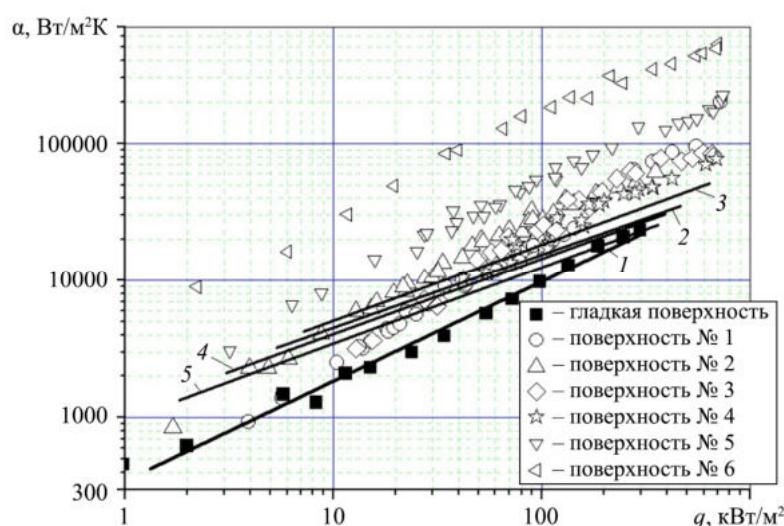


Рис. 10. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока при кипении воды:
1 – расчет по формуле (1) для гладкой поверхности; 2 – расчет по формуле (2) для поверхностей № 1, 3; 3 – расчет по формуле (2) для поверхностей № 2, 4; 4 – расчет по формуле (2) для поверхностей № 5; 5 – расчет по формуле (2) для поверхности № 6

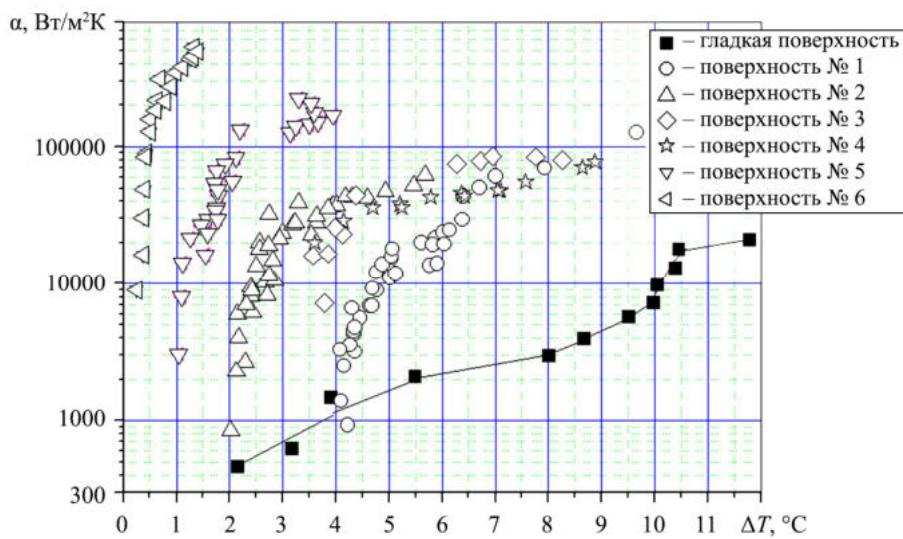


Рис. 11. Зависимость коэффициента теплоотдачи от перегрева поверхности при кипении воды на различных сетчато-микр оструктуренных поверхностях

Интенсификация теплоотдачи при кипении воды на сетчато-микроструктурированной поверхности достигает 13,3-кратного увеличения во всем диапазоне тепловых нагрузок (рис. 11, 12), что превосходит значения интенсификации теплоотдачи, полученные в работах [2–5] для микроструктурированных поверхностей с двухмерным и трехмерным рельефами с подповерхностными открытыми каналами, причем при геометрических параметрах поверхностей, обеспечивающих максимальные интенсификации теплоотдачи. Значительное увеличение коэффициентов теплоотдачи связано с увеличением активных центров парообразования и увеличением их подпитки водой из-за наличия нижнего ряда микроребер. Также зона интенсивного парообразования со значительной теплоотдачей в зоне микрослоя около паровых пузырьков на верхнем ряду микроребер подпитывается водой по межреберным микроканалам верхних рядов микроребер.

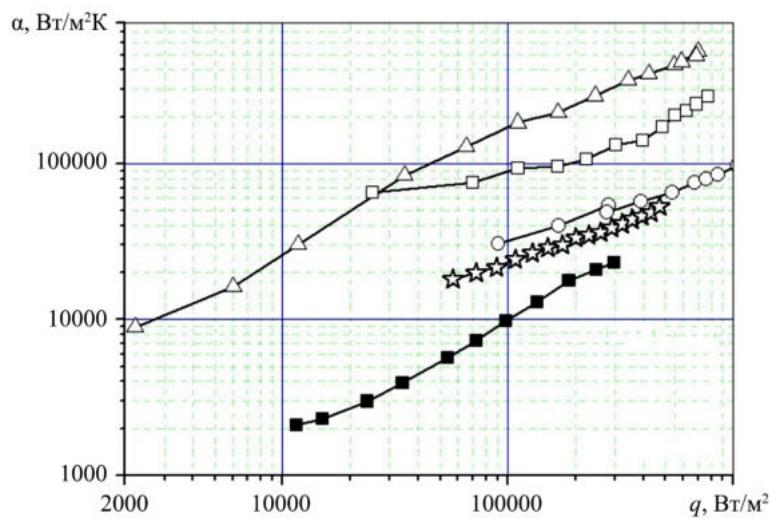


Рис. 12. Сравнительный анализ коэффициентов теплоотдачи при кипении воды в условиях свободной конвекции на микроструктурированных поверхностях с различными рельефами: \triangle – сетчато-микроструктурированная поверхность № 6; \square – микроструктурированная поверхность с трехмерным рельефом ($h = 480$ мкм, $\Delta = 240$ мкм, $\delta = 105$ мкм, $u = 120$ мкм, $s = 200$ мкм, $\theta = 70^\circ$, материал – AISI1020); \circ – микроструктурированная поверхность с двухмерным рельефом ($h = 95$ мкм, $\Delta = 15$ мкм, $\delta = 15$ мкм, $\theta = 87^\circ$, материал – BT1-00); \star – микроструктурированная поверхность с подповерхностными открытыми каналами ($h = 200$ мкм, $\Delta = 35$ мкм, $\delta = 65$ мкм, $k = 10$ мкм, $\theta = 83^\circ$, материал – BT1-00); \blacksquare – гладкая поверхность (материал – 316L)

Таким образом, в работе представлены результаты натурного моделирования процесса кипения воды в условиях свободной конвекции на сетчато-микроструктурированных поверхностях. Применение микроструктурированных поверхностей обеспечивает повышение коэффициентов теплоотдачи в 13,3 раз по сравнению с использованием других типов микроструктурированных поверхностей, полученных методом деформирующего резания.

В работе описаны результаты визуализации процесса кипения, что позволяет рассмотреть механизмы интенсификации. Однако необходимо продолжение исследований для подтверждения гипотезы механизмов парообразования на сетчато-микроструктурированных поверхностях и расширение базы данных по теплообменным параметрам для разработки расчетных рекомендаций для прогнозирования коэффициентов теплоотдачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках соглашения о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг, шифр FZSU-2023-0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубков Н.Н. Получение подповерхностных полостей деформирующим резанием для интенсификации пузырькового кипения // Вестник машиностроения. 2014. № 11. С. 75–79.
2. Попов И.А. и др. Теплообмен при кипении жидкости на микроструктурированных поверхностях. Ч. 1. Теплоотдача при кипении воды // Теплоэнергетика. 2013. № 3. С. 3–11.
3. Попов И.А. и др. Теплообмен при кипении жидкости на микроструктурированных поверхностях. Ч. 2. Визуализация кипения и критические тепловые потоки // Теплоэнергетика. 2013. № 4. С. 59–68.
4. Попов И.А., Щелчков А.В. Кипение различных жидкостей на микроструктурированных поверхностях // Инженерно-физический журнал. 2014. № 6. С. 1362–1374.
5. Попов И.А. и др. Теплообмен при кипении воды на горизонтальной микроструктурированной поверхности с полузакрытыми каналами // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2025. № 2. С. 10–15.
6. Суртаев А.С., Сердюков В.С. Исследование динамики контактной линии под паровым пузырем при кипении жидкости на поверхности прозрачного нагревателя // Теплофизика и аэромеханика. 2018. № 1. С. 71–77.
7. Попов И.А. и др. Рекомендации по оценке теплоотдачи и критических тепловых потоков на поверхностях кипения с щеточно-волокнистыми покрытиями // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2024. № 1. С. 33–39.
8. Коханова Ю.С. и др. Определение зависимости коэффициента теплоотдачи и критических тепловых потоков от геометрических параметров трехмерных микроструктурированных поверхностей, полученных методом деформирующего резания, при кипении различных жидкостей // КГТУ им. А.Н. Туполева. 2020. № 4. С. 12–17.

Поступила в редакцию 3.09.25

STUDY OF POOL BOILING HEAT TRANSFER OF WATER ON A MESH-MICROSTRUCTURED HORIZONTAL SURFACE

I.A. Popov, Yu.F. Gortyshov, Yu.S. Stepanova,
and I.A. Popov

The results of an experimental study of the pool boiling process of water on a horizontal mesh-microstructured surface are presented. Information on the mechanisms of boiling development and heat transfer coefficients has been obtained. All the results are compared with the results of experimental studies of other types of microstructured surfaces.

Keywords: pool boiling, heat transfer, critical heat flow, enhancement, mesh-microstructured surface.

Попов Игорь Александрович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: popov-igor-alex@yandex.ru

Гортышов Юрий Федорович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: jurij.gortyshov@kai.ru

Степанова Юлия Семеновна – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: yulkoh@yandex.ru

Попов Игорь Александрович – студент (Казанский ГАУ, Казань)
E-mail: popovia2024@yandex.ru

УДК 629.7.062

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПОВОРОТА СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

И.М. Баженов, А.А. Лизунов, С.А. Лизунов, А.И. Маслов

Рассматриваются вопросы проектирования систем поворота солнечных батарей космических аппаратов, включая анализ современных методов, выявление проблем и разработку подходов к повышению надежности, энергоэффективности и точности позиционирования. Методологическая основа исследования включает анализ существующих конструктивных решений, моделирование работы систем поворота, разработку и тестирование адаптивных алгоритмов управления, анализ методов прогнозирования динамического поведения системы. Разработана имитационная модель системы поворота, позволяющая оценить энергопотребление и точность ориентации. Предложены адаптивные методы управления, снижающие энергозатраты и повышающие эффективность работы приводов.

Ключевые слова: система поворота солнечных батарей, электромеханические системы, адаптивные алгоритмы управления, имитационное моделирование, приводные системы, нейросетевое прогнозирование.

Проектирование современных космических аппаратов сопряжено с ужесточением требований к энергообеспечению, что обусловлено ростом мощности бортовой аппаратуры, расширением функциональных возможностей миссий, необходимостью продления срока их активного существования.

Основным источником энергии для большинства космических аппаратов остаются солнечные батареи, эффективность которых напрямую зависит от точности ориентации панелей относительно Солнца. Электромеханические системы поворота солнечных батарей играют ключевую роль в оптимизации энергопотребления, однако их разработка связана с преодолением ряда научно-технических ограничений, требующих внедрения инновационных решений.

Современные системы поворота солнечных батарей должны обеспечивать высокую точность, надежность и энергоэффективность в условиях экстремальных нагрузок.

Существующие конструкции демонстрируют ограниченный и часто недостаточный ресурс из-за механических компонентов (редукторов, подшипников и т. п.) и деградирующей электроники. Отказы в системах ориентации солнечных батарей могут привести к критическому дефициту энергоснабжения и невыполнению миссий.

В связи с ростом энергопотребления приборов требуется максимизация КПД солнечных батарей. Неоптимальный угол поворота снижает выработку энергии на 20–40 %, что критично с учетом ограниченности площадей панелей и деградации солнечных батарей в процессе полета. Энергозатраты самой системы поворота (электроприводов, блоков управления) должны быть сведены к минимуму с целью обеспечения максимальной эффективности от ориентации солнечных батарей. Традиционные методы проектирования, основанные во многом на эмпирических подходах, не учитывают в достаточной степени многофакторные воздействия космической среды, выработку ресурса и изменение эффективности бортовых систем космического аппарата, не обеспечивают высокую точность прогнозирования возможностей космического аппарата при длительной активной работе.

Большинство моделей электромеханических систем не интегрируют данные о динамике деградации материалов в реальных условиях, что приводит к завышению запасов прочности и увеличению массы конструкции. Из-за отсутствия адаптивных алгоритмов управления, учитывающих изменение характеристик компонентов и динамики космического аппарата, со временем снижается КПД систем.

Совершенствование методов проектирования систем поворота солнечных батарей позволит повысить надежность, энергоэффективность космического аппарата за счет оптимизации системы поворота солнечных батарей, снижения энергопотребления приводов, уменьшить массогабаритные параметры систем, обеспечить соответствие современным стандартам новых космических программ, устойчивость к экстремальным условиям полета [1].

Целью работы является создание многофакторной математической модели и разработка алгоритмов синтеза математических моделей приводных устройств для сложных электромеханических систем, обеспечивающих интеграцию данных о конструктивных параметрах, динамических режимах и внешних воздействиях, с целью совершенствования методов проектирования электромеханических систем поворота солнечных батарей.

Совершенствование систем ориентации солнечных батарей космического аппарата связано с прогрессом в области космических технологий. Развитие становление систем поворота может быть условно разделено на несколько этапов.

На первом этапе создания (1960–1980 гг.) для поворота солнечных батарей использовались только механические системы. Вследствие увеличения энергоемкости панелей батарей и потребляемой энергии оборудованием все больше стали развиваться выносные панели солнечных батарей, состоящие из шарнирно-закрепленных панелей, установленных на выносной штанге и системы ориентации панелей на Солнце. Такие космические аппараты были намного эффективнее использующихся в то время спутников с закрепленными на цилиндрических корпусах солнечными батареями, площадь панелей которых была ограничена собственными размерами [2].

Основными проблемами при проектировании первых систем ориентации солнечных батарей на Солнце стало отсутствие систем обратной связи для коррекции угла поворота.

С развитием микроэлектроники и цифровых технологий точность систем поворота солнечных батарей увеличилась. В 1990–2010-е гг. происходит переход к цифровому управлению устройствами поворота солнечных батарей. Точность позиционирования достигла $\pm 1\text{--}2^\circ$, энергопотребление приводов остается высоким [3].

Общая тенденция повышения точности ориентации солнечных батарей по мере развития элементной базы и алгоритмов управления продемонстрирована на рис. 1.

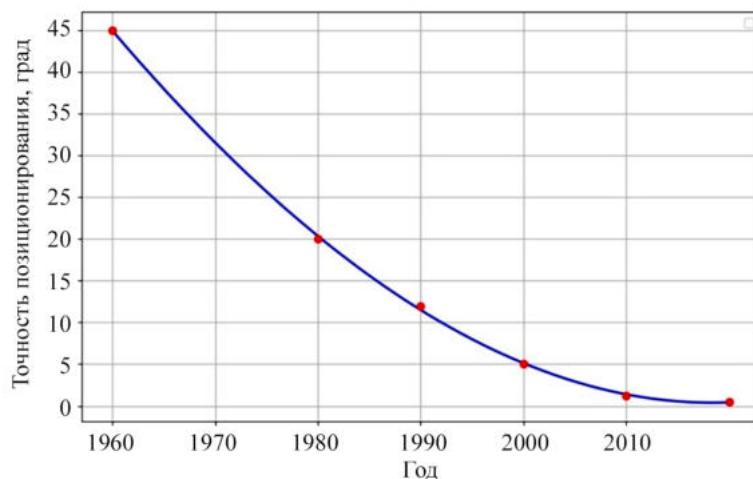


Рис. 1

Современные системы поворота солнечных батарей характеризуются использованием адаптивных алгоритмов управления и новых материалов, в том числе композитных [3]. За счет внедрения в системы поворота обратной связи удалось добиться повышения эффективности солнечных батарей.

На современном этапе развития систем ориентации солнечных батарей можно выделить следующие ключевые проблемы: недостаточная устойчивость к длительным миссиям (от 10 лет), сложность интеграции новых технологий в существующие системы и стандарты, низкая надежность отдельных кон-

структурных элементов, отсутствие эффективной адаптивной системы, учитывающей изменения поведения системы поворота и режимов работы всего космического аппарата, сложности в обеспечении устойчивости к воздействиям внешних факторов, ограниченные возможности для автономной диагностики в процессе эксплуатации.

К современным системам поворота солнечных батарей предъявляются повышенные технические, эксплуатационные и нормативные требования [4].

Разработка систем ориентации солнечных батарей сопряжена с рядом противоречий. Например, высокая точность позиционирования требует использования высокоточных датчиков, таких, как лазерные гироскопы, что, в свою очередь, увеличивает энергозатраты. Также резервирование компонентов системы повышает ее массу, что может негативно сказаться на общей эффективности, особенно для малых спутников. Кроме того, использование радиационно-стойких компонентов увеличивает стоимость системы, что также необходимо учитывать при проектировании.

Современные подходы к проектированию систем поворота солнечных батарей космического аппарата базируются на традиционных инженерных методах, которые часто не учитывают длительность миссий, экстремальные и постоянно меняющиеся условия космической среды, особенности конструкции и работы конкретных узлов и агрегатов системы поворота, в достаточной мере не моделируют поведение системы, что не только существенно снижает надежность и эффективность системы поворота, но и ограничивает возможности всего космического аппарата.

Существующие математические модели приводов часто основаны на линейных приближениях, что приводит к тому, что люфты и гистерезисы в редукторах и подшипниках не учитываются в полной мере, вследствие чего возникают погрешности позиционирования до $\pm 2^\circ$. Также при проектировании и создании математических моделей не учитываются упругие деформации элементов конструкции (например, валов) при циклических нагрузках, что снижает точность прогнозирования ресурсов. Из-за пересчета запасов прочности происходит увеличение массы системы, возможны непредсказуемые отказы во время длительного существования космического аппарата.

Большинство существующих моделей не учитывают кумулятивные эффекты износа – радиационную деградацию полимеров и смазок, изменяющую коэффициент трения, термоциклирование, вызывающее усталостные трещины, коррозию в вакууме, испарение смазочных материалов в редукторах. При этом ресурс системы сильно завышается (в среднем на 30–50 %), что может приводить к преждевременным отказам.

Для систем поворота солнечных батарей космического аппарата на данный момент отсутствуют алгоритмы адаптации управления к изменяющимся характеристикам всех компонентов. Многие используемые на практике подходы к моделированию и проектированию узлов сильно устарели. Они основаны на эмпирических методах, которые упрощают формулы до аналитических представлений о ранее используемой системе, отличающейся от современных решений или не учитывающей факторы, влияющие на систему. Учет многофакторного воздействия космической среды необходим даже на ранних этапах проектирования. В большинстве существующих систем нет возможности прогнозирования поведения в реальных условиях (радиация, микрометеоритные удары и т. п.). При этом сами модели тестируются в ограниченных диапазонах нагрузок, что не отражает реальные условия эксплуатации.

Статистические или не полностью адаптивные алгоритмы ПИД-регулирования становятся причиной высокого энергопотребления (до 10 % от мощности солнечных батарей). Также отсутствует рекуперация энергии (кинетическая энергия поворота не преобразуется обратно в электрическую), как следствие сокращается срок существования космического аппарата.

В связи с недостатками существующих методологических подходов к проектированию систем поворотов солнечных батарей космического аппарата ограничивается применение современных технологий – алгоритмов машинного обучения для прогнозирования отказов деталей приводов, устройств фиксации и поворота, использование сверхточных датчиков, например, квантовых датчиков с точностью $\pm 0,01^\circ$, использование аддитивных технологий для печати облегченных компонентов.

Таким образом, наиболее значимыми проблемами методов проектирования является недостаточный учет нелинейных эффектов, отсутствие адаптации к деградации материалов и ограниченное применение инновационных технологий.

При исследовании конструктивных особенностей элементов систем поворота прежде всего необходимо провести их структурно-функциональный анализ, включающий исследование различных подходов к организации системы (использование различных типов приводов), а также способы передачи движения (например, через редукторы, цепные или ременные передачи). В работе представлены особенности компоновки систем.

После определения конструктивного состава системы поворота и выбора приводного устройства необходимо формализовать математическую модель привода с учетом нелинейных эффектов. Важно отметить, что поворотные системы солнечных батарей, как правило, подвергаются разнообразным нагрузкам, которые могут проявляться нелинейными зависимостями – фрикционными потерями, инерционными моментами или нелинейными характеристиками материалов. Модели приводов следует разрабатывать с учетом этих эффектов для более точного описания поведения системы в различных режимах работы.

При моделировании электромеханических систем особое внимание уделяется обоснованию методов решения уравнений динамики, которые описывают поведение системы поворота в процессе ее функционирования. Для этого используется ряд математических и численных методов (Эйлера, Рунге – Кутта, метод конечных элементов), позволяющих учесть все важные динамические аспекты работы системы. Кроме того, при формулировке моделей необходимо учитывать различные допущения (идеализированные условия работы или упрощенные представления физических процессов), которые необходимы для упрощения расчетов, но не искажают основные характеристики системы [5].

Приводные устройства систем поворота солнечных батарей условно подразделяются на электромеханические, гидравлические и пневматические. Однако в условиях космоса доминируют электромеханические системы из-за их надежности, простоты управления и отсутствия жидкостей/газов. Электромеханические приводы основаны на преобразовании электрической энергии в механическое движение через двигатель и редуктор.

В современной практике для приводных устройств систем поворота используются три основных типа двигателей – шаговые двигатели, вентильные и пьезоэлектрические приводы.

Шаговые двигатели используются в малобюджетных спутниках для базового управления ориентацией, вентильные (бесколлекторные) двигатели наиболее распространены, а пьезоэлектрические приводы используются для тонкой настройки систем космического аппарата.

Проанализировав преимущества и недостатки различных типов двигателей, можно сделать вывод о том, что для большинства современных и перспективных космических аппаратов наиболее рациональным решением является использование комбинации из нескольких типов двигателей: вентильных – для основных маневров, пьезоэлектрических – для финальных юстировок, точных подстроек и компенсации микродеформаций. Такой подход обеспечит баланс между мощностью, точностью и надежностью, что критично для успешной работы аппарата.

Исходя из эксплуатационных требований к редукторам систем ориентации солнечных батарей (температурного диапазона, радиационной стойкости, массы и габаритов, стоимости), можно сформировать рекомендации по выбору редукторов.

1. Анализ требований.

Определение массы систем, диапазон углов поворота, точность, срок службы.

2. Выбор двигателя.

Для высоких моментов бесколлекторные двигатели, для точности – пьезоэлектрический актуатор с волновым редуктором.

3. Расчет редуктора.

Необходимо учесть кпд, люфты, передаточное отношение. Проведение FEM-анализа на предмет нагрузок позволяет выявить слабые места и улучшить конструкцию еще на этапе проектирования.

4. Валидация результатов.

Термовакуумные испытания (моделирование термонагружения [6]), циклические нагрузки для оценки ресурса (расчеты на прочность при циклических нагрузках).

Соблюдение предложенных рекомендаций поможет разработать эффективную и надежную систему поворота солнечных батарей, которая будет работать в условиях космоса с высокой точностью и долговечностью.

В общем случае выбор приводного устройства и редуктора для системы поворота солнечных батарей – это компромисс между точностью, надежностью, массой и стоимостью. Для большинства современных космических аппаратов оптимальна связка вентильный двигатель – планетарный/волновой редуктор, дополненная пьезокорректорами. Развитие аддитивных технологий и магнитных редукторов открывает новые возможности для миниатюризации и повышения эффективности систем.

Функциональная модель устройства поворота солнечных батарей приведена на рис. 2.



Рис. 2

В работе предложены алгоритмы построения математических моделей и построена имитационная модель системы ориентации солнечных батарей.

Процесс моделирования состоит из нескольких этапов.

1. Сбор параметров (геометрия, масса, моменты инерции, электрические характеристики).
2. Формализация уравнений (составление системы дифференциальных уравнений).
3. Создание отдельных моделей деградации компонентов устройств поворота солнечных батарей (солнечных батарей, подшипников, потерей в редукторе).
4. Моделирование термических, напряженных и упругих состояний системы.
5. Численное решение (метод Рунге – Кутты четвертого порядка).
6. Создание блока адаптивного управления и нейросетевого прогнозирования.

Приведем схему алгоритма: начало → инициализация параметров → решение уравнений → учет возмущений → анализ результатов → валидация → конец.

В данной работе при создании имитационной модели устройства поворота солнечных батарей использовались следующие программные инструменты:

1. Библиотеки Python.

Для моделирования динамических систем (SimuPy), математических расчетов (SciPy/NumPy), динамического моделирования многомассовых систем (PyDy), для валидации данных (Pydantic), для нейросетевого обучения и адаптивных алгоритмов (TensorFlow, keras), для ансамблей моделей и связывания различных библиотек (Scikit-learn).

2. ANSYS Mechanical, ANSYS Workbench.

Анализ термодеформаций, напряженных и упругих состояний. Для интеграции с ANSYS Mechanical используется библиотека PyANSYS.

3. COMSOL Multiphysics.

Автоматизация многофакторного моделирования (термомеханика + электродинамика).

В качестве объекта исследования был выбран космический аппарат «Кондор ФКА» [7]. В программном пакете SolidWorks была построена модель спутника дистанционного зондирования Земли. 3D-модель космического аппарата «Кондор ФКА» с разложенными солнечными батареями представлена на рис. 3. Также были созданы модели проектируемого устройства поворота солнечных батарей в ANSYS Workbench.

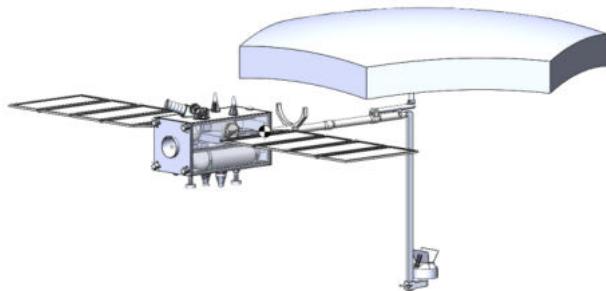


Рис. 3

На модели космического аппарата размещены виртуальные датчики для контроля положения и состояния системы поворота солнечных панелей [8].

Были использованы несколько рекуррентных LSTM-нейронных сетей для прогнозирования угла поворота, компенсации нелинейных эффектов (люфтов, трения, износа) и оптимизации управления с целью минимизации энергопотребления.

Рис. 4 демонстрирует изменение оптимальных углов поворота при адаптивном управлении с оптимизированным регулятором, основанным на нейронной сети.

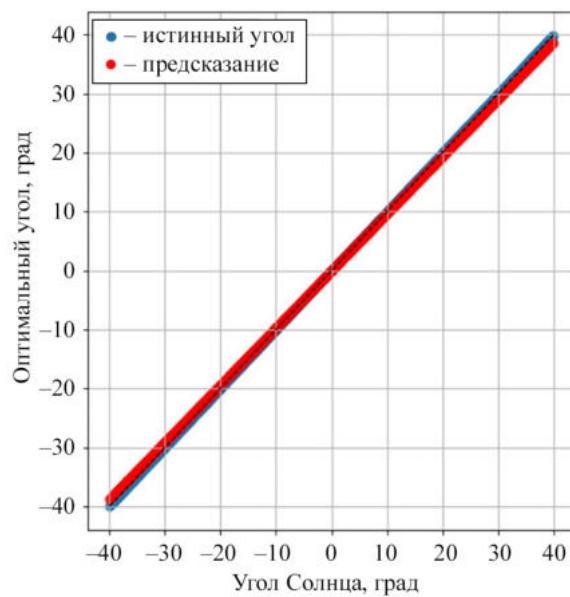


Рис. 4

Характер снижения ошибки по критерию MSE в ходе обучения представлен на рис. 5.

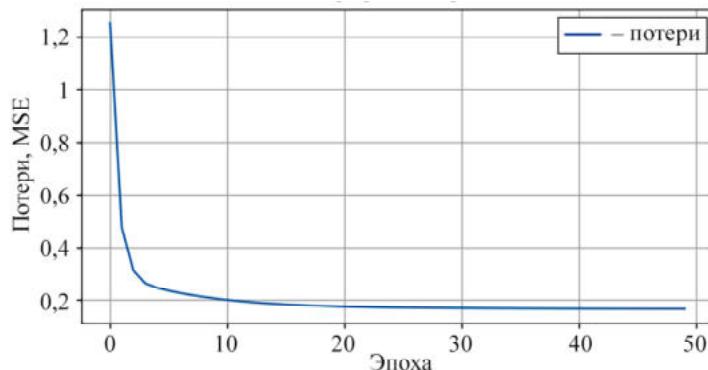


Рис. 5

Таким образом, в результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

За счет совершенствования методов проектирования электромеханических систем поворота солнечных батарей и использования предлагаемого в работе алгоритма создания моделей можно повысить точность и надежность систем поворота, сократить энергопотребление приводов за счет динамической коррекции ПИД-регулятора, внедрения адаптивных алгоритмов управления на основе LSTM-сети. Предложенные методы проектирования и создания цифровых моделей позволят повысить устойчивость космического аппарата к экстремальным условиям, снизить энергопотребление приводов, уменьшить массогабаритные параметры систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хмельницкий Я.А. Разработка конструкции солнечной батареи с минимальной массой для космического аппарата // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2017. № 4. С. 60–66.
2. Казанцев З.А. и др. Анализ конструкций солнечных батарей космических аппаратов // Космические аппараты и технологии. 2021. № 3 (37). С. 121–136.
3. Сазонов В.В. Математическое моделирование работы солнечных батарей космического аппарата // Математическое моделирование. 2021. № 9. С. 87–107.
4. Anigstein P.A., Sánchez-Peña R.S. Analysis of Solar Panel Orienta-Tion in Low Altitude Satellites // IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems. 1998. Vol. 34 (2). P. 569–578.
5. Романов А.В., Егоров В.В. Методика исследования поведения космических аппаратов на различных этапах эксплуатации с использованием трехмерного динамического моделирования // Исследования наукограда. 2013. № 1 (3). С. 26–32.
6. Kim Hui Kyung, Cho Young Han. Analytical and Numerical Approaches of a Solar Array Thermal Analysis in a Low-Earth Orbit Satellite // Advances in Space Research. 2010. Vol. 46. № 11. P. 1427–1439.
7. Руководство пользователя Кондор-ФКА [Электронный ресурс]. URL: https://ntsomz.ru/wp-content/uploads/2023/05/2023.02.17.rukovodstvo.pol_.zovatela.kondor-fka.dla_.saita_.pdf (дата обращения: 9.02.2025).
8. Емельянова Ю.Г. и др. Нейросетевая система контроля датчиков углов ориентации и дальности космического аппарата // Программные системы: теория и приложения. 2010. № 1 (1). С. 45–59.

Поступила в редакцию 9.03.25

IMPROVING DESIGN METHODS FOR ELECTROMECHANICAL SOLAR PANEL ROTATION SYSTEMS

I.M. Bazhenov, A.A. Lizunov, S.A. Lizunov, and A.I. Maslov

The paper considers the design of solar spacecraft array rotation systems, including analysis of modern methods, identification of problems and development of approaches to improving reliability, energy efficiency and positioning accuracy. The methodological basis of the study includes analysis of existing design solutions, modeling of rotation systems, development and testing of adaptive control algorithms, analysis of methods for predicting the dynamic behavior of the system. A simulation model of the rotation system has been developed, allowing to estimate energy consumption and orientation accuracy. Adaptive control methods are proposed that reduce energy costs and increase the efficiency of drives.

Keywords: solar panel rotation system, electromechanical systems, adaptive control algorithms, simulation modeling, drive systems, neural network forecasting.

Баженов Иван Михайлович – аспирант (АО «ВПК „НПО машиностроения“», Реутов)
E-mail: vpk@vpk.promash.ru

Лизунов Андрей Аркадьевич – канд. техн. наук (АО «ВПК „НПО машиностроения“»,
Реутов)
E-mail: vpk@vpk.promash.ru

Лизунов Сергей Андреевич – канд. техн. наук (АО «ВПК ”НПО машиностроения“»,
Реутов)
E-mail: vpk@vpk.npomash.ru

Маслов Александр Иванович – д-р техн. наук (АО «ВПК ”НПО машиностроения“»,
Реутов)
E-mail: vpk@vpk.npomash.ru

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ SLM ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 316L И БРОНЗЫ БрО10

А.Т. Габдрахманов, Л.Н. Шафигуллин, А.Т. Галиакбаров,
И.Х. Исрафилов, Ч.А. Гимазетдинова

Предлагается технология селективного лазерного плавления порошков нержавеющей стали 316L и бронзового порошка БрО10. Проведены металлографические исследования на сканирующем электронном микроскопе. Выявлены дефекты, которые могут образовываться при сплавлении порошков нержавеющей стали и бронзы.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, аддитивные технологии, металлические порошки, нержавеющая сталь 316L, бронза БрО10.

Технология селективного лазерного плавления применяется для производства высокопрочных, сложноструктурных металлических деталей в аэрокосмической (турбинные лопатки, кронштейны), медицинской (биосовместимые имплантаты с пористой поверхностью) и инструментальной промышленности (индивидуальные пресс-формы с системами охлаждения). Ключевыми преимуществами технологии селективного лазерного плавления является возможность создания изделий с практически любой геометрией (включая внутренние каналы и решетчатые структуры), минимальные припуски на механическую обработку (снижение отходов на 70–90 %), высокая точность (до 20–50 мкм) и механические свойства готовых изделий, сопоставимые с литыми аналогами, а также значительное ускорение производства малосерийных деталей за счет исключения оснастки [1, 2].

Недостатки технологии селективного лазерного плавления – высокая стоимость оборудования и материалов, ограниченная скорость производства (поэтапное наплавление микронных слоев), необходимость постобработки (удаление поддерживающих структур, термообработка для снятия внутренних напряжений), риски дефектов (пористость, микротрешины из-за перепадов температур), а также ограничения по размерам изделий (габариты камеры печати) и требование строгого контроля процесса в инертной среде, что делает технологию рентабельной преимущественно для малосерийного производства высокотехнологичных деталей в медицине, аэрокосмической и других наукоемких отраслях.

Актуальность исследований в области селективного лазерного плавления сосредоточена на преодолении ключевых ограничений технологии и расширении границ ее применения, что включает разработку новых и оптимизацию существующих материалов для получения изделий с принципиально новыми свойствами [3–8]. Основные усилия направлены на создание жаропрочных суперсплавов, интерметаллидов и композиционных материалов для аэрокосмической отрасли, биосовместимых сплавов с заданной пористостью для медицины, функционально-градиентных материалов для плавного перехода свойств в одной детали, а также на фундаментальное изучение физики процесса формирования микроструктуры и остаточных напряжений для управления механическими характеристиками и повышения повторяемости результатов.

В данной работе предлагается технология сплавления нержавеющей стали 316L (08Х17Н13М2) [9, 10] и бронзового порошка БрО10 в процессе селективного лазерного плавления. Это позволит создать функционально-градиентные материалы или композиты, сочетающие высокую прочность и коррозионную стойкость стали 316L с хорошей теплопроводностью и антифрикционными свойствами бронзы БрО10 в одной детали.

Для проведения экспериментальных исследований были взяты образцы металлических порошков производства 316L-E plus (Китай) и БрО10-Полема (Россия). Металлические порошки сушились в вакууме при температуре 200 °C 5 ч, после чего смешивались в пропорции 95% 316L-E plus и 5 % БрО10 в лабораторной шаровой мельнице LM-1000 в течение 3 ч.

Процесс спекания образцов осуществлялся на установке селективного лазерного плавления металлическими порошками (3D-принтер EP-M150 Pro) со следующими характеристиками: максимальный размер детали 150×240 мм; толщина слоя – 20–100 мкм; пятно лазера – 60 мкм; скорость построения – 5–7,5 см³/ч.

Режимы сплавления представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	InSkin	DownSkin	UpSkin
Скорость движения лазерного излучения, мм/с	1000	1500	1000
Мощность лазерного излучения, Вт	300	300	230

Было получено два образца с размером $10 \times 10 \times 10$ мм. Образец после печати представлен на рис. 1.



Рис. 1

Для снятия остаточных напряжений внутри материала была произведена термообработка одного из образцов. Термообработка осуществлялась в печи SLQ1100-40.

График нагрева и охлаждения представлен на рис. 2.

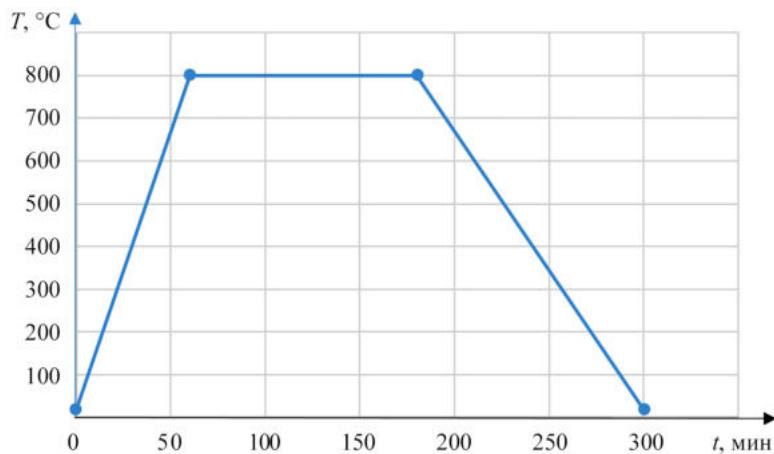


Рис. 2

Исследование порошков проводилось на сканирующем электронном микроскопе SM-50 (Китай).

Результаты исследования образцов на сканирующем электронном микроскопе приведены на рис. 3: *а* – образец без термообработки в сечении; *б* – образец с термообработкой (образцы без травления).

В результате металлографических исследований выявлено наличие дефектов на образцах, особенно на образце без термообработки (см. рис. 3, *а*), на образце с термообработкой наблюдаются четкие границы раздела фаз (см. рис. 3, *б*).

Результаты химического анализа дефектов на образцах (см. рис. 3) представлены в табл. 2.

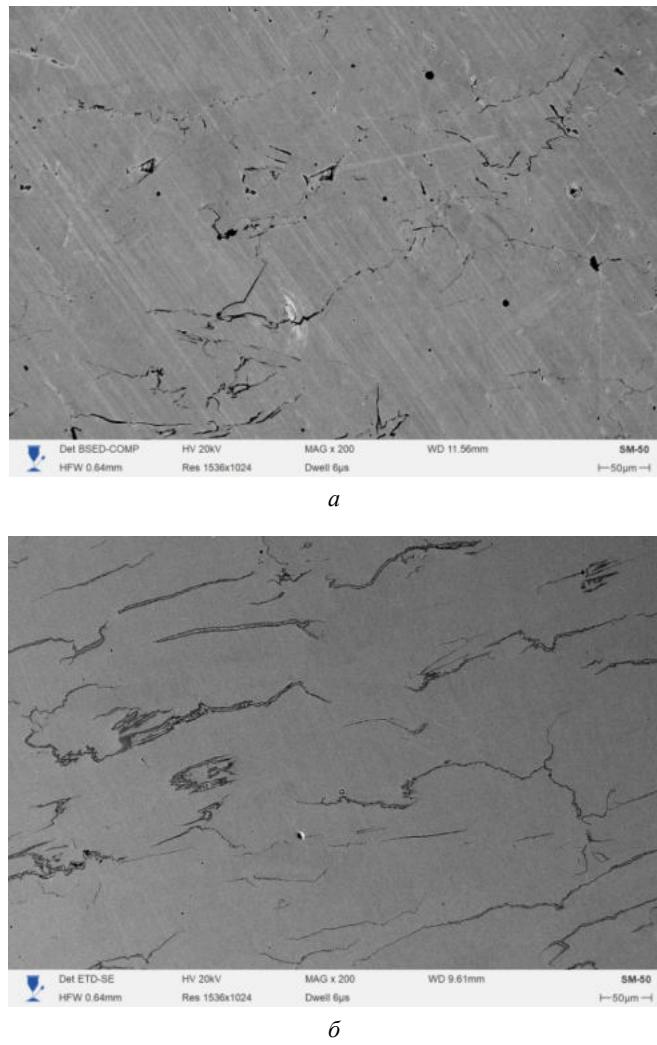


Рис. 3

Таблица 2

Образец	C	O	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo	Sn
Без термообработки	4,47	32,31	14,27	22,06	14,74	6,71	0,68	1,37	0,12	0,23
С термообработкой	6,54	5,29	2,55	14,63	1,44	53,03	9,62	3,20	1,88	0,41

Основными загрязняющими элементами являются углерод и кислород. Кислород может попасть в расплав из атмосферы, также возможно наличие оксидов на поверхности самих порошков. Наличие углерода объясняется возможными органическими загрязнениями на поверхности порошка или деградацией порошка при повторном использовании. Углерод также может осаждаться из атмосферы камеры распыления в процессе печати из-за наличия паров масел и оставшегося диоксида углерода.

В работе показана возможность получения сплавов из металлических порошков 316l и БрО10. В структуре материала присутствуют дефекты, которые могут ухудшить физико-механические свойства материала. Данные материалы могут использоваться в деталях, где необходима повышенная теплопроводность и антифрикционные свойства.

Работа выполнена при поддержке гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан» (соглашение № 06/2024-ПД от 16.12.2024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сацкая З.М. О развитии аддитивных технологий в России // Аддитивные технологии. 2021. № 3. С. 16–20.
2. Максимов Н.М. Стратегия развития аддитивных технологий // Аддитивные технологии. 2021. № 4. С. 10–15.
3. Струков Н.Н. Разработка технологии плазменного распыления прутковых материалов в камере с противотоком: Автoref. ... дис. канд. техн. наук. Пермь, 2021. 18 с.
4. Ермаков С.Б., Ларионова С.Ю. Новое оборудование производства порошков для 3D-принтеров // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке: Материалы 8-й Материалы 8-й Междунар. науч.-техн. конф., г. Санкт-Петербург, 15–17 нояб. 2017. СПб.: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2017. С. 81–85.
5. Галимов Э.Р., Беляев А.В. Влияние физико-химических процессов на качество сварных соединений // Материалы всерос. науч.-техн. конф., посвященной 100-летию В.А. Карташова, г. Саранск, 6–7 марта 2019. Саранск: Национальный исследовательский Мордовский гос. ун-т им. Н.П. Огарева, 2019. С. 113–117.
6. Федяев В.Л. и др. Математическое моделирование нагрева, плавления электродов и присадочных металлов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2019. № 2. С. 78–82.
7. Мурашев Ф.И., Галимов Э.Р., Хуснетдинов К.Р. Анализ составляющих состава, структуры и свойств в задачах обеспечения качества разнородных сварных соединений // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы: Материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф., г. Казань, 8 дек. 2022. Казань: АО «Казанский научно-исследовательский институт авиационных технологий», 2022. Т. 1. С. 249–254.
8. Галимов Э.Р., Федяев В.Л., Беляев А.В. Аналитические оценки тепловых процессов при контактной сварке // Строительные конструкции: состояние и перспективы развития: Материалы всерос. науч.-техн. конф., посвященной 100-летию В.А. Карташова, г. Саранск, 6–7 марта 2019. Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва. С. 108–113.
9. Gabdrakhmanov A.T., Shafiqullin L.N., Gabdrakhmanova T.F. Study of the Properties of Metal Powder Received by Plasma // Gas Discharge Plasmas and Their Applications: Proc. of the 14th International Conference, Sept. 15–21, 2019, Tomsk, Russia. 2019. Vol. 298. Iss. 1. Article № 00050.
10. Gabdrakhmanov A.T., Gabdrakhmanova T.F., Galiakbarov A.T., Israfilov I.H. Powder Production of From Low-Alloy Steel by Flame Atomization // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1923. Iss. 1. Article № 012019.

Поступила в редакцию 20.09.25

DEVELOPMENT OF SLM TECHNOLOGY FOR PRODUCING NEW ALLOYS BASED ON METAL POWDER COMPOSITIONS OF STAINLESS STEEL 316L AND BRONZE BRO10

**A.T. Gabdrakhmanov, L.N. Shafiqullin, A.T. Galiakbarov,
I.Kh. Israfilov, and Ch.A. Gimazetdinova**

The paper proposes a technology of selective laser melting of stainless steel 316L pistons and bronze powder BrO10. Metallographic studies were conducted using a scanning electron microscope. Defects that may occur during the fusion of stainless steel and bronze powders were identified.

Keywords: selective laser melting, additive technology, metal powders, 316L stainless steel, bronze BrO10.

Габдрахманов Азат Талгатович – канд. техн. наук (Набережночелнинский филиал КФУ, Набережные Челны)
E-mail: vevron000@mail.ru

Шафигуллин Ленар Нургалиевич – канд. техн. наук (Набережночелнинский филиал КФУ, Набережные Челны)
E-mail: misharin_82@mail.ru

Галиакбаров Азат Талгатович – канд. техн. наук (Набережночелнинский филиал КФУ, Набережные Челны)
E-mail: azatgaliakbarov@yandex.ru

Исраfilов Ирек Хуснемарданович – д-р техн. наук (Набережночелнинский филиал КФУ, Набережные Челны)
E-mail: irmaris@yandex.ru

Гимазетдинова Чулпан Альбертовна – аспирант (Набережночелнинский филиал КФУ, Набережные Челны)
E-mail: gimazetdinova.chulpan@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И СВОЙСТВА ТЕПЛОПРОВОДНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПЕН

Э.Р. Галимов, В.Л. Федяев, Э.Э. Шарафутдинова, Н.Я. Галимова,
М.М. Ганиев, Р.И. Галимов

Разработана технология получения теплопроводных углеродных пен со средними значениями теплопроводности ступенчатой термической обработкой нефтяного пека, наполненного полыми углеродными микросферами. Описаны стадии технологического процесса получения пен. Приведены результаты исследования влияния содержания микросфер на изменение теплопроводности и базовых физико-механических свойств пен.

Ключевые слова: нефтяной пек, полые углеродные микросфера, углеродные пены, технология получения, свойства.

Обширный класс углеродных материалов включает углеродные пены, характеризующиеся разнообразными эксплуатационными, в том числе теплофизическими свойствами. Отличительной особенностью углеродных пен является возможность направленного регулирования пористой структуры в ходе технологического процесса их получения использованием различных связующих веществ, наполнителей, структурообразующих и модифицирующих добавок, а также режимов термической обработки [1, 2].

Варьируя природой, составом и соотношением компонентов, а также условиями формирования структуры в процессе термообработки композиций, возможно получить углеродные пены с различной пористостью и регулируемым комплексом свойств, уровень которых определяет возможность и перспективность их практического применения во многих, в том числе высокотехнологичных отраслях современной промышленности [3, 4]. По теплофизическим свойствам и функциональному назначению углеродные пены подразделяют на теплоизолирующие и теплопроводные, различающиеся значениями коэффициента теплопроводности. По данному показателю пены принято подразделять на материалы с низким (менее 10 Вт/м·К), средним (10...60 Вт/м·К) и высоким (60...180 Вт/м·К) коэффициентом теплопроводности.

Целью данной работы является разработка технологии получения углеродных пен со средними значениями коэффициента теплопроводности и заданными физико-механическими свойствами.

Технологии получения теплопроводных пен основаны на использовании в качестве исходных компонентов графитирующихся углеродных материалов, преимущественно в виде нефтяных или каменноугольных пеков. В данной работе в качестве исходных компонентов для получения пен с коэффициентом теплопроводности в диапазоне 10...60 Вт/м·К использовали нефтяной пек и полые углеродные микросфера. Нефтяной пек представляет собой полутвердое вещество аморфной структуры, способное переходить в вязкотекущее состояние с образованием анизотропной жидкокристаллической фазы (мезофазы) при сравнительно невысоких температурах (400–500 °C), характеризующееся высоким выходом углеродистого остатка (более 70 %) при термообработке в инертной среде (коксование). В качестве наполнителя использовали микросферы диаметром 40 мкм, толщиной стенок 1-3 мкм и насыпной плотностью 130–140 кг/м³. Содержание микросфер в композициях меняли от 40 до 80 мас. %.

Технология получения образцов углеродных пен состояла из следующих операций: жидкофазное смешивание в толуоле нефтяного пека и микросфер, формирование «зеленой» пены прессованием порошкообразной композиции при 200 °C, низкотемпературная (450 °C) и высокотемпературная (900 °C) карбонизация, графитация (2100 °C), пиролитическое уплотнение (1100 °C), механическая обработка [3].

Исследования коэффициента теплопроводности и базовых физико-механических свойств углеродных пен (кажущаяся плотность, твердость по Виккерсу, прочность на сжатие) проводили по методикам, описанным в работе [3].

Результаты изменения кажущейся плотности пены от содержания микросфер в исходной смеси приведены на рис. 1.

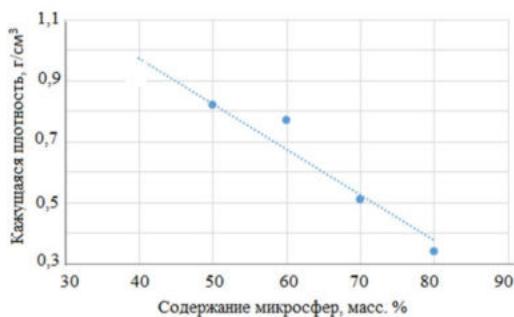


Рис. 1

Как видим (см. рис.1), данная зависимость имеет линейный характер, что позволяет в широком диапазоне регулировать плотность пены изменением соотношения нефтяной пек – углеродные микросфера.

Как было отмечено, завершающей стадией технологического процесса получения углеродных пен является механическая обработка образцов для придания им определенной формы заданных размеров. В связи с этим важной характеристикой, определяющей способность образцов пены подвергаться механической обработке, является прочность на сжатие. Данный параметр является основным требованием, предъявляемым к конструкционным материалам, и уровень порядка 15–20 МПа является достаточным для их механической обработки [4].

На рис. 2 показана зависимость прочности на сжатие образцов пен от содержания микросфер. Этим требованиям удовлетворяют пены, содержащие 55–70 мас. % микросфер. В целом прочность закономерно снижается с повышением содержания микросфер, и увеличивается пористость материала.

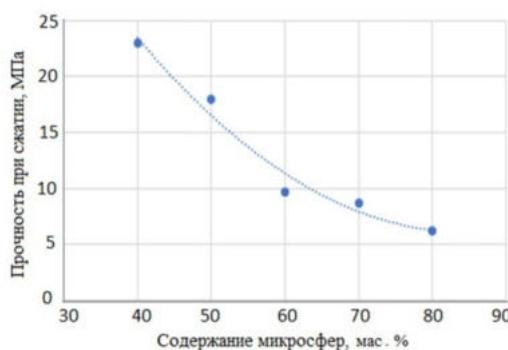


Рис. 2

Важным свойством, определяющим возможность механической обработки пен, является твердость.

Зависимость твердости по Виккерсу от содержания микросфер показана на рис. 3.

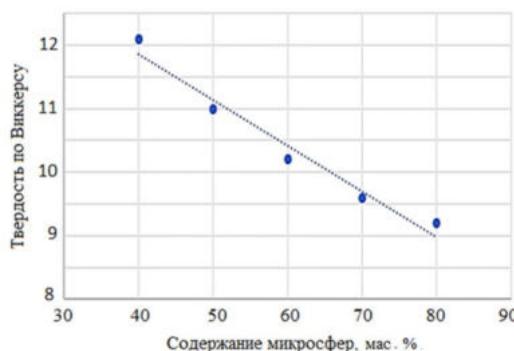


Рис. 3

Как видим (см. рис. 3), с ростом содержания микросфер твердость пен уменьшается. Это свидетельствует о том, что из двух тенденций (повышение средней твердости за счет более высокой твердости кокса ФФС (материал микросфер) по сравнению с графитом из пека и снижение твердости вследствие увеличения пористости материала) доминирует вторая.

Теплофизические свойства определяют пригодность материалов для применения в качестве изделий высокотемпературного теплоотвода. Из представленных данных (рис. 4) видно, что коэффициент теплопроводности демонстрирует линейную зависимость от содержания микросфер, причем его значения занимают промежуточное положение между показателями теплоизолирующих пен с низкой теплопроводностью (менее 10 Вт/м·К) и повышенной теплопроводностью (до 180 Вт/м·К) [3]. Полученные данные свидетельствуют о приблизительной аддитивности этого свойства для данного класса материала. Экстраполяция к нулевому содержанию микросфер дает значение менее 90 Вт/м·К, что говорит о подавлении мезофазного превращения в пеке в процессе карбонизации.

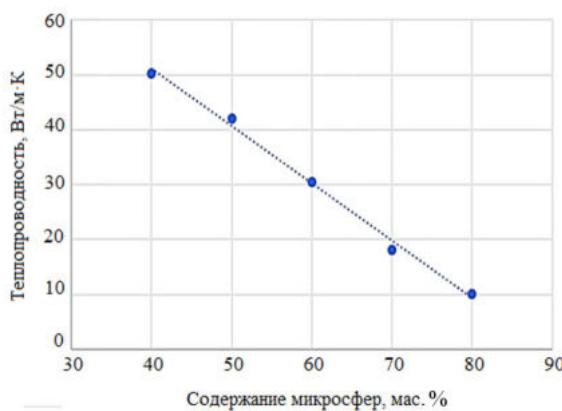


Рис. 4

Как видим (см. рис. 4), коэффициент теплопроводности исследованных композиций соответствует заданным значениям (10–60 Вт/м·К) и линейно зависит от содержания углеродных микросфер.

Таким образом, полученные результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что свойства углеродных пен зависят от применяемых исходных компонентов и режимных параметров термической обработки. Установлено, что по мере увеличения содержания в составе композиций наполнителя в виде полых углеродных микросфер наблюдается закономерное изменение комплекса исследованных свойств, обеспечивающих возможность их практического применения в промышленности в качестве теплоизолирующих материалов со средними значениями коэффициента теплопроводности и заданным уровнем физико-механических свойств. Технико-экономическая эффективность использования пеков обусловлена их высокой доступностью, низкой стоимостью и значительным потенциалом в качестве исходного сырья для производства теплопроводных пен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колокольцев С.Н. Углеродные материалы. Свойства, технологии, применения. Долгопрудный: Интеллект, 2012. 296 с.
2. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М.: Химия, 1975. 264 с.
3. Галимов Э.Р. и др. Синтактические углеродные пены: получение, структура, свойства, применение. Казань: АН РТ, 2022. 324 с.
4. Galimov E.R., Sharafutdinova E.E., Galimova N.Ya. Development of Technologies for Producing Heat-Conducting Syntactic Carbon Foams with Specified Operational Properties / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 570. Article № 012023.

Поступила в редакцию 20.09.25

PRODUCTION TECHNOLOGY AND PROPERTIES OF THERMALLY CONDUCTIVE CARBON FOAM

**E.R. Galimov, V.L. Fedyayev, E.E. Sharafutdinova, N.Ya. Galimova,
M.M. Ganiev, and R.I. Galimov**

A technology for producing thermally conductive carbon foams with medium thermal conductivity values has been developed using stepwise heat treatment of petroleum pitch filled with hollow carbon microspheres. The stages of the foam production process are described. The results of a study examining the effect of microsphere content on changes in thermal conductivity and basic physical and mechanical properties of the foams are presented.

Keywords: petroleum pitch, hollow carbon microspheres, carbon foams, production technology, properties.

Галимов Энгель Рафикович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: kstu-material@mail.ru

Федяев Владимир Леонидович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: vlfed2020@gmail.com

Шарафутдинова Эльмира Энгелевна – канд. психол. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: elechkaneo@yandex.ru

Галимова Назиря Яхиевна – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: kstu-material@mail.ru

Ганиев Махмут Масхудович – д-р техн. наук (Лениногорский филиал КНИТУ-КАИ,
Лениногорск)
E-mail: ganiew2@rambler.ru

Галимов Рафаэль Ильдарович – студент (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: galimovraphael@mail.ru

РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ УЧЕБНО-ИМИТАЦИОННОЙ ИГРЫ КАК ИНСТРУМЕНТА ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА

В.М. Бабушкин, Р.А. Галямов, Г.Ф. Мингалеев, Р.И. Салимов

Рассматривается авторская разработка – учебно-имитационная игра «Завод по сборке электровыключателей», – направленная на формирование практических навыков и lean-мышления у обучающихся и специалистов предприятий. Обоснована актуальность применения бизнес-симуляций в образовательном процессе и корпоративном обучении. Представлена детальная методика проведения игры, включающая поэтапный алгоритм внедрения инструментов бережливого производства (5S, стандартизация, кайдзен, балансировка, вытягивание). Разработана математическая модель для количественной оценки эффективности производственного процесса в каждом раунде игры, основанная на расчете коэффициента производительности, уровня брака и соблюдения стандартов. Научная новизна заключается в интеграции классических принципов Lean Manufacturing в структурированный, измеримый игровой процесс, что позволяет не только демонстрировать их эффективность, но и формализовать результаты обучения. Доказано, что применение данной игры способствует системному усвоению знаний и их последующему применению в реальной производственной деятельности.

Ключевые слова: бережливое производство, учебно-имитационная игра, бизнес-симуляция, lean-мышление, кайдзен, производственный процесс, математическое моделирование, профессиональное образование, корпоративное обучение.

В современной образовательной практике все большее значение приобретают игровые технологии в образовании: ключевые термины и их интерпретация подразумевают переход от пассивного усвоения знаний к активному моделированию профессиональных ситуаций [1]. Примером служит учебно-имитационная игра «Завод по сборке электровыключателей», где обучающиеся на собственном опыте постигают сложности управления реальным производством.

Полученный опыт формирует основу для решения более комплексных задач. Так, для авиастроительной отрасли, характеризующейся высокой капиталоемкостью, крайне актуальной является разработка методов стратегического управления рисками авиастроительного производства [2]. Аналогично для оборонно-промышленного комплекса как эффективный путь развития рассматривается внедрение интегрированных систем бережливого производства и управления качеством на российских предприятиях оборонно-промышленного комплекса, что позволяет одновременно повышать эффективность и минимизировать брак [3].

Основным инструментом для анализа и совершенствования бизнес-процессов является математическое моделирование как инструментарий технологии бережливого производства [4]. С его помощью решается широкий круг прикладных задач – от управления материальными запасами на предприятиях машиностроительных производств, основанного на результатах имитационного моделирования производственной среды, до улучшения производственных процессов системы менеджмента качества на основе моделирования [5].

Ключевым аспектом остается управление ресурсами, а именно управление и оптимизация состава производственных ресурсов в условиях динамики спроса и внешней среды [6]. Данная задача приобретает особую значимость в контексте управления рисками заказного мелкосерийного производства, характеризующегося уникальностью каждого проекта и необходимостью особого подхода к планированию [7, 8]. Учет указанных элементов должны быть обеспечен уже на этапе разработки проекта организации производства промышленного предприятия [9].

Значима роль человеческого фактора, поскольку влияние мотивации персонала на повышение производительности труда на предприятиях оборонно-промышленного комплекса и других отраслей является критически важным [10, 11]. Таким образом, современный производственный менеджмент – это

синтез передового цифрового инструментария, грамотного стратегического планирования и эффективной работы с коллективом [12].

В целом из-за изменений в производственной и экономической сферах возникает необходимость подготовки специалистов, владеющих не только теоретическими знаниями, но и практическими навыками оптимизации процессов. Эффективной философией управления является концепция бережливого производства (Lean Manufacturing), однако ее изучение часто ограничивается теоретическими курсами, что не позволяет сформировать глубокое понимание и устойчивые компетенции. Устранению данного разрыва способствуют активные методы обучения, из которых особое место занимают учебно-имитационные игры (бизнес-симуляции).

В настоящей работе анализируется и научно обосновывается разработанная учебно-имитационная игра «Завод по сборке электровыключателей» [13], которая моделирует реальный производственный цикл и поэтапное внедрение инструментов Lean.

Игра представляет собой трехраундовую симуляцию, где каждый раунд преследует определенную дидактическую цель и соответствует этапу внедрения бережливых технологий.

Алгоритм проведения игры состоит из нескольких этапов.

1. Подготовительный этап.

Распределение ролей (рабочие, контролер ОТК, мастер, менеджеры по улучшению), ознакомление с инструкциями, изучение исходного технологического процесса сборки выключателя.

2. Раунд 1 (традиционное производство).

Цель – осознание недостатков системы с выталкивающей (push) логикой, наличия потерь (муда). Методика заключается в том, что участники работают по жестким, неоптимизированным инструкциям, запрещены любые изменения. Сбор данных: менеджеры по улучшению фиксируют время операций, строят диаграмму спагетти, фиксируют объем выпуска и процент брака.

3. Анализ раунда 2 и обучение.

Модератор проводит разбор, выявляя проблемы. Проводится вводное обучение: основы Lean, система 5S, стандартизация. На основе мозгового штурма формируется доска кайдзен-предложений.

4. Раунд 2 (внедрение базовых инструментов Lean).

Цель – демонстрация эффекта от внедрения 5S и стандартизации. Методика заключается в том, что участники работают по переработанным ими инструкциям. Внедряются улучшения с доски кайдзен.

Сбор данных – повторный замер времени, построение карты потока создания ценности для выявления узких мест.

5. Анализ раунда 2 и обучение.

Выявление новых проблем. Проводится углубленное обучение: балансировка линии и вытягивающая система (pull).

6. Раунд 3 (бережливое производство).

Цель – достижение плановых показателей через внедрение всех изученных инструментов. Методика заключается в работе по оптимизированным процессам с использованием принципа вытягивания.

7. Итоговый анализ.

Сравнение ключевых показателей эффективности (КПИ) всех трех раундов, подведение итогов, получение обратной связи.

Для количественной оценки эффективности производственного процесса в каждом раунде игры предлагается следующая математическая модель.

1. Коэффициент производительности $K_{\text{пр}}$ за раунд:

$$K_{\text{пр}} = \frac{N_{\text{факт}}}{N_{\text{план}}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{факт}}$ – фактическое количество собранных и принятых ОТК изделий; $N_{\text{план}}$ – плановое задание на раунд.

2. Уровень брака $L_{бр}$:

$$L_{бр} = \frac{N_{бр}}{N_{факт} + N_{брак}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $N_{брак}$ – количество забракованных изделий.

3. Коэффициент соблюдения стандартов $K_{ст}$ – субъективная оценка мастера/модератора (от 0 до 1) того, насколько строго участники соблюдали рабочие инструкции и стандарты.

4. Обобщенный показатель эффективности раунда $E_{раунд}$:

$$E_{раунд} = \alpha K_{пр} + \beta \left(1 - \frac{L_{бр}}{100} \right) + \gamma K_{ст}, \quad (3)$$

где α, β, γ – весовые коэффициенты, определяемые важностью каждого параметра для конкретного производства ($\alpha + \beta + \gamma = 1$). Для учебных целей можно принять $\alpha = 0,5; \beta = 0,3; \gamma = 0,2$.

Научный результат представленной разработки заключается в следующем.

1. Комплексность.

Игра является законченной моделью трансформации предприятия от традиционной системы к бережливому производству.

2. Измеримость.

Предложенная математическая модель позволяет перевести качественные изменения в количественные показатели, наглядно демонстрируя прогресс от раунда к раунду. Рост показателя $E_{раунд}$ является объективным критерием успешности усвоения материала.

3. Алгоритмизация внедрения Lean.

Методика игры представляет собой четкий алгоритм действий для реального внедрения инструментов Lean на предприятии – от анализа текущего состояния и работы с сопротивлением (раунд 1) до точечных улучшений (раунд 2) и системной оптимизации (раунд 3).

4. Адаптивность.

Модель сборки конкретного изделия (электровыключателя) в перспективе может быть заменена на любую другую, что делает методику универсальной.

Применение учебно-имитационной игры «Завод по сборке электровыключателей» высокоэффективно как для системы высшего образования, так и для корпоративного обучения.

В случае использования обучающимися вузов игра обеспечивает формирование профессиональных компетенций в области управления операциями и процессами. Она позволяет студентам на практике, в «безрисковой зоне», понять причинно-следственные связи в производстве, увидеть результаты своих решений и сформировать основу для системного мышления. Это незаменимый инструмент для программ бакалавриата и магистратуры по направлениям «Менеджмент», «Инженерное дело», «Технология машиностроения».

При использовании специалистами предприятий, действующими компаниями игра является мощным инструментом командообразования, позволяет изменить мышление сотрудников, показать необходимость и выгоду от внедрения бережливых технологий «здесь и сейчас». Она является катализатором изменений и способствует формированию кадрового резерва из числа сотрудников, проявивших себя в ходе симуляции.

Таким образом, разработанная учебно-имитационная игра представляет собой научно обоснованный, структурированный и измеримый метод обучения, который успешно решает задачу формирования практических компетенций и lean-мышления у будущих и действующих специалистов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Соколова И.Н. Игровые технологии в образовании: ключевые термины и их интерпретация // Молодой ученый. 2025. № 9 (560). С. 112–115.

2. Высиканцев А.П. и др. Разработка методов стратегического управления рисками авиастроительного производства // Стратегическое управление рисками на предприятиях авиастроения. Чебоксары: ООО «Издательский дом „Среда“», 2025. С. 80–128.
3. Балдина А.С. Интегрированные системы бережливого производства и управления качеством на российских предприятиях оборонно-промышленного комплекса // Вестник НГУЭУ. 2022. № 3. С. 140–153.
4. Бажанов Н.Н. и др. Математическое моделирование как инструментарий технологии бережливого производства // Современные компьютерные технологии: Сб. материалов 5-й Науч.-метод. конф. НПР, г. Таганрог, 26–28 фев. 2024. Таганрог: ЮФУ, 2024. С. 43–47.
5. Запорожцев А.В., Хазова В.И., Хазова В.И. Улучшение производственных процессов системы менеджмента качества на основе моделирования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. № 2. С. 158–165.
6. Кукарцев В.В. Управление и оптимизация состава производственных ресурсов в условиях динамики // Системы управления и информационные технологии. 2025. № 1 (99). С. 34–40.
7. Кибешова А.В. Управление материальными запасами на предприятиях машиностроительных производств, основанное на результатах имитационного моделирования производственной среды // Тенденции развития логистики и управления цепями поставок в условиях цифровизации: Сб. ст. 5-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск: ЗАО «Университетская книга». С. 100–104.
8. Колеганова Е.А., Хаймович А.И., Ковалева А.М. Управление рисками заказного мелкосерийного производства // Изв. СамНЦ РАН. 2023. № 4 (114). С. 29–35.
9. Пузанова Т.В., Широченко В.А. Особенности разработки проекта организации производства промышленного предприятия // Вестник Белорусско-Российского университета. 2025. № 2 (87). С. 109–118.
10. Надреева Л.Л., Насонов М.А. Совершенствование мотивационного механизма управления производительностью труда на предприятии // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2022. № 2. С. 103–108.
11. Кулычева М.В. Влияние мотивации персонала на повышение производительности труда на предприятиях АПК // Студенческий. 2024. № 3-4 (257). С. 17–20.
12. Мефодьев В.Ю., Сафаргалиев М.Ф., Зилянева О.Е. О применении методов бережливого производства и менеджмента качества в организации производственных процессов на АО «Казанский вертолетный завод» // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2023. № 3. С. 38–48.
13. Учебно-имитационная игра «Завод по сборке электровыключателей»: пат. на промышленный обра- зец 128257 Рос. Федерации, № 2021500844; заявл. 19.02.2021; опубл. 12.11.2021.

Поступила в редакцию 20.09.25

DEVELOPMENT AND TESTING OF AN EDUCATIONAL SIMULATION GAME AS A TOOL FOR DEVELOPING LEAN MANUFACTURING COMPETENCIES

V.M. Babushkin, R.A. Galyamov, G.F. Mingaleev, and R.I. Salimov

The article discusses the author's development – the educational simulation game "Electric Switch Assembly Plant", aimed at developing practical skills and Lean thinking among students and specialists of enterprises. The relevance of the use of business simulations in the educational process and corporate training is substantiated. A detailed methodology for the game is presented, including a step-by-step algorithm for implementing lean manufacturing tools (5S, standardization, kaizen, balancing, pulling). A mathematical model has been developed for quantifying the efficiency of the production process in each round of the game, based on calculating the productivity coefficient, scrap rate and compliance with standards. The scientific novelty lies in the integration of the classic principles of Lean Manufacturing into a structured, measurable gameplay, which allows not only to demonstrate their effectiveness, but also to formalize learning outcomes. It is proved that the use of this game contributes to the systematic assimilation of knowledge and its subsequent application in real production activities.

Keywords: lean manufacturing, educational simulation game, business simulation, lean thinking, kaizen, production process, mathematical modeling, professional education, corporate training.

Бабушкин Виталий Михайлович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: VMBabushkin@kai.ru

Галямов Радмир Ахатович – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: RAGalyamov@kai.ru

Мингалеев Газиз Фуатович – д-р экон. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: kafedra@eupkai.ru

Салимов Радий Ильдусович – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: RISalimov@kai.ru

ИСКЛЮЧЕНИЕ КОРОБЛЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ПРИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИИ

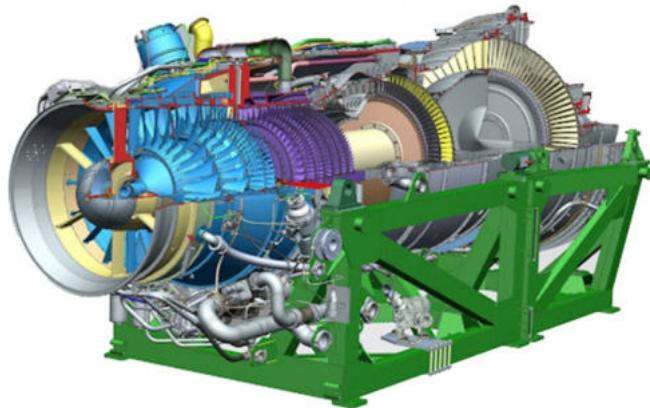
**Е.П. Круглов, Е.И. Шацилло, Э.Р. Галимов,
А.В. Беляев, Л.В. Сироткина**

Рассматривается технологический процесс штамповки лопаток турбины авиационных двигателей. Показаны недостатки существующих способов их изготовления. Предложено новое техническое решение, позволяющее исключить коробление заготовок лопаток турбины, повысить технологичность их изготовления и снизить припуски на механическую обработку.

Ключевые слова: авиационные двигатели, лопатки турбины, заготовки, технология изготовления, материалы, качество продукции.

В настоящее время в качестве источника тяги используются газотурбинные двигатели, широко применяющиеся в самолетах [1, 2], беспилотных летательных аппаратах, вертолетах, в составе судовых установок, газоперекачивающих станций и др. К конструкции современных двигателей предъявляются высокие требования по надежности, экономичности, безопасности, шумности и т.д. [1, 3–5]. Кроме того, они должны быть технологичными [6–8] и экономически выгодными в производстве, а также конкурентноспособными на рынке.

Выпускаемые авиационными заводами современные двигатели имеют достаточно сложную конструкцию, включающую как правило, входное устройство, опоры, компрессор, камеру сгорания, турбину, обвязку и др. (рисунок).



Одним из основных элементов компрессора и турбины является лопатка. В зависимости от расположения в двигателе лопатки выполняют различные функции (преобразование энергии в поток и давление, извлечение энергии из высокотемпературного газа), а также имеют разную конструкцию (форму) и условия работы (температура, нагрузка, среда). В связи с этим основные материалы для изготовления лопаток и технологии их производства отличаются (литье по выплавляемым моделям, обработка давлением и др.).

Для изготовления лопаток турбины применяются жаропрочные сплавы на никелевой основе [9] типа Жсбкп-ВД и Жсбкп-ИД, выплавляемые в открытой или вакуумной печах с последующим переплавом в вакуумной дуговой печи. Приведем химический состав сплава (ТУ 1-92-55-77): С – 0,1–0,15 %; Р ≤ 0,015%; Mn ≤ 0,4 %; Cr – 10–12 %; Si ≤ 0,4 %; Ni – основа; Fe ≤ 1,5 %; Al – 4,3–5 %; В ≤ 0,02 %; Ti 2,6 – 3,5 %; Mo – 5 – 6,5 %; Pb ≤ 0,001 %; Bi – 0,0005%; W – 3–5 %; Ce ≤ 0,015; Co – 5–9 %.

Указанные жаропрочные деформируемые сплавы широко применяются для производства литых прутковых заготовок, предназначенных для последующего переплава, штамповки и отливки деталей газовых турбин, работающих при температурах не более +950 °C.

В настоящее время штамповка лопаток, как правило, проводится на кривошипных прессах с припуском на механическую обработку 2-3 мм [10, 11]. В соответствии с технической документацией эту операцию производят при температуре 1100°C. Последующую термическую обработку выполняют при температуре 1200°C.

Из-за разницы температур штамповки и последующей термической обработки происходит коробление рабочих лопаток турбины из указанных сплавов, так как они подвергаются дополнительному нагреву. В связи с этим возникает необходимость увеличения припусков на механическую обработку с 2,0 до 10 мм, что вызывает еще большие деформации.

В результате проведения экспериментов было установлено, что коробление заготовок связано с изменением прочности металла при высокой температуре. Таким образом, термическую обработку необходимо выполнять непосредственно в штампе.

Исключение коробления штампованных заготовок лопаток турбины авиационных двигателей [12] является достаточно актуальной задачей.

Для штамповки заготовок на производстве использовался кривошипный пресс (модель КБ 8046) с усилием 39200 кН. Для нагрева заготовок под штамповку применялась электрическая печь с выкатным подом типа КЭП-ВПР3.4С/1100.

В результате был сделан вывод о том, что проводить термическую обработку заготовок необходимо в специальном штампе. При этом возникает сложность с выбором материала штампа, так как по жаропрочности и жаростойкости основные металлы уступают сплавам на никелевой основе. На практике возможно применение штампов из керамики, однако для данного материала характерна низкая пластичность и требуются значительные затраты на изготовление. В связи с этим было принято решение использовать мелкий керамический песок, применяемый для изготовления стержней при литье по выплавляемым моделям. Данный керамический песок при нагреве значительно уплотняется и создается «постель», которая полностью заменяет штамп. Такое нестандартное решение позволило исключить коробление штампованных заготовок лопаток турбины, а также снизить припуск на механическую обработку.

Технологический процесс по данному методу предполагает засыпку песка в форму, размещение на керамической массе лопатки, а также проведение термической обработки при необходимой температуре. При этом коробление заготовки полностью исключается. Данный технологический прием позволил снизить припуск на механическую обработку в пределах точности штамповки (на практике до 2 мм), а также увеличить коэффициенты использования материала и заготовки.

Таким образом, предложенный способ изготовления рабочих лопаток турбины газотурбинного двигателя с применением керамического песка способствует уменьшению коробления, а также значительно снижает припуск на механическую обработку. Благодаря этому повышаются технологичность [13] изготовления лопаток и общая надежность изделия, снижаются расходы основных и вспомогательных материалов, сокращается трудоемкость, что способствует увеличению конкурентной способности [14] авиационных двигателей на рынке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование самолетов / Под ред. М.А. Погосяна. М.: Инновационное машиностроение, 2018. 864 с.
2. Калугин В.Г. Основы внешнего проектирования авиационных комплексов. М.: Травиант, 2011. 264 с.
3. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. М.: Машиностроение, 2008. 207 с.
4. Братухин А.Г., Решиетников Ю.Е., Иноземцев А.А. Основы технологии создания газотурбинных двигателей для магистральных самолетов. М.: Авиатехинформ, 1999. 554 с.
5. Ермолаев В.М. и др. Проектирование двигателей летательных аппаратов / Казан. авиац. ин-т. Казань, 1972. 205 с.
6. Круглов Е.П. и др. Бестигельное литье лопаток турбины на установках полунепрерывного подогрева формы // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2019. №4. С. 65–67.
7. Круглов Е.П. и др. Повышение качества и устранение дефектов аргонодуговой сварки // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2023. № 2. С.49–52.

8. Безъязычный В.Ф., Крылов В.И., Полетаев В.А. Автоматизация технологии изготовления газотурбинных авиационных двигателей. М.: Машиностроение, 2005. 556 с.
9. Каблов Е.Н. и др. Авиационные материалы: Юбилейный науч.-техн. сб. М.: МИСИС; ВИАМ, 2002. 423 с.
10. Блиннов Ф.Т., Фираго В.П. Технология механической обработки деталей авиадвигателей. М.: Оборонгиз, 1951. 532 с.
11. Ермолов В.М. и др. Проектирование двигателей летательных аппаратов / Казан. авиац. ин-т. Казань, 1972. 205 с.
12. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрецкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. М.: Машиностроение, 2008. 207 с.
13. Амиров Ю.Д. и др. Технологичность конструкции изделия: справочник. М. Машиностроение, 1990. 768 с.
14. Фатхутдинов Р.А. Управление конкурентоспособностью организации. М.: Эксмо, 2005. 544 с.

Поступила в редакцию 21.05.25

ELIMINATION OF TURBINE BLADE WARPING DURING THEIR MANUFACTURING

E.P. Kruglov, E.I. Shatsillo, E.R. Galimov, A.V. Belyaev, and L.V. Sirotkina

The paper examines the technological process of stamping turbine blades for aircraft engines. The shortcomings of existing manufacturing methods are shown. A new technical solution is proposed that allows eliminating warping of turbine blade blanks, increasing the manufacturability of their manufacture and reducing allowances for mechanical processing.

Keywords: aircraft engines, turbine blades, blanks, manufacturing technology, materials, product quality.

Круглов Евгений Петрович – канд. техн. наук (ЗАО «Мелита-К», Казань)
E-mail: kruglov3105@yandex.ru

Шацилло Евгений Игоревич – генеральный директор (ЗАО «Мелита-К», Казань)
E-mail: contact@melitak.ru

Галимов Энгель Рафикович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: ERGalimov@kai.ru

Беляев Алексей Витальевич – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: AVBelyaev@kai.ru

Сироткина Лилия Витальевна – канд. хим. наук (КГЭУ, Казань)
E-mail: liliya_belyaeva@mail.ru

АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СТАЛЕЙ ГАЗОПРОВОДНЫХ ТРУБ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

И.В. Лапин

Проведено исследование изменений структуры и свойств материала, способных повлиять на длительность эксплуатации труб газопровода и выявление дефектов в испытуемых образцах. Определен химический состав сплавов труб, получены результаты и проанализированы металлические и неметаллические компоненты составляющих, описано их влияние на свойства стали. Металлографическим анализом исследована структура представленных образцов сталей труб, определены и проанализированы характеристики микроструктур шлифов. Проведены испытания твердости и прочности на растяжение образцов стали. По полученным результатам определена числовая оценка снижения твердости и прочности после длительной эксплуатации труб.

Ключевые слова: химический анализ, микроструктура, прочность, твердость, эксплуатация, металл трубы, микрошлиф, трубопровод, углерод, феррит, перлит.

В процессе длительной эксплуатации газопроводы подвергаются воздействию агрессивной среды и постоянно действующих эксплуатационных нагрузок. В связи со сложными условиями эксплуатации ухудшаются свойства стали, снижается работоспособность всего объекта, следовательно, возрастаёт риск его преждевременного выхода из строя. С учетом важности существующей проблемы целью данного исследования является анализ различных механических свойств сталей после их длительной эксплуатации на газопроводах, а также выявление признаков понижения их качества [1].

Механические свойства эксплуатируемых трубных сталей, характеризующие их стойкость к хрупкому разрушению, существенно снижаются.

На поверхностях образцов эксплуатируемых сталей в агрессивной среде могут быть выявлены участки расслоения как один из признаков хрупкого разрушения.

Разрушение с внешней поверхности образцов по границам зерен феррита и перлита со значительным вторичным растрескиванием заметно влияет на результаты испытаний на удар. Значения ударной вязкости образцов, вырезанных в продольном направлении относительно оси трубы, выше по сравнению с образцами поперечной ориентации. Это объясняется различной длиной узких полосок перлита, чередующихся с широкими полосами феррита и прерываемых отдельными зернами феррита в зависимости от ориентации поверхности образца относительно оси трубы. Дефекты, накапливающиеся в сталях за время их эксплуатации, преимущественно ориентированы в осевом направлении трубы вдоль границ между ферритными и перлитными полосками [2].

Для проведения исследований с целью оценки механических свойств металла трубопроводов после длительной эксплуатации были представлены четыре образца стали труб газопроводов с различными диаметрами от 530 до 1420 мм и толщинами стенок от 7,5 до 15,7 мм, до и после 30 летней эксплуатации в различных средах. Все образцы были отобраны из трубопроводов согласно ГОСТ 30432-96.

Определение химического состава образцов производилось по ГОСТ Р 550792012 и ГОСТ 22536.2-87 в лаборатории с помощью спектрометра эмиссионного с индуктивно-связанной плазмой AVIO 500 и элементного анализатора СКИС 5Е-CHN2200.

Для металлографического исследования механической подготовкой и последующим травлением были приготовлены микрошлифы. Исследования проводились на тринокулярном инвертированном металлографическом микроскопе БиОптик СМІ-400 с цифровой камерой. Металлографическим анализом была исследована микроструктура образцов стали труб, определяется величина, расположение зерен, осуществляется контроль состояния структуры поверхностного слоя, выявляются микродефекты и дефекты кристаллического строения, неметаллические и графитовые включения.

Испытания образцов стали на твердость проводились по ГОСТ 22761-77 на твердомере Бринелля марки НВ 3000 с нагрузкой 29419,95 Н, диаметр индентора – 10 мм, время выдержки – 10 с.

Испытания образцов на прочность при растяжении проводились при комнатной температуре в соответствии с ГОСТ 1497-84 на разрывной машине ИР 5040-5-11 (PM50). Образцы для испытания вырезаны по оси трубы и приведены к плоской форме в виде лопатки согласно ГОСТ 10006-80.

Согласно анализу химического состава сплавов (табл. 1) определено количество элементов стали (железа и углерода), а также элементов легирования (хрома, марганца, никеля, кремния). Сопутствующими вредными неметаллическими включениями в составе сталей являются фосфор (содержание менее 0,01) и сера (содержание менее 0,02), превышение их содержания при анализе не выявлено.

Таблица 1

Определяемый компонент, мас. %	Номер образца				Нормативная документация
	1	2	3	4	
Fe	96,4	98,00	98,08	97,75	По технологии ГОСТ Р 55079-2012
Cr	0,3	0,02	0,08	0,07	
Mn	2,23	1,91	1,81	2,27	
Ni	0,02	0,05	0,06	0,06	
Si	0,22	0,39	0,38	0,43	
P	менее 0,01	0,01	менее 0,01	менее 0,01	
S	0,012	0,02	0,02	0,02	ГОСТ 22536.2-87
C	0,39	0,38	0,36	0,34	ГОСТ 22536.1-87

В результате химического анализа установлено, что представленные образцы сталей относятся к классу конструкционных высококачественных, т. е. содержание фосфора и серы менее 0,025 % [1]. По содержанию углерода и химическому составу в целом стали образцов № 1–4 соответствуют марке стали 35Г2 (углерод 0,31–0,39 %), но в них немного завышен показатель содержания кремния, который должен составлять 0,17–0,37 %, что указывает на улучшение упругих свойств и сопротивление коррозии. Также завышено показание марганца, которое должно быть 1,4–1,8 %. Небольшим недостатком при содержании марганца более 2 % является то, что для ручной дуговой сварки необходим подогрев и последующая термообработка, для контактной – последующая термообработка после сварки.

Из стали 35Г2 изготавливаются толстостенные бесшовные горячедеформированные трубы больших давлений для транспортирующих веществ при эксплуатации в нефтегазовой промышленности.

В образце № 1 немного повышенено содержание марганца 2,23 %, т. е. образец имеет отношение к конструкционной низколегированной высококачественной стали. При введении в сталь марганца более 2 % наблюдается заметное снижение ударной вязкости, но повышенное содержание марганца увеличивает прокаливаемость и предел текучести, уменьшает вредное влияние кислорода и серы при растяжении, увеличивает прочность и глубину прокаливаемости, тем самым оказывается благоприятное влияние на ковкость и свариваемость материала. Положительное влияние марганца особенно заметно проявляется при пониженном содержании углерода [3].

Посредством металлографического анализа была рассмотрена структура поверхностного слоя исследуемых образцов.

На рис. 1 при 400-кратном увеличении представлено изображение микрошлифа образца № 1, где видно равномерное хаотичное распределение зерен перлита различной глобуллярной формы в ферритной основе.

На рис. 2 при 400-кратном увеличении представлен микрошлиф № 2 в поперечном разрезе, выражены вытянутые (полосчатые) зерна перлитных включений, что может говорить о горячекатаном методе производства исследуемых материалов труб.

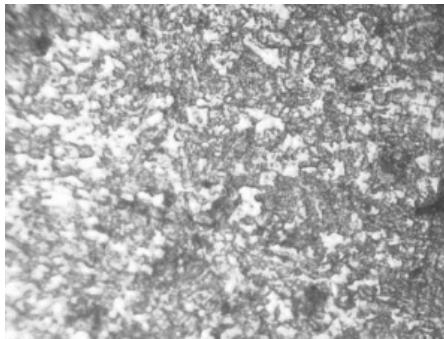


Рис. 1



Рис. 2

Изменение структуры при 400-кратном увеличении не выявлено (см. рис. 2). При более значительной деформации, например, стали 35Г2, зерна перлита ориентируются вдоль направления деформации, образуя строчки. Структура представляет собой достаточно однородное строение и не имеет сульфидных включений. В структуре этой стали после эксплуатации выявлена выраженная текстура, состоящая из полос ферритных и перлитных зерен. Текстура обнаружена как в осевом, так и в радиальном сечениях трубы. Зерна перлита и феррита в целом сохранили полигональную форму. Размер зерен был неравномерным, что особенно было заметно в радиальном направлении трубы. В обоих состояниях стали (при поступлении и в длительной эксплуатации) более тонкие полоски перлита (до 10 мкм) перемещались более широкими полосами феррита (до 28 мкм). Полоски перлита в осевом сечении стальной трубы в исходном состоянии имели длину до 2,5 мм и были практически сплошными. Напротив, непрерывность полос перлита в радиальном направлении труб часто прерывалась, образуя отдельные ферритовые зерна, поэтому длина сплошных полос перлита в этом сечении трубы не превышала 120 мкм.

Структурным признаком пластической деформации является изменение формы зерен. Дендриты вытягиваются, т. е. в структуре видны полосы, сформировавшиеся в процессе течения материала. Из этого следует, что трубы были получены горячей прокаткой [4].

При исследовании микрошлифа № 3 при 400-кратном увеличении выявлено образование двухфазной структуры перлита и феррита (рис. 3). Темные участки представляют собой перлитную структуру металла, светлые зерна – ферритную структуру. В структуре превалируют ферритные зерна, что образует менее твердую и не совсем однородную структуру.

По результатам металлографического исследования образца № 4 при 400-кратном увеличении (рис. 4), в структуре металла присутствует небольшая ликвация, преобладает ферритная фаза, что определяет понижение твердости и повышение прочности металла.

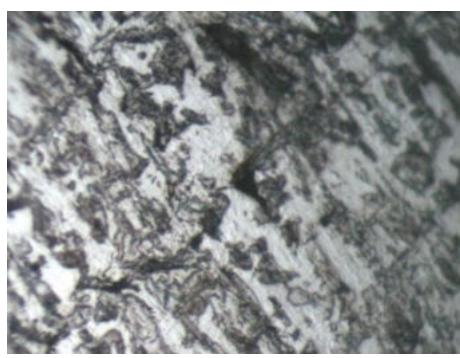


Рис. 3

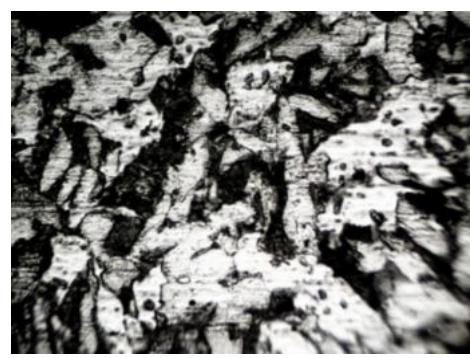


Рис. 4

Удельная площадь зерен феррита многократно превышает удельную площадь перлитных зерен. Это означает, что образец выполнен из доэвтектоидной стали с преобладанием ферритной фазы и может иметь пониженные механические свойства (например, твердость), которые представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения твердости стали труб	Номер образца			
	1	2	3	4
Твердость до эксплуатации, МПа·10 ⁻¹	217,5	210,5	195,2	190,1
Твердость после эксплуатации, МПа·10 ⁻¹	199,46	179,05	158,5	156,03
Показатели потерь твердости, %	8,2	14,9	18,8	17,9

Основной механической характеристикой испытания исследуемых образцов сталей трубопровода является их твердость [5]. По результатам испытания образцов труб на твердость до и после длительной эксплуатации были определены их числовые значения. Показатели потерь твердости после длительной эксплуатации четырех образцов составили 8,2–18,8 %.

Также одной из главных характеристик для исследования качества стали труб являются испытания прочности металлов на растяжение.

Толщина исследуемых образцов составляет 7,5–15,7 мм с учетом толщины стенки труб (табл. 3).

Таблица 3

Характеристики и механические свойства труб	Номер образца			
	1	2	3	4
Диаметр трубы, мм	1420	1020	720	530
Толщина стенки, мм	15,7	14	7,5	8
Предел прочности до эксплуатации, σ_b^0 , МПа	588	529,2	510	520,6
Предел прочности после эксплуатации, σ_b , МПа	573,3	510,8	465,9	445,6
Потеря прочности, %	2,5	3,5	8,7	14,3

Можно сделать вывод о том, что такие факторы, как возникновение концентратов напряжений (вследствие неглубокой коррозии), либо большие объемы транспортировки и рабочее давление носителя (в условиях эксплуатации) повлияли на уменьшение прочностных характеристик металла труб [2].

Сравнительный анализ прочностных характеристик на растяжение исследуемых образцов до и после тридцатилетней эксплуатации труб выявил снижение предела прочности на 2,5–14,3 % (см. табл. 3).

На рис. 5 показаны результаты прочности на растяжение образцов труб до и после тридцатилетней эксплуатации.

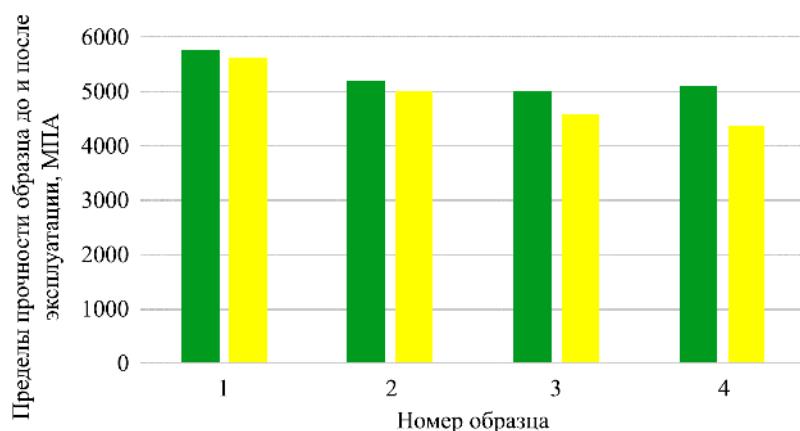


Рис. 5

Таким образом, определение химического состава сплава позволило провести количественный анализ элементов стали четырех образцов труб, т. е. определить содержание углерода, хрома, марганца, никеля, кремния, а также содержание неметаллических вредных примесей, которые находятся в норме (для фосфора не более 0,01; для серы не более 0,02). По этим показателям стали относятся к высококачественным.

По химическому составу были подобраны марки стали, т. е. образцы № 1–4 относятся к 35Г2 (углерод 0,31–0,39 %).

Проведенный металлографический анализ выявил определенную структуру металла исследованных труб, обозначен тип и размер зерен феррита и перлита, а также определены однородность и дефектность микроструктуры в рассмотренных шлифах.

Определение твердости по Бринеллю (см. табл. 2) выявило значительное понижение твердости образцов трубных сталей после длительной эксплуатации (8,2–18,8 %).

Механические испытания образцов труб на растяжение (см. табл. 3) определили пределы прочности стальных труб до и после тридцатилетней эксплуатации. Потери прочности составили 2,5–14,3 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кашапов А.Р. и др.* Анализ деградации механических свойств металла трубопроводов после длительной эксплуатации // Сб. тез. 14-й науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов ООО «Газпром трансгаз», г. Казань, 19–22 дек. 2023. Казань: КНИТУ, 2023. С. 67–72.
2. *Гредил М.И.* Эксплуатационная деградация сталей магистральных газопроводов // Металлофизика и новейшие технологии. 2008. № 46. С. 397–406.
3. *Анисович А.Г., Андрушевич А.А.* Структуры металлов и сплавов в технологических процессах машиностроения. Минск: Беларуская наука, 2018. 134 с.
4. *Филиппов Г.А. и др.* Деградация трубной стали в процессе эксплуатации и сопротивление хрупкому разрушению // Металлург. 2013. № 57. С. 612–622.
5. *Аскарова Р.Н., Шайхетдинова Р.С., Бронская В.В.* Определение твердости и коэффициента шероховатости при механической обработке деталей из ст45 // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы: Материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф., г. Казань, 8 дек. 2022. Казань: КНИАТ, 2022. С. 14–17.

Поступила в редакцию 20.09.25

ANALYSIS OF CHEMICAL COMPOSITION, STRUCTURE AND PROPERTIES OF GAS PIPES STEELS AFTER LONG-TERM OPERATION

I.V. Lapin

A study was conducted to investigate changes in the structure and properties of materials that could impact the service life of gas pipeline pipes and identify defects in test specimens. The chemical composition of the pipe alloys was determined, the results obtained, and the metallic and non-metallic components analyzed, their impact on the steel properties described. Metallographic analysis was used to study the structure of the pipe steel samples, and the microstructural characteristics of the thin sections were determined and analyzed. Hardness and tensile strength tests were conducted on the steel samples. Based on the results, a numerical estimate was obtained for the reduction in hardness and strength after long-term pipe service.

Keywords: chemical analysis, microstructure, strength, hardness, operation, pipe metal, microsection, pipeline, carbon, ferrite, pearlite.

Лапин Илья Владимирович – ст. преподаватель (КНИТУ, Казань)
E-mail: ilya.lapin.69@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ СКЛАДОВ ПРЕДПРИЯТИЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ТОРГОВЛИ

В.Л. Федяев, А.В. Беляев, Р.В. Федяев

Рассмотрены актуальные вопросы повышения эффективности работы складских систем предприятий промышленности, торговли. В результате их анализа выделены стоимостные и натуральные группы показателей эффективности. В данной статье внимание акцентируется на первых из них, для математического описания рассматриваемой системы используются основные положения теории массового обслуживания. При этом наибольшая эффективность системы будет в случае, когда сумма затрат на компенсацию убытков от простоя автомобилей, содержание бригад грузчиков минимальна. С учетом данных обстоятельств сформулирована оптимизационная задача, получены соотношения для оценки минимальных затрат, определения оптимального количества бригад грузчиков, которые характеризуют зависимость указанных показателей от укомплектованности системы, величины убытков при простое бригад грузчиков, их нормативной численности, количества и производительности пунктов разгрузки-погрузки, оборудованных соответствующими средствами разгрузки, механизации, автоматизации.

Ключевые слова: предприятия промышленности и торговли, складские системы, математическое моделирование, минимизация затрат.

Склады, складские системы предприятий промышленности, торговли предназначены в первую очередь для хранения продукции, товаров таким образом, чтобы, во-первых, обеспечить их сохранность, во-вторых, предоставить возможность рациональной организации пополнения, складирования, а также отгрузки продукции, товаров.

Согласно работам [1, 2] критерий технико-экономической эффективности организации, механизации, автоматизации (роботизации) разгрузочно-погрузочных, подъемно-транспортных, складских работ характеризуется финансовыми, материальными и трудовыми затратами. Соответственно, выделяют две группы показателей – стоимостные (денежные) и натуральные.

Стоимостные показатели определяются капитальными и годовыми эксплуатационными расходами.

Вместе с тем для всесторонней, полной, объективной оценки технико-экономической эффективности данных систем в дополнение к стоимостным показателям необходимо рассмотреть три вида натуральных показателей: уровень организации, механизации, автоматизации складских работ; степень механизации и автоматизации (роботизации) труда; производительность труда.

Натуральный показатель Q_M определяется отношением объема механизированных, автоматизированных работ A_M к общему объему работ A_0 , выполняемых на складах:

$$Q_M = (A_M / A_0) 100 \%$$

Степень механизации и автоматизации (роботизации) труда Q_R оценивается приближенно отношением численности рабочих и специалистов R , занятых на механизированных, автоматизированных работах, к общей численности работников R_0 :

$$Q_R \approx (R / R_0) 100 \%$$

Отметим, что этот показатель дополняет показатель Q_M .

Показатель производительность труда Q_T тесно связан с предыдущими. Он комплексно оценивает степень механизации и автоматизации, совершенство применяемых технологий, используемых машин, оборудования, квалификацию рабочих и специалистов, уровень организации труда. Соотношения для оценки, расчета указанных, а также ряда других показателей приводятся, в частности, в работах [1, 3].

Далее акцентируется внимание на вопросах эффективной организации работы складских систем, характеризуемых годовым объемом поступлений, числом потребителей, поставок, временным интервалом между поставками и т. д.

Основными направлениями совершенствования организации этих работ является внедрение логистики, вследствие чего создаются условия рационального использования транспортных средств, грузовых ресурсов и погрузочно-разгрузочного оборудования [3, 4], а также применение методов математического моделирования [5–7], производственной оптимизации [8–10], цифровых технологий, в частности линейного программирования [11–13].

В качестве примера рассмотрим складское предприятие, где реализуется технологическая схема «склад – погрузчик – автомобиль» [2–4]. Обслуживание потребителей осуществляется укрупненными комплексными бригадами транспортно-складских рабочих (грузчиков). Для математического описания функционирования данного предприятия воспользуемся методами теории массового обслуживания, согласно которым функционирование предприятия представляет собой процесс поступления требований от m объектов в систему, состоящую из n обслуживающих аппаратов. При этом качество обслуживания характеризуется математическим ожиданием числа M_a простояющих автомобилей и математическим ожиданием числа M_b простояющих бригад грузчиков.

Согласно закону Пуассона вероятность P_m того, что m автомобилей будет прибывать на предприятие в течение времени обслуживания t_m , определяется соотношением

$$P_m = P_m(t_m) = (\lambda t_m)^m \exp(-\lambda t_m) / (m!) ,$$

где $\lambda = m/t_m$ – отношение общего числа автомобилей, прибывших на предприятие под обработку, к периоду t_m ; $(m! = 1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot m)$ – факториал.

В отличие от времени t_m , время обработки t_b автомобилей одной бригадой грузчиков определяется зависимостью

$$t_b = M_0 / \lambda ,$$

где M_0 – математическое ожидание времени обработки автомобилей ($t_b < t_m$).

При этом $\bar{\lambda} \bar{t}_b \leq n$. Здесь параметры $\bar{\lambda}$, \bar{t}_b – среднее число автомобилей, прибывших на предприятие, и время обработки автомобиля. В таком случае $\bar{\lambda} \bar{t}_b = k$ – среднее количество комплексных бригад грузчиков.

Очевидно, с увеличением количества бригад грузчиков убытки от простоя их растут, однако убытки, связанные с простоем автомобилей, уменьшаются.

Сформулируем задачу, в которой искомым оптимизируемым параметром будет k – число бригад грузчиков, а критерием оптимальности – сумма $S_s = S_s(k) = S_a(k) + S_b(k)$, где $S_a(k)$ – потери (убытки), вызванные простоем автомобилей; $S_b(k)$ – расходы по предприятию, связанные с простоем бригад грузчиков.

Наряду с этими показателями, выраженными в рублях, возможно использование удельных показателей, руб/ч:

$$R_s = R_s(k) = R_a(k) + R_b(k) , \quad (1)$$

где согласно работе [3]

$$R_a = R_a(k) = \lambda P E_a / (n v - \lambda) ; R_b = R_b(k) = M_b E_b .$$

В этих соотношениях вероятность занятости всех аппаратов обслуживания

$$P = P_0 \lambda^n / \left((n-1)! \cdot (n v - \lambda) \cdot v^{(n-1)} \right) ;$$

вероятность того, что все бригады грузчиков свободны

$$P_0 = 1 / \left(\sum_{m=0}^{n-1} \left(\frac{1}{m!} \left(\frac{\lambda}{v} \right)^m \right) + \frac{v}{(n-1)! (n v - \lambda)} \left(\frac{\lambda}{v} \right)^n \right) ;$$

математическое ожидание числа пристаивающих бригад грузчиков

$$M_b = P_0 \sum_{m=0}^{n-1} \left(\frac{n-m}{m!} \left(\frac{\lambda}{v} \right)^m \right),$$

$v = 1/\bar{t}_b$; E_a , E_b – убытки при простое автомобиля, бригады грузчиков в течение часа, руб/ч.

Поскольку параметр k – дискретная величина, решение этой оптимизационной задачи усложняется. В связи с этим целесообразно (полагая в выражении для оценки необходимого числа бригад грузчиков k , что величина $\bar{\lambda} = \lambda$, $\bar{t}_b = 1/v$) выбрать в качестве варьируемого параметра непрерывную переменную $r = \lambda/v$. Соответственно, соотношения для функций R_a , R_b , P , P_0 можно записать в виде

$$\begin{aligned} R_a &= R_a(r) = E_a \left\{ rP(r)/(n-r) \right\}; \\ R_b &= R_b(r) = E_b \left\{ P_0(r) \sum_{m=0}^{n-1} ((n-m)r^m/m!) \right\}; \\ P &= P(r) = \left\{ P_0(r)r^n/(n-1)!(n-r) \right\}; \\ P_0 &= P_0(r) = 1 \left/ \left\{ \sum_{m=0}^{n-1} (r^m/m!) + r^m/((n-1)!(n-r)) \right\} \right. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь в фигурных скобках выделены функции, зависящие от параметра r . Их непосредственное дифференцирование по r , решение относительно r соответствующего уравнения, характеризующего оптимальные значения r^* этого параметра, затруднительно. С целью упрощения задачи предположим, что в выражениях $P_0(r)$ и $R_b(r)$ суммы

$$\begin{aligned} \sum_{m=0}^{n-1} (1/m!)r^m &\approx 1 + k_0(r^{(n-1)})/(r-1); \\ \sum_{m=0}^{n-1} ((n-m)/m!)r^m &\approx n + k_1(r^{(n-1)} - 1)/(r-1), \end{aligned}$$

где $k_0 = k_0(n) = \sum_{m=1}^{n-1} (1/m!)/(n-1)$, $k_1 = k_1(n) = \sum_{m=1}^{n-1} ((n-m)/m!)/(n-1)$ – средние значения.

Отсюда

$$R_a(r) \approx E_a \left(\frac{r^{(n+1)}}{(n-1)!(n-r)} \right) / H_0(r); \quad R_b(r) \approx E_b \left(n + k_1 \left(\frac{r^{(n-1)} - 1}{r-1} \right) \right) / H_0(r), \quad (3)$$

функция $H_0 = H_0(r) = 1 + k_0 \left(\frac{r^{(n-1)} - 1}{r-1} \right) + \frac{r^m}{(n-1)!(n-r)}$.

С учетом упрощенных выражений для k_0 , k_1 соотношения (3) запишем в виде

$$\begin{aligned} R_a(r) &= E_a H_a(r) / ((n-r)H_0(r)); \\ R_b(r) &= E_b H_b(r) / ((r-1)H_0(r)), \end{aligned}$$

где $H_a(r) = r^{(n+1)} / (n-1)!$; $H_b(r) = n(r-1) + k_1(r^{(n-1)} - 1)$.

Соответственно, аналогом (1) будет зависимость

$$R_s = R_s(r) = R_a(r) + R_b(r) = (E_a(r-1)H_a(r) + E_b(n-r)H_b(r))F_0(r),$$

где $F_0(r) = 1 / ((r-1)(n-r)H_0(r))$.

Данное соотношение достаточно громоздкое, его можно несколько упростить, если выбрать в качестве характерного значения r_0 параметра r такое, чтобы величина $\varepsilon = r/r_0$ была бы меньше единицы. При этом с точностью до малых первого порядка малости функция $F_0(r) \approx -1 + (k_0 - 1)r$, т.е. приблизительно $F_0(r) = -1$. Таким образом, с приемлемой точностью в качестве критерия оптимальности рассматриваемой задачи можно взять функцию

$$R_s = R_s(r) \approx E_a(r-1)H_a(r) + E_b(n-r)H_b(r), \quad (4)$$

характеризующую убытки, вызванные простое автомобилей и бригад грузчиков.

Поскольку ранее в качестве варьируемого параметра выбрана переменная r , из условия минимума функции $R_s(r)$, представляющего собой уравнение $dR_s(r)/dr = 0$, после ряда преобразований получим выражение для определения оптимального параметра r^* :

$$\alpha_a r^2 h_a(r) - \alpha_b h_b(r) = 0, \quad (5)$$

где коэффициенты $\alpha_a = E_a/(n-1)!$, $\alpha_b = nk_1 E_b$; функции $h_a(r) = (2+n)r - 1 - n$, $h_b(r) = r + 1 - n$.

Учитывая, что при больших n коэффициент α_a может быть малой величиной, для решения уравнения (5) воспользуемся методом последовательных приближений, полагая, что первое приближение r_1 – решение уравнения $h_b(r) = 0$, т.е. $r_1 = n - 1$. Соответственно, второе приближение r_2 – решение уравнения

$$\alpha_b h_b(r) = \alpha_a r_1^2 h_a(r_1),$$

которое имеет вид

$$r_2 = (n-1) \left(1 + (\alpha_a / \alpha_b) (n-1) (n^2 - 3) \right). \quad (6)$$

При необходимости это решение можно уточнить, однако для инженерной практики, по крайней мере, в качестве предварительной оценки оптимального решения r^* соотношение (6) вполне применимо.

Так как целая часть r характеризует количество бригад грузчиков, оптимальное число их будет (квадратные скобки означают целую часть числа):

$$k^* = \left[r^* \right] = \left[(n-1) \left(1 + (\alpha_a / \alpha_b) (n-1) (n^2 - 3) \right) \right]. \quad (7)$$

Полученное решение (7) оптимизационной задачи во многом определяется количеством имеющихся на предприятии площадок (обслуживающих аппаратов n), а также показателями убытков при простое автомобилей, бригад грузчиков, соответственно, E_a , E_b .

На складских предприятиях в силу разных причин значимость составляющих в критерии оптимальности (4), характеризующих убытки от простое автомобилей (первое слагаемое) и простое бригад грузчиков (второе слагаемое), может меняться. Учесть это обстоятельство можно, в частности, заменив критерий (4) на обобщенный, включающий безразмерные множители, назначаемые экспертино, причем такие, что сумма их равняется единице [7, 8]. В результате при неизменных прочих показателях оптимальное решение (7) будет обоснованно скорректировано.

Кроме того, предложенный подход оптимизации работы складской системы «склад – погрузчик – автомобиль», в принципе, распространим на другие сложные технические системы, когда стоят задачи повышения эффективности работы не только подразделений промышленных предприятий, торговли, но и других отраслей хозяйства. При этом имеются в виду системы, в которых выполняется последовательно ряд технологических операций, используются средства механизации, автоматизации, возможно, робототехники, участвуют группы рабочих, специалисты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коновалов В.С. Организация, механизация и экономика заводского транспорта. М.: Машиностроение, 1980.312 с.
2. Волков О.И., Скляренко В.К. Экономика предприятия: Курс лекций. М.: Инфра-М, 2004.280 с.
3. Неруш Ю.М. Логистика. М.: Юнити-Дана, 2004. 195 с.
4. Секерин В.Д. Логистика. М.: Кнорус, 2011.240 с.
5. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике. М.: МГТУ, 2003.496 с.
6. Понtryagin L.S. и др. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1983.392 с.
7. Федяев В.Л., Галимов Э.Р., Беляев А.В. Ресурс пористых технических материалов. Казань: АН РТ, 2022.136 с.
8. Ахмадиев Ф.Г., Гиззятов Р.Ф., Гильфанов Р.М. Математическое моделирование. Методы оптимизации. Вычислительный эксперимент. Казань: АН РТ, 2021.492 с.
9. Федяев В.Л., Галимов Э.Р., Беляев А.В. Математическое моделирование процессов термической обработки рабочих поверхностей деталей и изделий. Казань: АН РТ, 2019.240 с.
10. Осипов П.П. Методы оптимизации с примерами решения задач. Казань: АНРТ, 2024.276 с.
11. Hyder J., Hassini E. Optimizing Warehouse Space Allocation to Maximize Profit in the Postal Industry // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2025. Vol. 195. № 103924. P. 1–20.
12. Mohd Radzi Mohd Daud, Mohd Hafiz Zulfaka. Optimization of Warehouse Operations for Upstream Service Companies in the Oil & Gas Industry: A Case Study // Information Management and Business Review. 2024. Vol. 16. № 3. P. 424–439.
13. Mohd K.O. et al. Warehouse Operations Optimisation through the Implementation of Lean Methodology: A Comprehensive Review // Multidisciplinary Reviews. 2025. № 8. P. 1–12.

Поступила в редакцию 17.09.25

OPTIMIZATION OF WAREHOUSE OPERATION IN INDUSTRIAL AND TRADE ENTERPRISES

V.L. Fedyaev, A.V. Belyaev, and R.V. Fedyaev

This article examines current issues related to improving the efficiency of warehouse systems in industrial and commercial enterprises. Their analysis yields cost-based and physical performance indicators. This article focuses on the former, using the fundamental principles of queuing theory for a mathematical description of the system under consideration. The system will be most efficient when the costs of compensating for losses from vehicle downtime and maintaining loading crews are minimal. Taking these circumstances into account, an optimization problem is formulated, and relationships are derived for estimating minimum costs and determining the optimal number of loading crews. These relationships characterize the dependence of these indicators on the system's staffing level, the magnitude of losses due to loading crew downtime, the standard number of loading crews, and the number and productivity of loading/unloading points equipped with the appropriate unloading, mechanization, and automation equipment.

Keywords: industrial and trade enterprises, warehouse systems, mathematical modeling, cost minimization.

Федяев Владимир Леонидович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань; ИММ ФИЦ КазНЦ РАН, Казань)
E-mail: vlfed2020@gmail.com

Беляев Алексей Витальевич – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: alexey-belyaev@mail.ru

Федяев Родион Владимирович – магистр (Московский университет им. С.Ю. Витте, Москва)
E-mail: fedyaevrodion2003@gmail.com

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАДРОВОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ОРГАНИЗАЦИИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

Э.Э. Шарафутдинова

Рассмотрены основные аспекты обеспечения безопасности в организации, в частности, кадровой безопасности. Проанализированы основные факторы, оказывающие влияние на кадровую безопасность организации. Выявлены основные внутренние угрозы в отношении персонала и со стороны собственного персонала организации. Представлены рекомендации по отражению существующих и потенциальных внутренних угроз безопасности в организации машиностроительной отрасли (ООО «Казаньсельмаш», Казань).

Ключевые слова: кадровая безопасность, угрозы безопасности, кадровые риски, управление, производство, персонал, машиностроительная отрасль.

Трудности, с которыми сталкивается экономика, и введенные ограничительные меры в отношении России могут наносить значительный ущерб экономической ситуации, в том числе оказывать негативное влияние на отрасль машиностроения. В связи с этим в настоящее время особенно актуальна проблема повышения уровня экономической безопасности в организации по всем ее направлениям (информационные технологии, бизнес-пространства, материальные ресурсы, финансовые ресурсы, сотрудники). В частности, необходимо обеспечение кадровой безопасности в организации машиностроительной отрасли.

Немногие промышленные предприятия имеют потенциал к сохранению деятельности в период сложнейших экономических реформ, тем более к обеспечению устойчивого развития [1, с. 90]. Согласно работе [2] целью обеспечения безопасности в организации «является достижение максимальной стабильности функционирования организации, а также создание основы и перспектив роста для выполнения целей организации, вне зависимости от объективных и субъективных угрожающих факторов (негативных воздействий, факторов риска)».

Проблема обеспечения кадровой безопасности является важнейшей для любой организации. Именно персонал является первичным ресурсом, который влияет на кадровую, экономическую, информационную и другие виды безопасности в организации. В этом контексте важное значение приобретает психологическая надежность сотрудников организации отрасли машиностроения, т. е. индивидуально-психологические особенности субъектов трудовой деятельности. Производственный персонал выступает в данном случае носителем рисков (как реальных, так и потенциальных), а также сам может являться объектом угроз извне.

Необходима своевременная оценка кадровых рисков, диагностика персонала, оценка его психологической надежности на разных стадиях персонал-менеджмента. Основные персонал-технологии – оперативные мероприятия по оценке и мониторингу персонала на стадии отбора и подбора персонала на вакантные должности, на этапе адаптации сотрудников и планирования их карьеры, оценки и аттестации сотрудников, на этапе профессионализации, планирования увольнения сотрудников и выхода на пенсию. Особенno важен этап отбора и подбора сотрудников.

Все это способствует обеспечению безопасности организации и возможности своевременного отражения возникающих угроз как в адрес сотрудников организации, так и со стороны собственных сотрудников, которые по различным причинам могут нанести ущерб ее имущественным и неимущественным интересам. Имущественную безопасность рассматривают как совокупность действий для обеспечения защиты имущества организации, поскольку возможны хищения, уничтожение и повреждение имущества организации. Неимущественная безопасность чаще всего связана с информационной и кадровой безопасностью организаций.

Согласно исследованию [3] кадровая безопасность представляет собой «защищенность персонала от внешних и внутренних угроз с целью обеспечения условий для эффективного персонал-менеджмента и, как следствие, высокого уровня конкурентоспособности организации». Факторы, оказывающие влияние на кадровую безопасность организации, классифицируются (внешние и внутренние). К внутренним

факторам относят [3] низкий уровень социальной ответственности собственников и менеджмента организации; отсутствие корпоративной культуры; неэффективность контроля на этапах подбора и отбора персонала, отсутствие грамотной политики высвобождения работников, отсутствие внутренней нормативно-правовой базы в области обеспечения безопасности бизнеса, отсутствие эффективной системы обучения персонала основам противодействия угрозам кадровой безопасности, неэффективную систему мотивации добросовестного поведения персонала.

Необходимо комплексное воздействие на реальные и потенциальные риски кадровой безопасности организации, которые не позволяют ей в полной мере эффективно функционировать под влиянием внешних и внутренних факторов.

Кадровая безопасность является необходимой составляющей организации, которая обеспечивается в первую очередь благодаря психологической надежности собственных сотрудников. Она занимает доминирующее положение по отношению к другим направлениям системы безопасности организации.

Согласно работе [4] кадровая безопасность – «это комплекс мер, направленных на предотвращение и устранение угроз и рисков, а также негативных для экономического состояния компании последствий, связанных с работой и поведением персонала, его интеллектуальным потенциалом, трудовыми отношениями в целом».

Исследования в области обеспечения безопасности организации указывают на то, что самым важным и сложным элементом системы безопасности является персонал. Именно человеческий фактор оказывает решающее воздействие на эффективность деятельности всей организации и достижение ее главных стратегических целей, причем кадровые риски являются универсальными, способными нанести организации как имущественный, так и неимущественный ущерб. Кадровая безопасность в организации машиностроительной отрасли – это комплекс мер, направленных на минимизацию рисков, связанных с персоналом, обусловленных в первую очередь психологической надежностью производственного персонала.

Таким образом, кадровые риски машиностроительного комплекса – это опасности, связанные непосредственно с системой управления персоналом, которые потенциально могут привести к утрате ресурсов, неполучению доходов, недостижению стратегических целей вследствие ошибок в управлении. Кадровые риски могут возникать на разных стадиях персонал-менеджмента.

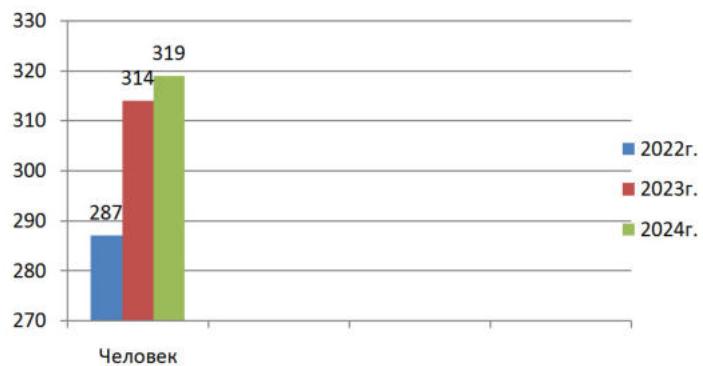
Более подробно остановимся на вопросе кадровой безопасности в организации машиностроительной отрасли ООО «Казаньсельмаш» (Казань). Сделаем акцент на отраслевой специфике обеспечения кадровой безопасности организации. Определимся с методами и стратегией обеспечения кадровой безопасности в ООО «Казаньсельмаш».

Целью исследования является минимизация негативных рисков и угроз, направленных на персонал организации, а также исходящих непосредственно от персонала данной организации. Кадровые риски характерны для организаций машиностроительного сектора, особенно высокотехнологичного по сравнению с другими секторами экономики.

Одной из успешно функционирующих организаций машиностроительной отрасли Республики Татарстан является ООО «Казаньсельмаш». В настоящее время группа компаний «Казаньсельмаш» занимается созданием и улучшением самоходных, прицепных, туннельных и других видов опрыскивателей для обработки урожая и расширяет дилерскую сеть по всей стране. ООО «Казаньсельмаш» – современная, высокотехнологичная и быстро развивающаяся организация, производство которой постоянно автоматизируется.

ООО «Казаньсельмаш» расположено в Высокогорском районе Республики Татарстан. Организация осуществляет следующие виды деятельности: производство машин и оборудования для сельского и лесного хозяйства; торговля оптовая лесоматериалами, строительными материалами и санитарно-техническим оборудованием; торговля оптовая машинами, оборудованием и инструментами для сельского хозяйства; ремонт машин и оборудования; торговля оптовая непродовольственными потребительскими товарами; торговля оптовая сельскохозяйственными и лесохозяйственными машинами, оборудованием и инструментами, включая тракторы.

Динамика численности персонала, занятого на производстве ООО «Казаньсельмаш», за 2022–2024 гг. представлена на рисунке.



Как видим (см. рисунок), в 2023 г. среднесписочная численность работников ООО «Казаньсельмаш» составила 314 чел, что на 27 чел. больше, чем в 2022 г. В 2024 г. также есть незначительный прирост – 319 чел. Анализируя динамику численности кадрового состава, можно сделать вывод о том, что персонал организации увеличивается, несмотря на растущую автоматизацию производства. Это может свидетельствовать о том, что ООО «Казаньсельмаш» активно развивается на рынке.

В связи с расширением организации, тенденцией к повышению численности сотрудников всегда возникают определенные риски и необходимость регулярного анализа системы безопасности в организации, ее совершенствования. Чтобы система кадровой безопасности оставалась актуальной и эффективной, необходимо своевременно внедрять необходимые методы и реализовывать стратегии кадровой безопасности.

Возможна дифференциация безопасности в зависимости от причин ее нарушения. Выделяются угрозы внешнего и внутреннего характера. К внешним относят угрозы со стороны иностранных государств, изменения экономической политики государства, неблагоприятная динамика конъюнктуры рынка и др. Угрозы внутреннего характера – низкая квалификация собственного персонала или недостаток каких-либо ресурсов. Важно вовремя предупреждать или нейтрализовать возникающие внешние и внутренние угрозы безопасности.

Процесс обеспечения кадровой безопасности в организации – это последовательность определенных мероприятий, реализация которых позволит сформировать более эффективную систему управления персоналом и систему управления кадровой безопасностью ООО «Казаньсельмаш», поэтому в данном вопросе необходим системный подход. Управление кадровой безопасностью ООО «Казаньсельмаш» позволит своевременно и оперативно реагировать на угрозы внешней и внутренней среды организации и обеспечить эффективность управленческих процессов в целом.

В связи с важностью обеспечения кадровой безопасности в ООО «Казаньсельмаш» проведен анализ внутренних факторов, оказывающих влияние на кадровую безопасность организации с учетом отраслевой специфики. Особое внимание при этом следует уделять внутренним факторам, поскольку в этом поле находятся те факторы, на которые организация может оказывать самостоятельное воздействие.

Внутренние угрозы способны нанести серьезный ущерб организации. Они возникают от действий сотрудников, имеющих доступ к конфиденциальным данным организации, или из-за ошибок в системе управления. Роль информации и информационных технологий в функционировании современных организаций последовательно увеличивается. Утеря или разглашение информации более значимая потеря, чем хищение денежных средств и материальных ценностей. Информационная безопасность организации оказывается под угрозой, она заключается в совокупности мероприятий по обеспечению защиты конфиденциальной информации от перехвата, разглашения, искажения или уничтожения.

Некоторые внутренние факторы, влияющие на кадровую безопасность организации машиностроительного сектора ООО «Казаньсельмаш», получившие наиболее высокий балл при прямом ранжировании, представлены в таблице.

№ п/п	Балл ранжирования	Внутренние факторы организации
1	10	Отсутствие оценки существующей системы кадровой безопасности
2	10	Дефицит профессиональных кадров, занятых в производстве
3	10	Низкий уровень социальной ответственности менеджеров
4	9	Специфика деятельности организации машиностроительного сектора
5	9	Отсутствие или нерегулярность оценки психологической надежности производственного персонала
6	9	Отсутствие развитой корпоративной культуры организации
7	8	Отсутствие системы обучения производственного персонала основам противодействия угрозам кадровой безопасности

Как видно (см. таблицу), имеется достаточное количество внутренних факторов (угроз), влияющих на кадровую безопасность ООО «Казаньсельмаш».

1. Отсутствие оценки существующей системы кадровой безопасности.

Диагностика уровня кадровой безопасности является неотъемлемым элементом процесса управления кадровой безопасностью организации. Включает расчет оценочных показателей и параметров.

2. Дефицит профессиональных кадров, занятых в производстве.

Производственный персонал составляет основу любой организации машиностроительной отрасли экономики. С учетом этого особое внимание необходимо уделять этапу отбора и подбора новых сотрудников.

3. Низкий уровень социальной ответственности менеджеров.

Ситуация, когда руководители не готовы работать в направлении активного включения трудового коллектива в решение как производственных, так и непроизводственных задач. Деструктивные менеджеры.

4. Специфика деятельности организации машиностроительного сектора, заключающаяся в производственно-технической специфике отрасли.

Отрасль характеризуется многостадийностью производства, его трудоемкостью. Для эффективной работы подобных организаций необходим высококвалифицированный и профессионально пригодный персонал.

5. Отсутствие или нерегулярность оценки психологической надежности производственного персонала.

Кадровая безопасность обеспечивается в первую очередь благодаря психологической надежности собственных сотрудников. Психологическая надежность позволяет работнику безошибочно и точно выполнять трудовые функции. Она занимает доминирующее положение по отношению к другим направлениям системы безопасности организации. Выделяют три параметра оценки надежности – психофизиологическую, профессиональную и личностную. Каждый сотрудник должен характеризоваться высоким уровнем всех видов надежности.

6. Отсутствие развитой корпоративной культуры организации.

Корпоративная культура играет значительную роль в формировании устойчивой системы безопасности, в том числе способствует повышению уровня вовлеченности, лояльности сотрудников, созданию доверительных отношений во внутренней сети взаимоотношений организации.

Культура является основой для формирования благоприятного психологического климата и в целом способствует поддержанию высокого уровня кадровой безопасности. Как следствие, возникает неналаженная коммуникация, отсутствие отлаженных алгоритмов разрешения конфликтов.

По ранее проведенному анализу конфликтных ситуаций в ООО «Казаньсельмаш» [5] известно, что конфликтные ситуации в организации происходят, но достаточно редко, т. е. уровень конфликтности невысокий. Результаты исследования позволяют сделать выводы не только об уровне конфликтности, но и о причинах возникновения конфликтов в ООО «Казаньсельмаш». Как показали результаты, основными причинами возникновения конфликтов в ООО «Казаньсельмаш» является то, что ценности сотрудников

несовместимы с ценностями компании (28 %), на втором месте (25 %) невстроенная культура корпоративного общения и взаимодействия в трудовом коллективе, борьба за должность (18 %); непрозрачность процессов в команде в процессе трудовой деятельности (12 %) и менее 10 % – неправильная организация труда (9 %), действия руководителя (8 %), несправедливая оплата труда (6 %).

7. Отсутствие системы обучения производственного персонала основам противодействия угрозам кадровой безопасности.

Особенности обучения основам кадровой безопасности должны конкретизироваться с учетом личностных характеристик производственного персонала, экономического сектора и других факторов. Обучение желательно проводить в специализированных учебных заведениях. Обучение без отрыва от производства также возможно.

Таким образом, внутренние угрозы кадровой безопасности ООО «Казаньсельмаш» исходят от собственных сотрудников организации или возникают из-за ошибок в управлении. Для выявления, предупреждения и нейтрализации возникающих угроз необходим постоянный мониторинг внутренней среды организации.

Стратегия управления кадровой безопасностью является ключевым элементом системы управления в целом и определяется как совокупность приоритетных целей и управленческих подходов, реализация которых обеспечивает защиту организации от любых потенциальных угроз, связанных с функционированием кадрового направления ее деятельности.

Стратегия адекватного ответа на угрозы – один из вариантов стратегии обеспечения кадровой безопасности, который рекомендуется большинству современных организаций машиностроительной отрасли, в том числе ООО «Казаньсельмаш». Стратегия предполагает возможность использования всего комплекса легитимных методов профилактики и отражения потенциальных угроз.

Стратегия предполагает использование службой безопасности ООО «Казаньсельмаш» всего комплекса легитимных методов профилактики и отражения потенциальных угроз.

Приведем рекомендации по отражению существующих и потенциальных внутренних угроз кадровой безопасности в организации машиностроительной отрасли (ООО «Казаньсельмаш»).

1. Проведение регулярной диагностики уровня кадровой безопасности.

Является неотъемлемым элементом процесса управления кадровой безопасностью организации. Включает расчет оценочных показателей и параметров.

2. Совершенствование системы отбора и подбора персонала.

Отбор и подбор новых сотрудников с точки зрения устранения дефицита профессиональных кадров, занятых в производстве. Производственный персонал составляет основу любой организации машиностроительной отрасли экономики.

3. Проведение профилактической работы с деструктивными менеджерами организации. Повышение уровня их социальной ответственности. Возможно проведение откровенных бесед, фиксирование правил, поощрение открытого общения, проведение тимбилдинга.

4. Проведение оценки психологической надежности производственного персонала.

Оценку рекомендуется проводить по трем параметрам – психофизиологическому, профессиональному и личностному. Кадровая безопасность обеспечивается в первую очередь благодаря психологической надежности собственных сотрудников.

5. Усовершенствование кодекса корпоративной культуры организации.

Культура выступает базой для формирования устойчивой системы безопасности.

6. Совершенствование системы обучения персонала, проведение обучения производственного персонала основам противодействия угрозам кадровой безопасности.

Возможно проведение обучения с отрывом от производства и без отрыва от производства, использование дистанционного и гибридного формата обучения.

Таким образом, совершенствование системы кадровой безопасности, включая реагирование на угрозы внутренней среды организации в ООО «Казаньсельмаш», позволит усовершенствовать систему

управления организации в целом. Следовательно, в рамках системы безопасности организации машиностроительной отрасли важно применять системный подход к совершенствованию, который, в частности, будет способствовать повышению эффективности системы управления персоналом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рой О.Ю. Анализ особенностей функционирования и оценка развития предприятий машиностроения Иркутской области // Мир экономики и управления. 2021. № 3. С. 89–106.
2. Чумарин И.Г. Что такое кадровая безопасность // Кадры предприятия [Электронный журнал]. 2003. № 2. URL: <http://www.kapr.ru/articles/2003/2/519.html> (дата обращения: 20.08.2025).
3. Хорев А.И., Горковенко Е.В., Платонова И.В. Управление кадровой безопасностью организации // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. № 11. С. 181–184.
4. Чувилин С.А. Надежность персонала как один из факторов безопасности в условиях рынка // Изв. Саратовского университета. Нов. сер. 2013. Т. 13. Сер. Социология. Политология. Вып. 1. С. 56–58.
5. Хуснутдинова М.Н., Шарафутдинова Э.Э. Совершенствование системы урегулирования конфликтов в организации машиностроительной отрасли // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2024. № 4. С. 63–69.

Поступила в редакцию 20.09.25

ENSURING HUMAN RESOURCES SAFETY IN THE ENGINEERING INDUSTRY

E.E. Sharafutdinova

The main aspects of ensuring security in an organization, particularly personnel security, are considered. The main factors affecting the personnel security of an organization are analyzed. The main internal threats to personnel and from the organization's own personnel are identified. Recommendations are provided for addressing existing and potential internal security threats in an organization in the engineering industry (Kazanselmash LLC, Kazan).

Keywords: personnel security, security threats, personnel risks, management, production, personnel, engineering industry.

Шарафутдинова Эльмира Энгелевна – канд. психол. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: sharafutdinova-kai@yandex.ru

УДК 550.832.8

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ФЕРРОЗОНДОВЫХ ИНКЛИНОМЕТРОВ

Ю.Г. Астраханцев, Н.А. Белоглазова, Г.В. Иголкина

Рассмотрены особенности разработки и создания ферророндовых инклинометров, заключающиеся в применении триады акселерометров, по измеренным сигналам с которых определяются зенитный и визирный углы, и триады ферророндов, обеспечивающих измерение трех ортогональных проекций вектора индукции магнитного поля. На основе решения матричных уравнений показано, что по измеряемым сигналам с ферророндов определяют не только магнитный азимут в каждой точке траектории скважины, но и дополнительные параметры геомагнитного поля – модуль величины полного вектора индукции, горизонтальную и вертикальную составляющие полного вектора, а также угол его магнитного наклонения. Введение в прибор дополнительного ферроронда с компенсационной катушкой расширяет функциональные возможности инклинометра за счет измерения магнитной восприимчивости горных пород. Рассмотрены пути повышения чувствительности и быстродействия измерений. Предложено применение нанокристаллических аморфных сплавов в качестве сердечников ферророндов. Приведена структура скважинного ферророндового инклинометра МИ-3803М, описана работа и особенности его практического применения.

Ключевые слова: инклинометры, ферроронды, акселерометры, магнитный азимут, параметры геомагнитного поля.

Инклинометры в широком понимании – это устройства, предназначенные для определения углов пространственной ориентации объектов. Инклинометры применяются в различных областях – нефтяной и газовой промышленности, строительстве, наземном транспорте, подводных и надводных судах, летательных аппаратах и др. Наиболее широко инклинометры используются для решения задач при геофизических исследованиях скважин в открытом стволе, целью которых является контроль угловых параметров пространственной ориентации траектории скважины и скважинных объектов и определение ее соответствие проектному профилю [1]. При строительстве скважин в соответствии с проектом инклинометрия имеет первостепенное значение, особенно при уточнении и исследовании геологической модели конкретного месторождения. При проводке скважин в процессе бурения применяют телеметрические системы, основу которых составляют инклинометры, встраиваемые в компоновку низа бурильной колонны с передачей информации в помехоустойчивом коде по каналу связи (кабельному, гидравлическому или электромагнитному) [2]. К таким телесистемам – забойным инклинометрическим системам – предъявляются особые требования по виброустойчивости, ударопрочности и обеспечению высоких точностных показателей при воздействии внешних возмущений в виде низкочастотных крутильных колебаний, обусловленных специфическими условиями эксплуатации при разрушении горных пород в процессе проводки скважин. Кроме того, эти телесистемы размещаются во встраиваемой магнитопрозрачной буровой трубе (титановой, легкосплавной на основе дюралюминия и др.) в общей компоновке над буровым инструментом. При таком позиционировании забойной инклинометрической системы возникают дополнительные погрешности, обусловленные воздействием намагниченных частей обычных стальных буровых труб в верхней и нижней области магнитопрозрачной трубы, что приводит к искажению естественного геомагнитного поля и получению недостоверной информации с ферророндовых датчиков, входящих в состав инклинометрической системы. В таких случаях с помощью системы трехкомпонентных ферророндовых датчиков можно контролировать не только изменение модуля индукции геомагнитного поля, но и изменение его горизонтальной и вертикальной составляющих, что позволяет корректировать результаты замеров.

Кроме скважинной инклинометрии не менее важное значение имеет решение задач геонавигации подвижных объектов. Так, в работах [3–6] проанализированы особенности применения магнитных компасов на основе магниточувствительных датчиков. Данная технология является перспективной для решения задач контроля азимута в общей пространственной ориентации объектов в автономном режиме, не связанном с системами спутниковой навигации. В работе [7] рассмотрена специфика и аппаратные ограничения использования различных методов геофизических исследований при использовании беспилотных авиационных систем, включая аэромагнитометрию. Известен также и метод контроля параметров набегающего воздушного потока на основе применения трехкомпонентного датчика вектора воздушной скорости летательного аппарата [8], чем объясняется определенный интерес у разработчиков геонавигационных систем к применению трехкомпонентных измерительных преобразователей, включая и подземную (скважинную) геонавигацию с применением инклинометров с феррозондовыми датчиками.

Целью работы является разработка инклинометра-магнитометра на основе трехкомпонентных систем феррозондов и акселерометров, характеризующегося расширенными функциональными возможностями для получения дополнительной измерительной информации по исследованию магнитных полей. При этом решаются следующие задачи: определение особенностей построения скважинных инклинометров при инженерном проектировании, построение функциональных зависимостей в виде математических моделей определения дополнительных параметров по измеряемым сигналам с феррозондов и акселерометров, а также определение особенностей их практического применения в скважинах.

Инклинометры основаны на трехкомпонентных измерительных преобразователях, основу которых составляют триады акселерометров и магнитометров [2]. Акселерометры предназначены для измерений проекций вектора ускорения свободного падения на их оси чувствительности, по которым определяют зенитный и визирный углы в скважинных инклинометрах и углы крена и тангла в геонавигационных системах. В качестве магнитометров применяют феррозонды, предназначенные для измерения проекций вектора индукции геомагнитного поля на оси их чувствительности, по которым определяют магнитный азимут. Такое построение современной инклинометрической и геонавигационной аппаратуры позволяет эффективно решать задачи контроля пространственной ориентации объектов, а также расширить функции контроля параметров геомагнитного поля, что и определяет особенности разработки и практического применения феррозондовых инклинометров.

При векторных измерениях геомагнитного поля проблема определения ориентации феррозондов по отношению к прямоугольной системе координат корпуса прибора является наиболее актуальной. Температура в разведочных скважинах существенно ниже, чем в глубоких и сверхглубоких, и это позволяет использовать в скважинных приборах электронные блоки, что значительно расширяет возможности совершенствования аппаратуры. То же самое относится и к системе определения ориентации феррозондов. Феррозонд преобразует индукцию магнитного поля в пропорциональный электрический сигнал. Возможность непосредственного преобразования параметров магнитного поля в электрические сигналы и отсутствие подвижных частей наряду с небольшими габаритами феррозондов обусловили на определенном этапе развития перспективность их использования в инклинометрической и магнитометрической аппаратуре, поскольку при этом значительно упрощается конструкция датчика магнитного азимута, обеспечивая возможность работы в условиях движения по скважине.

При разработке феррозондовых инклинометров с жестким креплением в корпусе триады магниточувствительных датчиков необходимо обращать особое внимание на определение пространственного положения феррозондов, учет специфических особенностей применения феррозондов, разработку оптимальной функциональной схемы магнитометра, обеспечивающей связь с ЭВМ и хорошие эксплуатационные характеристики прибора.

Существует несколько способов измерения составляющих вектора геомагнитного поля. Наиболее точный и конструктивно простой способ основан на измерении трех составляющих вектора геомагнит-

ного поля в неориентированной системе координат при помощи системы жестко закрепленных феррозондов и трех составляющих вектора силы тяжести при помощи акселерометров с последующим пересчетом в систему координат, привязанную к плоскости наклона скважины.

Для учета специфических особенностей применения феррозондов в магнитометрах необходимо обеспечить требуемое быстродействие магнитометра при переключении феррозондов, приемлемый уровень собственных шумов феррозондов и магнитометра в целом, температурную стабильность датчиков, требуемую линейность выходного сигнала магнитометра в широком диапазоне изменения магнитного поля, высокую помехозащищенность магнитометра от полей промышленной частоты.

Обеспечение требуемого быстродействия магнитометра, работающего на второй гармонике, в режиме с временным разделением каналов решается повышением частоты возбуждения феррозонда до 10–20 кГц. При этом можно получить время установления сигнала менее 10 мс и, с другой стороны, использовать операционные усилители общего применения. Не очень высокая частота возбуждения способствует также снижению собственных шумов феррозонда.

Для обеспечения возможности магнитометра работать в режиме временного разделения каналов измерительный тракт должен иметь достаточно широкую полосу пропускания частот (0–150 Гц), что создает противоречие с требованием помехозащищенности прибора от промышленной частоты 50 Гц. Достаточно эффективным способом устранения таких помех является применение интегрирующих аналого-цифровых преобразователей, например, преобразователей двойного интегрирования со временем интегрирования, кратным периоду промышленной частоты 20 мс.

Использование жестко закрепленных в корпусе скважинного прибора феррозондов, бесколлекторных систем определения их ориентации (акселерометры типа AT1306, AT1104) и новых магнитных материалов позволяет существенно повысить точность измерений. Такой принцип построения аппаратуры используется в комплексном скважинном феррозондовом магнитометре-инклинометре МИ-3803М, который позволяет одновременно проводить непрерывные измерения вертикальной и горизонтальной составляющих модуля геомагнитного поля, магнитной восприимчивости горных пород, подсеченных скважиной, магнитного азимута и зенитного угла скважины.

На рис. 1 схематично показана компоновка датчиковой части феррозондового инклинометра на основе жестко закрепленных трехкомпонентных феррозондов и акселерометров $X_{\max(+)}$.

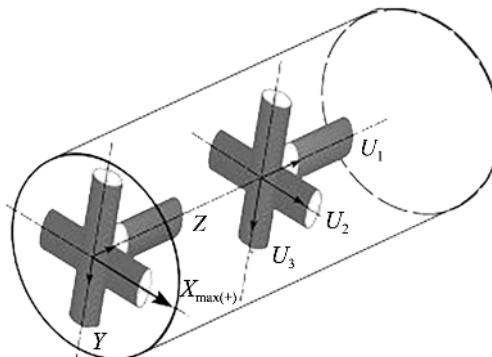


Рис. 1

Магниточувствительные датчики (феррозонды) X , Y , Z , предназначенные для измерения составляющих полного вектора индукции геомагнитного поля, и гравичувствительные датчики (акселерометры) U_1 , U_2 , U_3 , предназначенные для измерения проекций силы тяжести, располагаются в корпусе инклинометра соосно.

Задача математического обеспечения феррозондовых инклинометров – важный этап разработки, представляет собой частное приложение общей теории пространственной ориентации твердых тел и непосредственно связана с преобразованиями базисов – правых ортонормированных систем координат при их поворотах вокруг собственных осей на углы Эйлера – Крылова. В работе [9] подробно рассмотрена методика составления и решения векторно-матричных уравнений для подвижных объектов, эффек-

тивная в применении к задачам инклинометрии и математическому моделированию инклинометрических систем с феррозондовыми и акселерометрическими датчиками.

Основной (исходный) базис $R_0(0, x_0, y_0, z_0)$ связан с двумя неколлинеарными векторами: \bar{G} – вектором ускорения свободного падения (или силы тяжести) и \bar{M} – вектором напряженности (или индукции) геомагнитного поля. Исходный базис образован так, что ось Oz_0 совпадает с направлением вектора ускорения свободного падения \bar{G} , ось Ox_0 лежит в горизонтальной плоскости и направлена на север магнитного меридиана Земли, а ось Oy_0 перпендикулярна плоскости Ox_0z_0 и дополняет правую систему координат. Полный вектор индукции геомагнитного поля \bar{M} лежит в плоскости Ox_0z_0 исходного базиса и раскладывается на две составляющие – \bar{H} – горизонтальную и \bar{Z} – вертикальную. Соотношения величин модулей этих составляющих связаны углом магнитного наклонения ϑ (рис. 2).

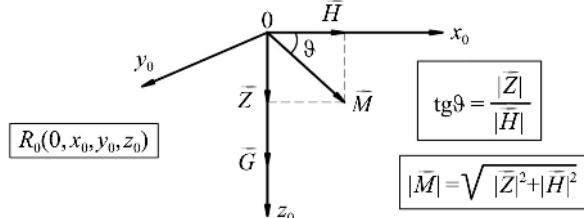


Рис. 2

При разработке математических моделей инклинометра с трехкомпонентными феррозондами и акселерометрами целесообразно применить матричный метод преобразования базисов в соответствии с общей теорией пространственной ориентации твердых тел [2, 9]. При этом необходимо принять следующие допущения: оси акселерометров и феррозондов соответственно совпадают с осями базиса $R_0(0, x_0, y_0, z_0)$ в исходном положении корпуса инклинометра, статические характеристики акселерометров и феррозондов линейны, отсутствует температурный дрейф измерительных каналов акселерометров и феррозондов, коэффициенты преобразования акселерометров и феррозондов имеют откалиброванные значения.

Общее матричное уравнение для феррозондового инклинометра при последовательных поворотах исходного базиса $R_0(0, x_0, y_0, z_0)$ во время его движения по стволу искривленной скважины имеет следующий вид:

$$\begin{vmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{vmatrix} = A_{\alpha(z)} A_{\phi(y)} A_{\mu(z)} \begin{vmatrix} H \\ 0 \\ Z \end{vmatrix} = A_{\alpha(z)} A_{\phi(y)} A_{\mu(z)} \begin{vmatrix} M \cos \vartheta \\ 0 \\ M \sin \vartheta \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где $m_{i(x,y,z)}$ – измеряемые проекции с феррозондами X, Y, Z (см. рис. 1); H – величина горизонтальной составляющей полного вектора индукции геомагнитного поля \bar{M} ; Z – величина вертикальной составляющей полного вектора индукции геомагнитного поля \bar{M} ; M – величина полного вектора индукции геомагнитного поля \bar{M} ; ϑ – угол магнитного наклонения для конкретной широты местности; $A_{\mu(z)}$, $A_{\phi(y)}$, $A_{\alpha(z)}$ – матрицы направляющих косинусов последовательных плоских поворотов корпуса инклинометра на угол магнитного азимута μ вокруг оси OZ_0 , на зенитный угол ϕ вокруг оси OY_0 и на визирный угол α вокруг оси OZ_0 .

Общее матричное уравнение для трехкомпонентного акселерометрического датчика при последовательных поворотах исходного базиса $R_0(0, x_0, y_0, z_0)$ при движении инклинометра по стволу искривленной скважины с учетом инвариантности к магнитному азимуту будет иметь вид

$$\begin{vmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{vmatrix} = A_{\alpha(z)} A_{\phi(y)} \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ G \end{vmatrix}, \quad (2)$$

где $g_{i(x,y,z)}$ – измеряемые сигналы с акселерометров U_1, U_2, U_3 (см. рис. 1).

Измеряемые сигналы с акселерометров функционально связаны с углами пространственной ориентации корпуса скважинного прибора φ, α . При решении матричного уравнения (2) в каждой точке траектории скважины по измеренным значениям $g_{i(x,y,z)}$ с акселерометров U_1, U_2, U_3 зенитный угол φ определяется как угол отклонения оси скважинного прибора от вертикали, а визирный угол α – как угол поворота системы акселерометров относительно плоскости наклона скважины в данной точке траектории скважины:

$$\varphi = \arctg \frac{\sqrt{(g_z)^2 + (g_y)^2}}{(g_z)}; \alpha = \arctg \frac{-g_y}{g_x}, \quad (3)$$

где g_z – измеряемый сигнал с акселерометра U_1 , ось чувствительности которого ориентирована параллельно оси скважинного прибора; g_x, g_y – измеряемые сигналы с акселерометров U_1, U_2 , расположенных в плоскости, перпендикулярной оси скважинного прибора. Углы α, φ являются основными величинами при расчете составляющих геомагнитного поля, а также при определении магнитного азимута μ . Матричное уравнение (1) с учетом матриц отрицательных поворотов можно представить следующим образом:

$$A^{-1}_{\alpha(z)} A^{-1}_{\varphi(y)} \begin{vmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{vmatrix} = A_{\mu(z)} \begin{vmatrix} H \\ 0 \\ Z \end{vmatrix} = A_{\mu(z)} \begin{vmatrix} M \cos \vartheta \\ 0 \\ M \sin \vartheta \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} M \cos \mu \cos \vartheta \\ -M \sin \mu \cos \vartheta \\ M \sin \vartheta \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Тогда решение уравнения (4) с учетом (3) будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{vmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} m_x \cos \varphi \cos \alpha - m_y \cos \varphi \sin \alpha + m_z \sin \varphi \\ m_x \sin \alpha + m_y \cos \alpha \\ -m_x \sin \varphi \cos \alpha + m_y \sin \varphi \sin \alpha + m_z \cos \varphi \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} M \cos \mu \cos \vartheta \\ -M \sin \mu \cos \vartheta \\ M \sin \vartheta \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Из матричного уравнения (5) следует математическая модель вычисления магнитного азимута μ по измеренным сигналам $m_{i(x,y,z)}$ с феррозондов X, Y, Z при известных значениях (3) α и φ :

$$\mu = \arctg \frac{-M_y}{M_x} = \arctg \frac{-m_x \sin \alpha - m_y \cos \alpha}{m_x \cos \varphi \cos \alpha - m_y \cos \varphi \sin \alpha + m_z \sin \varphi}. \quad (6)$$

Полученные выражения определения зенитного угла и магнитного азимута используются в построении классических инклинометров, получаемых при каротаже скважин в открытом стволе. Данная функция инклинометров является основной при геофизических исследованиях наклонно-направленных и горизонтальных скважин. При применении инклинометров в процессе бурения по измеренным значениям $g_{i(x,y,z)}$ с акселерометров U_1, U_2, U_3 принимается во внимание и значение визирного угла α – угла установки отклонителя бурового инструмента в общей компоновке низа бурильной колонны [2].

Тем не менее детальный анализ матричного уравнения (5) позволяет предопределить возможности скважинных инклинометров, основанных на применении трехкомпонентных акселерометров и феррозондов, в направлении расширения их функций. Так, по измеренным сигналам $m_{i(x,y,z)}$ с феррозондов X, Y, Z возможно определить угол магнитного наклонения ϑ для конкретной широты местности следующим образом:

$$\vartheta = \arctg M_z \frac{M_z}{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}} = \arctg \frac{-m_x \sin \varphi \cos \alpha + m_y \sin \varphi \sin \alpha + m_z \cos \varphi}{(m_x \cos \varphi \cos \alpha - m_y \cos \varphi \sin \alpha + m_z \sin \varphi)^2 + (m_x \sin \alpha + m_y \cos \alpha)^2}. \quad (7)$$

Кроме того, по измеренным сигналам $m_{i(x,y,z)}$ с феррозондов X, Y, Z возможно определение модуля полного вектора индукции геомагнитного поля в каждой конкретной точке траектории скважины:

$$M = \sqrt{\sum [m_{i(xyz)}]^2}. \quad (8)$$

В плане дальнейшего расширения функциональных возможностей инклинометров с трехкомпонентными акселерометрами и феррозондами предполагается определение величины горизонтальной оставляющей H и величины вертикальной оставляющей Z полного вектора индукции геомагнитного поля \vec{M} в каждой конкретной точке траектории скважины с учетом выражений (1) – (5) следующим образом:

$$Z = M \sin \vartheta = M (-m_x \sin \phi \cos \alpha + m_y \sin \phi \sin \alpha + m_z \cos \phi); \quad (9)$$

$$H = M \cos \vartheta = M \sqrt{(m_x \cos \phi \cos \alpha - m_y \cos \phi \sin \alpha + m_z \sin \phi)^2 + (m_x \sin \alpha + m_y \cos \alpha)^2}. \quad (10)$$

Здесь параметры $m_{i(xyz)}$ – приведенные значения измеряемых сигналов с феррозондов X, Y, Z . Таким образом, на основе представленных выражений (1) – (10) выявлена важная особенность расширения функций в практическом применении феррозондовых инклинометров, заключающаяся в том, что по измеряемым сигналам с феррозондов $m_{i(xyz)}$ определяют не только магнитный азимут (6) движения объекта по криволинейной траектории, но и сами параметры геомагнитного поля – угол магнитного наклонения (7), модуль полного вектора индукции (8), а также его вертикальной (9) и горизонтальной (10) составляющих. Следует отметить, что при проведении геофизических исследований скважин в открытом стволе указанные параметры одновременно определяют при проведении одной спуско-подъемной операции на каротажном кабеле, что также является значимой особенностью практического применения феррозондовых инклинометров.

В Институте геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН (Екатеринбург) выполнялись исследования и разработка скважинной аппаратуры, предназначеннной для решения задач инклинометрии и магнитометрии. Прибор МИ-3803М является результатом усовершенствования ранее разработанного магнитометра-инклинометра МИ-3803 [10]. По измеряемым параметрам и даже по функциональной схеме приборы идентичны, но в магнитометре МИ-3803М вместо одностержневых однокатушечных феррозондов использованы дифференциальные феррозонды. При разработке скважинных магнитометров для разведочных скважин размеры феррозондов, а также размеры и сложность измерительных, цифровых и вспомогательных блоков в целом имеет особое значение. Внешний диаметр таких приборов не должен превышать 38–40 мм, так как при измерении трех составляющих вектора геомагнитного поля и азимута скважины два феррозонда располагаются перпендикулярно оси скважинного прибора, и их длина не должна превышать 20–22 мм, в то же время от длины сердечника феррозонда зависит его чувствительность, уровень шумов и температурные характеристики. Применение дифференциальных феррозондов с разомкнутым сердечником, которые состоят из сердечников с обмотками, соединенными так, что нечетные гармонические составляющие практически компенсируются, имеет следующие преимущества по сравнению с использованием одностержневых однокатушечных феррозондов.

1. В выходной обмотке феррозонда скомпенсировано напряжение с частотой задающего генератора (первая гармоника), и в идеальном случае происходит полная компенсация. При этом вторая гармоника, присутствующая в напряжении генератора, являющаяся нежелательной и влияющей на точность измерений, также компенсируется.

2. Существенно упрощается электрическая схема измерительного блока аппаратуры за счет исключения из него сложных полосовых фильтров, требующих кропотливой настройки. Кроме того, возможно применение треугольного напряжения возбуждения феррозондов, что существенно проще, чем организация синусоидального сигнала.

3. Повышается чувствительность и надежность самих феррозондов.

Улучшить параметры феррозондов возможно и за счет применения в качестве сердечников магнитных материалов, в отличие от пермаллоя имеющих улучшенные магнитные и механические характеристики, например аморфных сплавов. Для выбора материала сердечника совместно с Институтом физики металлов УрО РАН (Екатеринбург) проводились работы по изучению возможности применения нанокристаллических аморфных сплавов в магнитометрах. В результате проведенных научных исследований было подобрано два сплава на основе кобальта и железа с рабочими температурами 150 и 250 °C (79КНСР, 84КСР и др.) [11]. Применение этих сплавов, особенно после термомагнитной обработки, позволяет получить уровень собственных шумов феррозондов 1–2 нТл и обеспечить их высокую временную стабильность. Результатом исследований стало применение этих сплавов в качестве сердечников феррозондов в магнитометре МИ-3803М.

Линейность статической характеристики феррозондового датчика во всем диапазоне индукции измеряемого поля также является важным показателем. Это связано с тем, что для вычисления горизонтальной и вертикальной составляющих (H, Z) геомагнитного поля и магнитного азимута скважины измеряются три составляющие вектора магнитного поля (X, Y, Z_{oc}), которые постоянно изменяются при вращении скважинного прибора. В связи с этим из-за недостаточной линейности характеристик феррозондов возникают дополнительные ошибки. Применение глубокой отрицательной обратной связи позволяет обеспечить линейность не ниже 2 % и повысить температурную стабильность до 3 нТл/1 °C измерительного тракта магнитометра. Кроме того, в структуру прибора МИ-3803М входит дополнительный четвертый дифференциальный феррозонд с компенсационной обмоткой, представляющий собой датчик магнитной восприимчивости (α -датчик), предназначенный для измерения магнитной восприимчивости горных пород в околоскважинном пространстве.

На рис. 3 изображена схема соединений первичных преобразователей относительно измерительно-го блока, где приняты следующие обозначения: Z – дифференциальный феррозонд, ось чувствительности которого совпадает с осью скважинного прибора; X, Y – дифференциальные феррозонды, оси чувствительности которых перпендикулярны оси скважинного прибора; α – датчик магнитной восприимчивости (α -датчик); U_1, U_2, U_3 – акселерометры (ось чувствительности U_1 совпадает с осью скважинного прибора, а оси двух других перпендикулярны оси скважинного прибора); ИБ – измерительный блок магнитометра, работающего на второй гармонике; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; БМВ – блок магнитной восприимчивости; БУ – блок управления; ГП – генератор возбуждения датчиков поля; ГК – генератор возбуждения феррозонда α -датчика; 1 – намагничивающие катушки феррозондов; 2 – выходные обмотки феррозондов; 3 – намагничивающая катушка α -датчика; 4 – компенсационная катушка α -датчика.

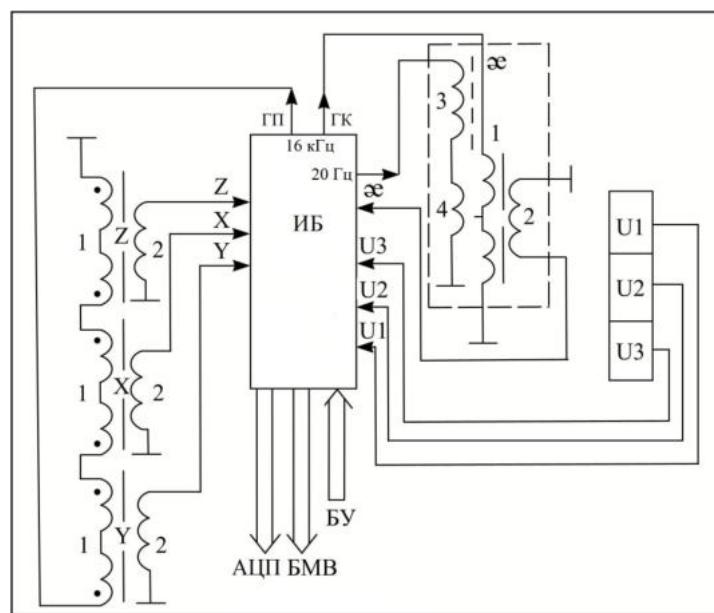


Рис. 3

На рис. 4 изображена функциональная схема измерительного блока магнитометра МИ-3803М, где приняты следующие обозначения: K_1 – K_4 – ключи для подключения феррозондов к измерительной схеме магнитометра; УС – входной усилитель; ФВ – фазовращатель, L_1 , L_2 , C_1 , C_2 – Г-образный полосовой фильтр; СД – синхронный детектор; T_1 , T_2 – делитель частоты, состоящий из двух триггеров; R_7 , C_3 – фильтр низких частот; ВУ – выходной усилитель для питания феррозондов, R_5 , R_6 – резисторы для задания тока возбуждения феррозондов поля и α ; K_5 , K_6 , K_7 – ключи для подключения акселерометров; ФНЧ, $\Phi\text{НЧ}_1$, $\Phi\text{НЧ}_2$, $\Phi\text{НЧ}_3$ – фильтры низких частот; ЗУ₁, ЗУ₂ – аналоговые запоминающие устройства, ВУ – вычитающий усилитель; СУ – суммирующий усилитель; ГТ – генератор тока для питания намагничивающей катушки α -датчика; 1–4 – сигналы управления ключей феррозондов; 5–7 – сигналы управления ключей акселерометров; 8 – выход сигналов поля; 9 – прямоугольный импульс тока (64 кГц), поступающий с задающего генератора; 10 – выход сигналов акселерометров; 11 – выход вычитающего усилителя; 12 – вход генератора тока; 13 – выход генератора тока; 14, 15 – управляющие сигналы запоминающих устройств.

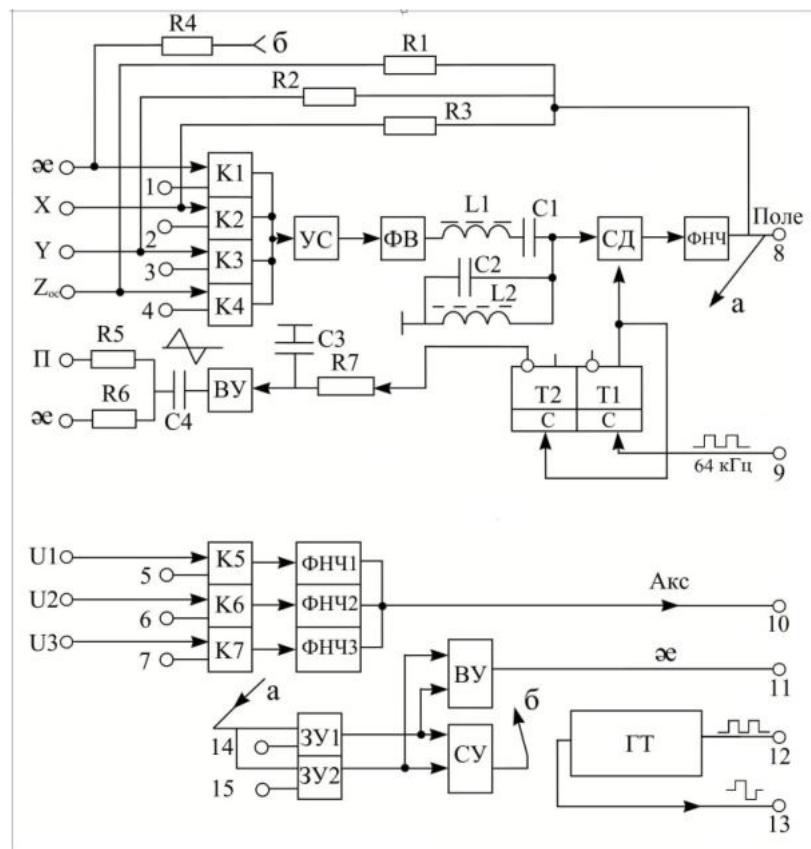


Рис. 4

Выходы феррозондов X, Y, Z_{oc} , а через ключи K_1, K_2, K_3, K_4 поочередно подключаются к входу усилителя, выход которого через фазовращатель подключен к Г-образному полосовому фильтру L_1, L_2, C_1, C_2 , настроенному на вторую гармонику сигнала возбуждения феррозондов частотой 16 кГц. Выходной сигнал с полосового фильтра поступает на сигнальный вход синхронного детектора, на управляющий вход которого подается сигнал 32 кГц с триггера T_1 , а выход синхронного детектора через фильтр низких частот поступает на резисторы обратной связи R_1-R_4 . Прямоугольный выходной сигнал триггера T_2 преобразуется в треугольный при помощи фильтра низких частот (R_7, C_3) и поступает на выходной усилитель, выход которого через резисторы R_5, R_6 подается на катушки возбуждения феррозондов. В момент измерения магнитной восприимчивости сигналы с выхода фильтра низких частот ФНЧ запоминаются аналоговыми запоминающими устройствами ЗУ₁, ЗУ₃, выходные сигналы которых поступают на входы вычитающего и суммирующего усилителей. Выходной сигнал суммирующего усилителя используется

для организации обратной связи в канале α через резистор R_4 . На вход генератора тока подается сигнал частотой 20 Гц. При подаче сигнала с выхода генератора тока в момент измерения магнитной восприимчивости выходной сигнал измерительного блока состоит из двух импульсов U_+ , U_- :

- при положительном импульсе тока

$$U_+ = Z_{oc} + K\alpha H;$$

- при отрицательном импульсе тока

$$U_- = Z_{oc} + K\alpha H,$$

где Z_{oc} – осевая составляющая вектора геомагнитного поля, измеряемая феррозондом α -датчика; α – величина магнитной восприимчивости горных пород; H – напряженность поля, создаваемого намагничающей катушкой; K – коэффициент, учитывающий конструктивные особенности датчика.

На выходе вычитающего усилителя напряжение, не зависящее от внешнего магнитного поля, определится следующим образом:

$$U_1 = U_+ - U_- = 2K\alpha H.$$

Приведем технические характеристики феррозондового инклинометра МИ-3803М.

Диапазоны и погрешности измерений: диапазон измерения вертикальной составляющей Z вектора индукции геомагнитного поля – ± 80000 нТл; погрешность определения Z – $\pm 0,01 \cdot Z \pm 20$ нТл; диапазон измерения горизонтальной составляющей H вектора индукции геомагнитного поля – $0 \dots 80000$ нТл; погрешность определения H – $\pm 0,01 \cdot H \pm 40$ нТл; диапазон измерения магнитного азимута – $0 \dots 360^\circ$; погрешность определения магнитного азимута (при зенитном угле больше 2°) – $\pm 1,5^\circ$; диапазон измерения зенитного угла – $0 \dots 50^\circ$; погрешность определения зенитного угла – ± 15 угл. мин; диапазон измерения магнитной восприимчивости, $\alpha \cdot 10^{-5}$ ед. СИ – $50 \dots 25000 / 300 \dots 250000$; погрешность измерения магнитной восприимчивости – $\pm 10\%$.

Массогабаритные данные: габаритные размеры скважинного снаряда (длина, диаметр) – 1900×38 мм; масса – 6 кг.

Условия эксплуатации: гидростатическое давление – 15 МПа; диапазон рабочих температур – $10 \dots +120^\circ\text{C}$.

Время цикла измерения – 400 мс.

Акселерометры, установленные в скважинном приборе, содержат температурные датчики, показания которых используются для программной коррекции ухода «нуля» и коэффициента преобразования ориентаторов. Такая коррекция необходима при большом диапазоне рабочей температуры ($0 \dots 120^\circ\text{C}$), особенно в субвертикальных скважинах.

Для получения необходимой точности измерений параметров геомагнитного поля при помощи дифференциальных феррозондов, работающих на второй гармонике [10, 11], в приборе МИ-3803М было обеспечено повышение быстродействия магнитометра за счет сокращения времени переключения каналов с $60 \cdot 10^{-3}$ с в магнитометре-инклинометре МИ-6404 [12] до $40 \cdot 10^{-3}$ с; снижение уровня собственных шумов феррозондов до 1–2 нТл; повышение температурной стабильности измерительного тракта магнитометра до 3 нТл/1 $^\circ\text{C}$. За счет применения глубокой отрицательной обратной связи достигнута линейность характеристик феррозондов не ниже 2 %.

В зависимости от условий измерений скважинный прибор МИ-3803М может быть помещен в корпус диаметром 38...70 мм. Прибор работает с использованием одножильного бронированного каротажного кабеля длиной до 6 км, регистрация информации осуществляется в режиме непрерывной передачи данных, что обеспечивает его подключение к компьютеризированным каротажным комплексам типа «Гектор» и «Вулкан».

Феррозондовый магнитометр-инклинометр МИ-3808М был успешно применен при исследовании рудных, параметрических и нефтегазовых скважин [13, 14].

Результаты измерений, полученных за одну спуско-подъемную операцию, позволяют не только определить угловые параметры пространственной ориентации траекторий скважин, но и более детально

изучить магнитные характеристики геологического разреза скважины и околоскважинного пространства.

В связи с развитием и совершенствованием магнитометрических и инклинометрических систем, современным развитием и применением вычислительной техники, дополнительными требованиями к скважинной аппаратуре по надежности и точности измерений возникло новое направление в создании феррозондовых инклинометров – использование жестко закрепленных измерительных систем дифференциальных феррозондов и акселерометров. Особенность построения таких скважинных приборов – применение триады акселерометров, по измеренным сигналам с которых определяются зенитный и визирный углы, а также применение триады феррозондов, которая представляет собой геомагнитометр, обеспечивающий измерение трех ортогональных проекций вектора индукции магнитного поля. При этом показано, что по измеряемым сигналам с феррозондов определяют не только магнитный азимут в каждой точке траектории скважин, но и дополнительные параметры геомагнитного поля – модуль величины полного вектора индукции, горизонтальную и вертикальную составляющие полного вектора, а также угол магнитного наклонения для конкретной широты местности. Кроме того, введение дополнительного дифференциального феррозонда с компенсационной катушкой позволило еще расширить функциональные возможности инклинометра-магнитометра за счет измерения магнитной восприимчивости горных пород, что и предопределило в целом особенности его широкого практического применения.

В настоящее время в российском приборостроении возникает все большая необходимость ориентироваться на применение собственной продукции приборостроения и элементной базы. Разработка и создание магнитометра-инклинометра МИ-3803М явилось примером создания качественной, конкурентоспособной аппаратуры, которая используется многими геологоразведочными организациями России при исследовании рудных, нефтегазовых и параметрических скважин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кунаккужин И.А. и др. Комплексная оценка результатов проводки скважин как важный инструмент для уточнения геологической модели // Нефтепромысловое дело. 2021. № 5 (629). С. 43–50.
2. Ковшов Г.Н., Коловертнов Г.Ю. Приборы контроля пространственной ориентации скважин при бурении. Уфа: УГНТУ, 2001. 228 с.
3. Грязин Д.Г., Падерина Т.В. Магнитный компас с системой коррекции динамической погрешности // Гирокопия и навигация. 2024. № 2 (125). С. 133–150.
4. Androjna A. et al. Determining Residual Deviation and Analysis of the Current Use of the Magnetic Compass // Journal on Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9. № 204. P. 2–14.
5. Basterretxea-Iribar Imanol, Sotes Irazu, Uriarte Jose Ignacio. Towards an Improvement of Magnetic Compass Accuracy and Adjustment // Journal of Navigation. 2016. Vol. 69. № 6. P. 1325–1340.
6. Tan Van Pham, Nguyen Van Suong. The Method to Calculate the Deviation Coefficients for Marine Magnetic Compass // International Journal of Engineering Research and Technology. 2019. Vol. 12. № 11. P. 1941–1944.
7. Анцев Е.Г., Семенова А.А., Русина А.А. Базовые направления развития аэрогеофизических приборов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2025. № 1. С. 72–76.
8. Ефремова Е.С., Мицхахов Б.И., Солдаткин В.С. Трехкомпонентный датчик вектора воздушной скорости летательного аппарата на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. 2023. № 1. С. 95–100.
9. Ривкин С.С. Стабилизация измерительных устройств на качающемся основании. М.: Наука, 1978. 320 с.
10. Астраханцев Ю.Г., Белоглазова Н.А. Комплексная магнитометрическая аппаратура для исследований сверхглубоких и разведочных скважин. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. 119 с.
11. Шерено Т.А. и др. Использование нанокристаллических и аморфных сплавов в скважинных феррозондовых магнитометрах // Структура и свойства нанокристаллических металлов: Сб. Екатеринбург: УрО РАН. 1999. С. 383–390.
12. Глухих И.И., Иголкина Г.В., Астраханцев Ю.Г. Магнитометрия глубоких и сверхглубоких скважин // Геофизика. 1995. № 4. С. 145–150.
13. Вирьясова У.В., Белоглазова Н.А., Иголкина Г.В. Изучение магнитных характеристик для зон магнетитовой минерализации по данным скважинной магнитометрии // Геофизика. 2024. № 3. С. 89–95.

14. Иголкина Г.В. Определение элементов залегания магнитных пород, подсеченных скважинами, по данным скважинной магнитометрии // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 85-2. С. 108–117.

Поступила в редакцию 29.05.25

FEATURES OF THE CONSTRUCTION AND APPLICATION OF FERROSONDE INCLINOMETERS

Yu.G. Astrakhantsev, N.A. Beloglazova, and G.V. Igolkina

The article discusses the features of the development and creation of ferrosonde inclinometers, which consist in the use of a triad of accelerometers, from which the zenith and sighting angles are determined using measured signals, and a triad of ferrosondes that measure three orthogonal projections of the magnetic field induction vector. Based on the solution of matrix equations, it is shown that the measured signals from ferrosondes determine not only the magnetic azimuth at each point of the well trajectory, but also additional parameters of the geomagnetic field, namely, the modulus of the magnitude of the total induction vector, the horizontal and vertical components of the total vector, as well as the angle of magnetic inclination. The introduction of an additional ferrosonde with a compensation coil into the device also made it possible to expand the functionality of the inclinometer in terms of measuring the magnetic susceptibility of rocks. Ways to increase the sensitivity and speed of measurements are considered. The use of nanocrystalline amorphous alloys as ferro-probe cores is proposed. The structure of the MI-3803M borehole ferrosonde inclinometer is presented, its operation and features of its practical application are described.

Keywords: **inclinometers, ferrosondes, accelerometers, magnetic azimuth, geomagnetic field parameters.**

Астраханцев Юрий Геннадьевич – д-р техн. наук (Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения РАН, Екатеринбург)
E-mail: skvgeoph@mail.ru

Белоглазова Надежда Анатольевна – канд. техн. наук (Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения РАН, Екатеринбург)
E-mail: bna408@mail.ru

Иголкина Галина Валентиновна – д-р геол.-минерал. наук (Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения РАН, Екатеринбург)
E-mail: galinaigolkina@yandex.ru

МОДЕЛИ ВХОДНЫХ ИНФОРМАТИВНЫХ СИГНАЛОВ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ДОПЛЕРОВСКОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПУТЕВОЙ СКОРОСТИ И УГЛА СНОСА ВЕРТОЛЕТА С ОДНОЙ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩЕЙ АНТЕННОЙ

Р.Р. Валитов, М.С. Азов, Д.Е. Чикрин, С.К. Киселев

Рассмотрены особенности построения современной четырехлучевой доплеровской системы измерения путевой скорости и угла сноса вертолета с одной приемопередающей антенной. Приведены модели входных сигналов системы и особенности определения выходных параметров по результатам измерений. Рассмотрен способ обработки информативного сигнала в канале измерительной системы с использованием квадратурной модуляции и цифровой фильтрации, обеспечивающий высокую помехоустойчивость и точность. Рассмотрена функциональная схема системы и принцип ее работы.

Ключевые слова: доплеровский измеритель скорости и угла сноса, квадратурная модуляция, доплеровская частота, вертолет, модели, информативные сигналы, определение выходных параметров системы.

Введение

Современные вертолеты оснащены сложными техническими комплексами, обеспечивающими выполнение авиацией различных задач в любых метеоусловиях в любое время суток. Одной из основных информационных систем на борту вертолета является доплеровский измеритель скорости и угла сноса, который не только автоматически непрерывно измеряет и индицирует информацию о путевой скорости и угле сноса и координатах вертолета, но и передает эту информацию для корректировки и комплексирования результатов измерений других навигационных систем, а также в системы управления вертолетом. Доплеровский измеритель скорости и угла сноса вертолетного назначения должен быть работоспособен в широком диапазоне изменения высотно-скоростных параметров, при различной ориентации вертолета в пространстве, при полете над поверхностями различного типа [1, 2]. Известно, что доплеровский измеритель скорости и угла сноса, использующий результаты измерений по трем лучам, имеет меньшую погрешность от изменения положения вертолета в плоскости крена и тангла, а четырехлучевые (за счет резервного луча) отличаются большей помехоустойчивостью. В связи с этим в настоящее время вертолетные доплеровские измерители скорости и угла сноса преимущественно выполняются четырехлучевыми, что позволяет снизить погрешность измерения и повысить достоверность результатов, используя избыточность измерений доплеровской частоты [1, 3].

Требуемое направление лучей в одноантенной системе реализовано согласно рис. 1.

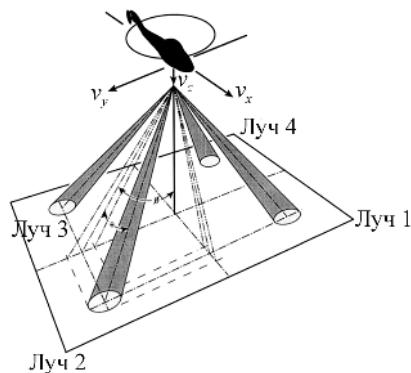


Рис. 1. Четырехлучевой вертолетный доплеровский измеритель скорости и угла сноса (лучи 1, 2 прямые, слева и справа по борту, лучи 3, 4 обратные, слева и справа по борту)

Четыре излучателя конструктивно расположены на одной приемопередающей антенне [1].

Модели информативных сигналов и определение выходных параметров доплеровской системы

Проекции вектора скорости на направления лучей (см. рис. 1) определяются по формуле

$$V_i = L_{ix}V_x + L_{iy}V_y + L_{iz}V_z, \quad (1)$$

где i – номер i -го луча; L_{ix} – проекция i -го луча на ось X ; L_{iy} – проекция i -го луча на ось Y ; L_{iz} – проекция i -го луча на ось Z ; V_x , V_y , V_z – составляющие вектора скорости вертолета в связанной системе координат.

Для вычисления проекций векторов направления i -го луча на оси координат используются данные о пространственных углах i -го луча θ_i , ϕ_i . Величины проекций в общем случае определяются по формулам

$$L_{ix} = \sin \theta_i; \quad L_{iy} = \cos \theta_i \sin \phi_i; \quad L_{iz} = \cos \theta_i \cos \phi_i. \quad (2)$$

Если учесть, что углы θ_i , ϕ_i принимают положительные значения, а также прямую пропорциональность частоты Доплера и скорости

$$V_i = \frac{1}{2} \lambda f_{di}, \quad (3)$$

где $\lambda = \frac{c}{f_0}$ ($c = 299\,792\,458$ м/с; f_0 – частота излучаемого сигнала), то выражение (3) можно записать в матричном виде

$$\lambda \cdot \begin{pmatrix} f_{d1} \\ f_{d2} \\ f_{d3} \\ f_{d4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{1x} & -L_{1y} & L_{1z} \\ L_{2x} & L_{2y} & L_{2z} \\ -L_{3x} & L_{3y} & L_{3z} \\ -L_{4x} & -L_{4y} & L_{4z} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где L_{ix} , L_{iy} , L_{iz} – проекция i -го луча на оси X , Y , Z ; f_{d1} , f_{d2} , f_{d3} , f_{d4} – частота Доплера соответствующего луча 1–4.

Матричное уравнение (4) отражает зависимость проекций вектора скорости вертолета в связанной системе координат от частоты Доплера отраженного сигнала, определенной для всех четырех лучей.

Так как для вычисления вектора скорости достаточно измерений по трем лучам, не лежащим в одной плоскости (что выполняется для геометрии лучей четырехлучевого доплеровского измерителя скорости и угла сноса), то введя обозначения

$$\begin{aligned} [L]_{123} &= \begin{pmatrix} L_{1x} & -L_{1y} & L_{1z} \\ L_{2x} & L_{2y} & L_{2z} \\ -L_{3x} & L_{3y} & L_{3z} \end{pmatrix}; \quad [L]_{124} = \begin{pmatrix} L_{1x} & -L_{1y} & L_{1z} \\ L_{2x} & L_{2y} & L_{2z} \\ -L_{4x} & -L_{4y} & L_{4z} \end{pmatrix}; \\ [L]_{124} &= \begin{pmatrix} L_{1x} & -L_{1y} & L_{1z} \\ L_{2x} & L_{2y} & L_{2z} \\ -L_{4x} & -L_{4y} & L_{4z} \end{pmatrix}; \quad [L]_{234} = \begin{pmatrix} L_{2x} & L_{2y} & L_{2z} \\ -L_{3x} & L_{3y} & L_{3z} \\ -L_{4x} & -L_{4y} & L_{4z} \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (5)$$

выражение (5) можно переписать в следующих четырех вариантах:

$$\begin{aligned} \lambda \cdot \begin{pmatrix} f_{d1} \\ f_{d2} \\ f_{d3} \end{pmatrix} &= [L]_{123} \times \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}; \quad \lambda \cdot \begin{pmatrix} f_{d1} \\ f_{d2} \\ f_{d4} \end{pmatrix} = [L]_{124} \times \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}; \\ \lambda \cdot \begin{pmatrix} f_{d1} \\ f_{d3} \\ f_{d4} \end{pmatrix} &= [L]_{134} \times \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}; \quad \lambda \cdot \begin{pmatrix} f_{d2} \\ f_{d3} \\ f_{d4} \end{pmatrix} = [L]_{234} \times \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

Из выражений (6) составляющие вектора скорости вертолета в связанной системе координат вычисляются по одной из четырех следующих формул:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} &= \lambda \cdot [L]_{123}^{-1} \times \begin{pmatrix} f_{d1} \\ f_{d2} \\ f_{d3} \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} = \lambda \cdot [L]_{124}^{-1} \times \begin{pmatrix} f_{d1} \\ f_{d2} \\ f_{d4} \end{pmatrix}; \\ \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} &= \lambda \cdot [L]_{134}^{-1} \times \begin{pmatrix} f_{d1} \\ f_{d3} \\ f_{d4} \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} = \lambda \cdot [L]_{234}^{-1} \times \begin{pmatrix} f_{d2} \\ f_{d3} \\ f_{d4} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, в каждом цикле измерений для определения путевой скорости и угла сноса вертолета используются результаты измерений по трем из четырех лучей. Для вычисления берутся результаты измерений, имеющих наибольшую достоверность.

Матрицы коэффициентов $[L]_{123}^{-1}$, $[L]_{124}^{-1}$, $[L]_{134}^{-1}$, $[L]_{234}^{-1}$ вычисляются по углам антенны, которые измеряются на этапе ее проверки. Определение информативных частот f_{d1} , f_{d2} , f_{d3} , f_{d4} составляющих вектора путевой скорости V_x , V_y , V_z угла сноса β и значения путевой скорости $V_{\text{путь}}$ проводится алгоритмически.

По значениям составляющих вектора скорости V_x , V_y , V_z вычисляется путевая скорость вертолета

$$V_{\text{путь}} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad (8)$$

и угол сноса

$$\beta = \arctg \frac{f_{d3} - f_{d2}}{f_{d1} - f_{d2}} \operatorname{ctg} B, \quad (9)$$

где f_{d1} , f_{d2} , f_{d3} – частота Доплера в каналах 1–3, используемых в текущем цикле измерений; B – горизонтальный угол визирования (угол между проекцией луча антенны на плоскость XOZ и продольной осью X вертолета).

В аналогичных системах в настоящее время вся предварительная обработка информационных сигналов (модуляция, фильтрация, коррекция и др.) и вычисление по результатам измерения выходных параметров реализуется программно на специализированном встроенном вычислителе [4, 5].

Получение информативных частот в каналах доплеровской системы

Доплеровский измеритель скорости и угла сноса используют частотную модуляцию излучаемого сигнала. Излучаемый частотно модулированный высокочастотный сигнал имеет следующий вид:

$$u_{\text{изл}}(t) = U_0 \cos \left[\left(f_0 t + \left(\frac{\Delta f}{F_m} \right) \right) \cos F_m t \right], \quad (10)$$

где U_0 – амплитуда излучаемого сигнала; Δf – девиация частоты модуляции; F_m – частота модуляции; f_0 – несущая частота.

Без учета отражения отдельными участками местности и помех отраженный сигнал имеет гармоническую форму и частоту, измененную на величину доплеровского сдвига, и запаздывание по времени относительно излучаемого:

$$u_{\text{отр}}(t) = U_{\text{отр}} \cos \left[(f_0 - f_d)(t - T_3) + \left(\frac{\Delta f}{F_m} \right) \cos F_m (t - T_3) \right], \quad (11)$$

где T_3 – время запаздывания отраженного сигнала относительно излучаемого; $U_{\text{отр}}$ – амплитуда отраженного сигнала; f_d – частота доплеровского сдвига.

В условиях сложной помеховой обстановки отраженный сигнал формируется как результат суперпозиции полезной гармонической составляющей, несущей информацию о доплеровском сдвиге, и случайных многокомпонентных помех со сложной спектральной и временной структурой. На практике обеспечение и подтверждение информационных характеристик измерительного канала в условиях сложной помеховой обстановки требует повышения вероятности выделения в отраженном сигнале гармоники на доплеровской частоте, для чего необходимы методы обработки сигналов с высокой спектральной эффективностью, каким является применение квадратурной амплитудной модуляции [6].

Для получения квадратурно-модулированного сигнала отраженный сигнал после предварительного усиления подается на квадратурный смеситель, где модулируется частотно-модулированный сигнал генератора с программным управлением. Полученные на выходе смесителя квадратурные сигналы I (действительная часть) и Q (мнимая часть), таким образом, переносятся в область низких частот для дальнейшей оцифровки и цифровой обработки. Перед оцифровкой данных сигналов необходима их низкочастотная фильтрация, которая обеспечивает подавление высокочастотных и зеркальных составляющих в спектре.

В случае идеальности преобразований (коммутатором лучей и циркулятором, усилителем, квадратурным преобразователем фильтрацией) в части измерительного канала до аналого-цифрового преобразователя и самого аналого-цифрового преобразования спектр комплексного сигнала, модулированного частотно-модулированным сигналом от генератора с программным, будет иметь составляющую на доплеровской частоте, которая будет наиболее близкой к нулю (рис. 2, *a*).

На практике из-за погрешностей обработки сигналов в указанных устройствах и элементах СВЧ-канала в спектре будет присутствовать составляющая на нулевой частоте (рис. 2, *b*).

С учетом того что вариация доплеровской частоты невелика (несколько килогерц) по сравнению с несущей (гигагерцы) и она может быть как положительной, так и отрицательной, ее надежное выделение при наличии в спектре составляющей на нулевой частоте вызывает достаточную сложность. В связи с этим необходимо еще раз перенести спектр измерительного сигнала на некоторую промежуточную частоту. В качестве такой частоты может быть использована, например, частота модуляции, которая уже сгенерирована в устройстве генератора с программным управлением при модуляции высокочастотного излучаемого сигнала. Если, например, использовать для модуляции измерительного комплексного сигнала RF гетеродин LO с частотой 25 кГц, получим в спектре следующие основные составляющие: $IF_0 = RF_0 - LO = -25$ кГц (перенос нулевой составляющей из спектра преобразуемого измерительного сигнала), $IF_d = RF_d - LO = -20$ кГц (перенос основной составляющей на доплеровской частоте из спектра преобразуемого измерительного сигнала (рис. 2, *b*)). На доплеровской частоте 5 кГц в преобразованном спектре будет находиться первая гармоника исходного сигнала, которая в преобразованном спектре будет иметь в окрестностях нуля наибольшую амплитуду.

Если провести модуляцию измерительного комплексного сигнала RF гетеродином LO с частотой -25 кГц на доплеровской частоте, в преобразованном спектре будет находиться первая зеркальная гармоника исходного доплеровского сигнала (рис. 2, *г*). Эта гармоника в преобразованном спектре также будет иметь наибольшую амплитуду в окрестностях нуля.

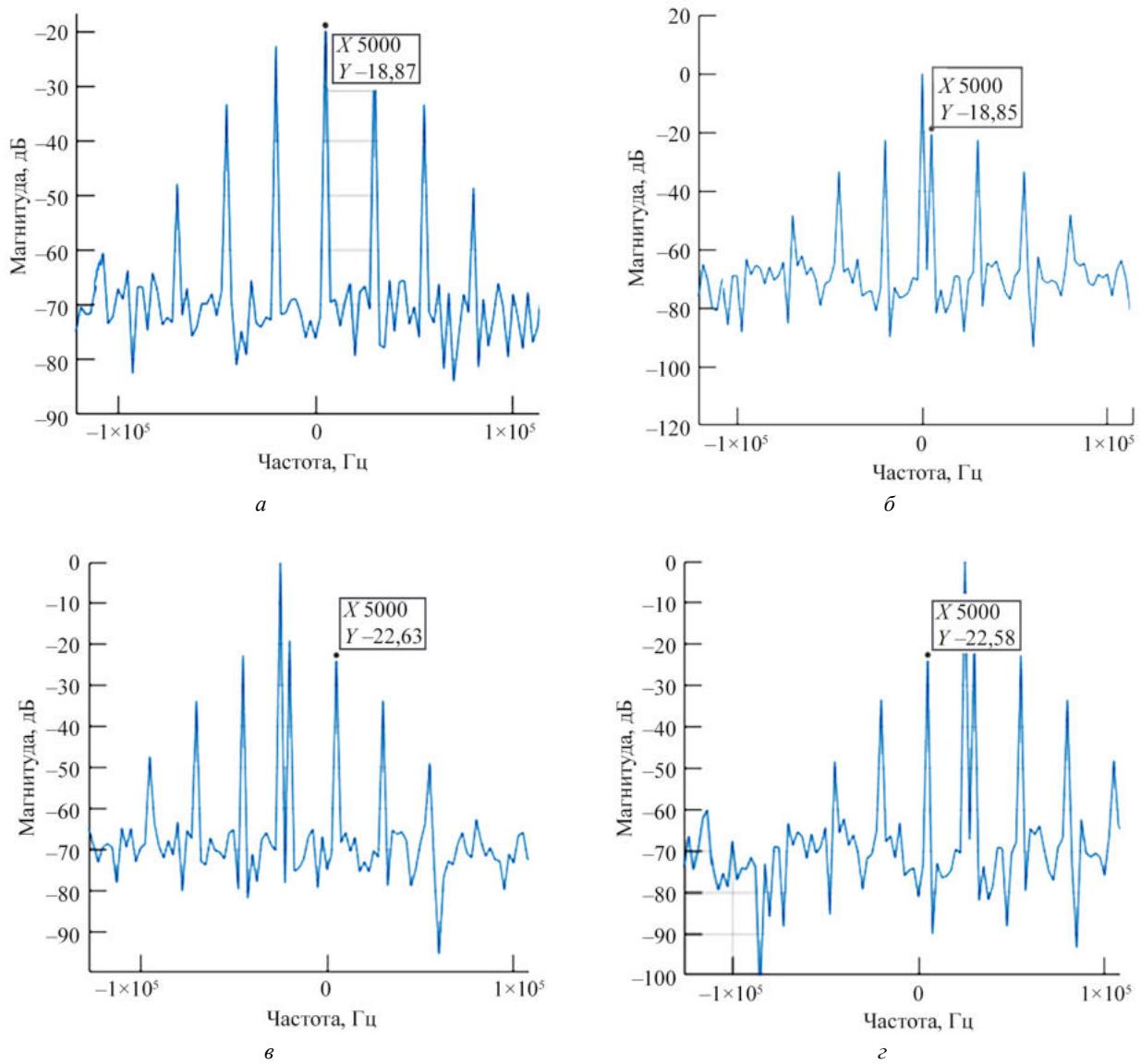


Рис. 2. Спектр комплексного измерительного сигнала при отсутствии погрешностей преобразований в канале (доплеровская частота – 5 кГц) (а); при наличии составляющей на нулевой частоте (б), спектр после квадратурной амплитудно-частотной модуляции частотой 25 кГц (в) и спектр после квадратурной амплитудно-частотной модуляции частотой 25 кГц (г)

Для повышения надежности выделения в спектре квадратурного сигнала, модулированного частотой 25 кГц гармоники на доплеровской частоте, необходимо перед преобразованием отфильтровать исходный измерительный сигнал фильтром низкой частоты с высокой добротностью, полоса пропускания которого равна частотному диапазону сигнала гетеродина последующей квадратурной модуляции. В рассматриваемом случае это $\pm 12,5$ кГц. Тогда гармоники на частотах $IF_0 = -25$ кГц и $IF_d = -20$ кГц (и на частотах $IF_0 = 30$ кГц и $IF_d = 35$ кГц для модуляции частотой –25 кГц) также будут подавлены. Для реализации рассмотренного способа обработки отраженного сигнала в цифровом виде может быть использован, например, цифровой СИС-фильтр [7]. Высокая добротность СИС-фильтров обеспечивает точное выделение узкополосных спектральных составляющих доплеровских частот и подавление внеполосных гармоник, что существенно повышает селективность измерительного канала и снижает вероятность ложных срабатываний при анализе сложных спектров отраженных сигналов.

Далее после выделения частот в каждом канале отраженного сигнала, которые являются доплеровскими частотами f_{d1} , f_{d2} , f_{d3} , f_{d4} в соответствующих лучах, их значения подставляются в формулы (4), (6), (7) для вычисления составляющих скорости и путевой скорости вертолета.

Функциональная схема доплеровской системы измерителя путевой скорости и угла сноса вертолета с одной приемопередающей антенной

Функциональная схема вертолетного доплеровского измерителя скорости и угла сноса, реализующего описанную алгоритмическую обработку информативного измерительного сигнала, представлена на рис. 3 [8].

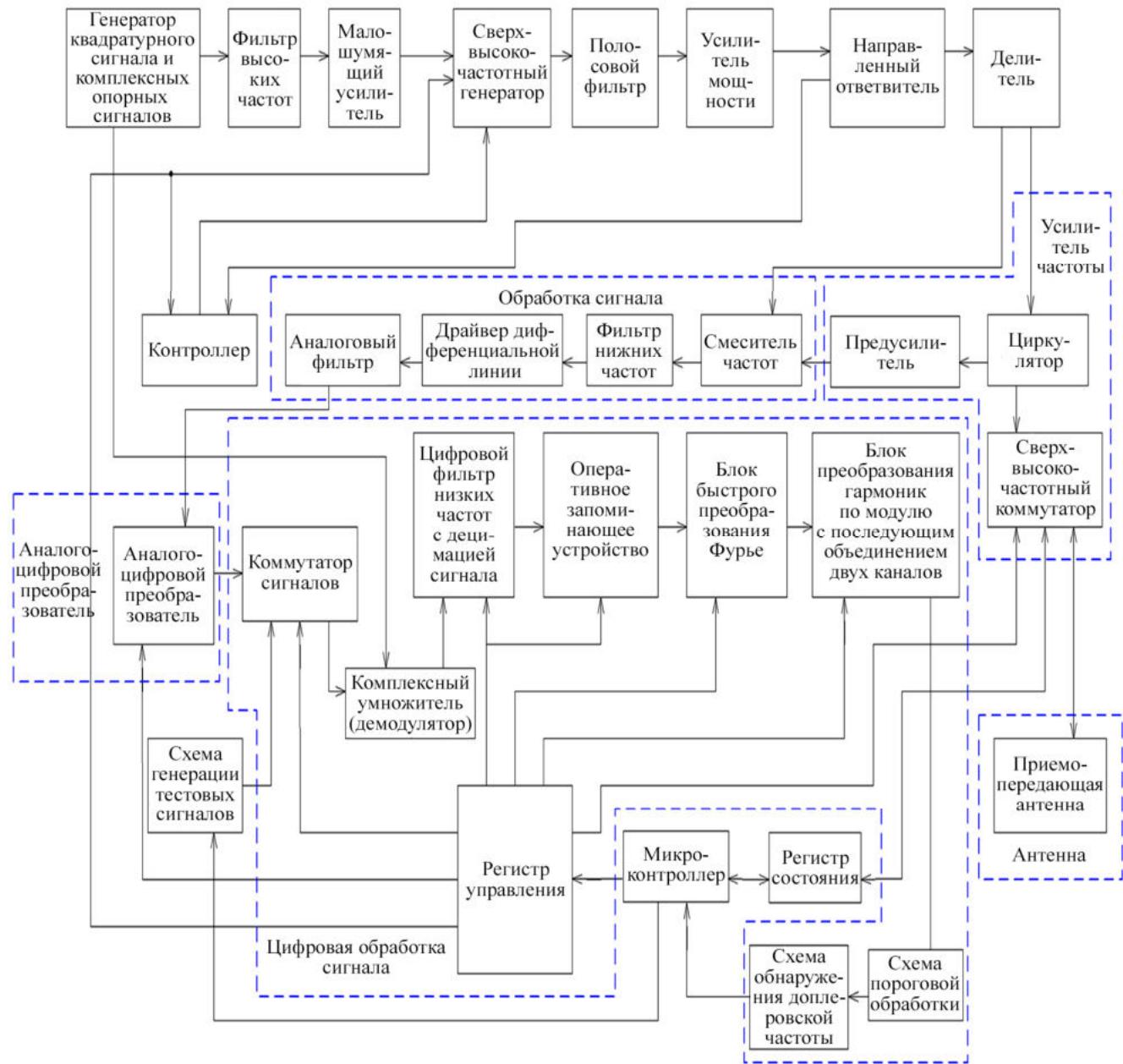


Рис. 3. Функциональная схема вертолетного доплеровского измерителя скорости и угла сноса с одной приемопередающей антенной

Генератор квадратурного сигнала и комплексных опорных сигналов вырабатывает гармонические колебания частоты модуляции, под действием которых изменяется частота радиосигнала и формируется излучаемый частотно-модулированный сигнал. Этот вид сигнала, как было указано ранее, смещает спектр доплеровских частот относительно спектра шумов отраженного сигнала в область более высоких частот. Далее сигнал модуляции поступает в фильтр высоких частот, который убирает низкочастотные гармоники, отфильтрованный сигнал усиливается в малошумящем усилителе и поступает в СВЧ-генератор.

Сгенерированный генератором частотно-модулированный сигнал после фильтрации в полосовом фильтре поступает на усилитель мощности. Усиленный сигнал подается в направленный ответвитель и далее в делитель и циркулятор, а затем в СВЧ-коммутатор, после чего излучается приемопередающей антенной в направлении подстилающей поверхности. В контроллере параметры сигнала после усилителя (опорная частота и мощность излучения) контролируются на соответствие их требуемым диапазонам.

Приемопередающая антенна работает как на прием, так и на передачу, она формирует четыре луча с X-расположением (см. рис. 1). Лучи формируются поочередно, так что в каждый момент времени существует только один из четырех лучей. Их переключение осуществляется СВЧ-коммутатором, управляемым с помощью регистра управления. Отраженный от подстилающей поверхности сигнал с измененной частотой поступает в антенну и через СВЧ-коммутатор поступает в циркулятор, а затем в предусилитель. Усиленный сигнал поступает в смеситель частот, куда также поступает сигнал с делителя. Смеситель частот формирует дифференциальные квадратурные сигналы I, Q , которые через фильтр низких частот и драйвер дифференциальной линии поступают на вход аналогового фильтра.

Для вычисления сигналов I, Q реализовано два параллельных канала обработки. В аналоговом фильтре у сигналов I, Q подавляются высокочастотные помехи, присутствующие в отраженном доплеровском сигнале. Каждый из сигналов I, Q передается в аналого-цифровой преобразователь.

Оцифрованные составляющие I, Q преобразованного сигнала и сигнал, сформированный генератором модулирующего сигнала, подаются на комплексный умножитель (демодулятор), который переводит спектр квадратурных составляющих в более низкий частотный диапазон на промежуточные частоты $(+/-)F_m$:

$$U^{I(Q)}(t) = u_{\text{отр}}^{I(Q)}(t) e^{(+/-)2\pi F_m t}, \quad (12)$$

где $U^I(t), U^Q(t)$ – действительная и мнимая составляющие квадратурного отраженного сигнала после переноса их на промежуточные частоты $(+/-)F_m$; $u_{\text{отр}}^I(t), u_{\text{отр}}^Q(t)$ – действительная и мнимая составляющие исходного квадратурного отраженного сигнала.

После демодуляции цифровой фильтр низких частот отфильтровывает присутствующие в составляющих сигнала высокочастотные помехи. Далее значения составляющих сигнала записываются в оперативном запоминающем устройстве. Блок быстрого преобразования Фурье, управляемый регистром управления, производит разложение записанных в оперативном запоминающем устройстве составляющих сигнала на спектральные гармонические составляющие, перекрывающие частотный диапазон.

Полученные из функционального быстрого преобразования Фурье спектры передаются в блок преобразования гармоник по модулю с объединением двух каналов. Сформированный спектр (объединенный для двух каналов по сигналам I, Q) передается в схему пороговой обработки, где на основе заданного порога определяется наличие в спектре гармоник, позволяющих определить частоту Доплера.

Доплеровский измеритель скорости и угла сноса содержит приемопередающую антенну, использующуюся для каждого из четырех измерительных каналов, формируемых соответствующими лучами антенны. В одном цикле измерения используют сигналы от трех i, j, k из четырех каналов, определяемых лучами антенны. Таким образом, в каждом цикле измерений формируют спектр сигнала от каждого из задействованных лучей, схема обнаружения доплеровской частоты определяет ее после пороговой обработки сформированного спектра. Значения частот Доплера f_{di}, f_{dj}, f_{dk} передаются в микроконтроллер для вычисления составляющих вектора скорости.

Микроконтроллер задает номер активного луча через регистр управления и коммутатор сигналов в приемопередающую антенну и принимает значение доплеровских частот f_{di}, f_{dj}, f_{dk} от схемы обнаружения доплеровской частоты. Для расчета путевой скорости микроконтроллер также принимает по кодовым линиям связи от внешних устройств значения углов эволюции, курса, тангажа, крена, осуществляя их накопление и интерполяцию к единому моменту времени, производит вычисление составляющих V_x, V_y, V_z

скорости вертолета в связанной системе координат и пересчет в составляющие V_{sx} , V_{sy} , V_{sz} , скорости летательного аппарата в географической системе координат и выдачу значений V_{sx} , V_{sy} , V_{sz} на внешнее устройство.

Предложенная схема доплеровского измерителя скорости и угла сноса, модели формирования и обработки сигналов позволяют перейти к разработке детализированных алгоритмов работы для выделения доплеровских частот f_{d1} , f_{d2} , f_{d3} , f_{d4} и вычисления составляющих вектора скорости, модуля путевой скорости, угла сноса и координат вертолета.

Математическое моделирование и экспериментальные исследования подтверждают, что использование частотно-модулированного сигнала в сочетании с цифровой обработкой в системе позволяет реализовать точное вычисление составляющих вектора скорости, модуля путевой скорости, угла сноса и координат вертолета, что важно для решения задач навигации и определения положения вертолета.

Заключение

Таким образом, построение доплеровского измерителя путевой скорости и угла сноса вертолета по четырехлучевой схеме с одной приемопередающей антенной и использование алгоритмической обработки информативных сигналов обеспечивают следующее:

- требуемые погрешность, точное выделение доплеровских частот f_{d1} , f_{d2} , f_{d3} , f_{d4} и достоверность измерения путевой скорости, угла сноса и координат вертолета;
- гибкость при создании алгоритмов обработки измерительных сигналов, оперативность внесения изменений в алгоритмы, динамическое изменение характеристик сигналов, возможность работы в широком диапазоне с различными настройками на этапе исследования и разработки;
- программную обработку измерительных сигналов, не зависящую от разброса и изменения параметров электронных компонентов, что снижает требования к ним и стоимость;
- сокращение затрат на точную настройку и калибровку каналов каждого из четырех лучей в процессе производства и обслуживания;
- снижение массогабаритных характеристик устройства.

Рассмотренные модели информативных сигналов и предложенные способы их обработки в измерительных каналах отличаются высокой спектральной эффективностью и обеспечивают определение выходных параметров доплеровской системы измерения путевой скорости и угла сноса вертолета с одной приемопередающей антенной с требуемыми точностью и достоверностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колчинский В.Е., Мандуровский И.А., Константиновский М.И. Автономные доплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов. М.: Советское радио, 1975. 472 с.
2. Филатов Г.Н., Пуминов Г.С. Безопасность полета в возмущенной атмосфере. М.: Транспорт, 1992. 187 с.
3. Иванов Ю.П., Синяков А.Н., Филатов И.В. Комплексирование информационно-измерительных устройств летательных аппаратов. Л.: Машиностроение, 1984. 207 с.
4. Солдаткин В.М. и др. Исследование погрешностей ультразвуковой системы воздушных параметров движения летательного аппарата // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2023. № 3. С. 86–92.
5. Солдаткин В.М., Ефремова Е.С. Обеспечение помехоустойчивости измерительных каналов системы воздушных сигналов одновинтового вертолета с неподвижным приемником потока // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2024. № 2. С. 83–93.
6. Браславский Д.А., Петров В.В. Точность измерительных устройств. М.: Машиностроение, 1976. 312 с.
7. Weiss S., Stewart R.W. CIC Filter Design for DSP Systems: Analysis, Optimization, and Applications // Digital Signal Processing Handbook. CRC Press, 2017. С. 889–902.
8. Устройство измерения составляющих вектора путевой скорости: пат. 2715740 Рос. Федерация, № 2019116051; заявл. 24.05.2019; опубл. 03.03.2020, Бюл. № 7.

Поступила в редакцию 1.09.25

MODELS OF INPUT INFORMATION SIGNALS, DETERMINATIONS OF OUTPUT PARAMETERS AND FEATURES OF COMPOSITION OF DOPPLER SYSTEM OF MEASURING GROUND SPEED AND DRIFT ANGLE OF A HELICOPTER WITH A SINGLE TRANSMIT/RECEIVE ANTENNA

R.R. Valitov, M.S. Azov, D.E. Chikrin, and S.K. Kiselyov

This article examines the design features of a modern four-beam Doppler system for measuring ground speed and drift angle measurement system for helicopters with a single transmit/receive antenna. Models of the system's input signals and the specifics of determining output parameters based on measurement results are presented. A method for processing the data signal in the measurement system channel using quadrature modulation and digital filtering, ensuring high noise immunity and accuracy, is discussed. A functional diagram of the system and its operating principle are also presented.

Keywords: Doppler system for measuring ground speed and drift angle measurement system, quadrature modulation, Doppler frequency, helicopter, models, information signals, determination of system output parameters.

Валитов Рафаэль Рафикович – заместитель главного конструктора направления радиоэлектронной аппаратуры (АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения», Ульяновск)
E-mail: r.valitov_ukbp@mail.ru

Азов Максим Сергеевич – канд. техн. наук (АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения», Ульяновск)
E-mail: m.azov@mail.ru

Чикрин Дмитрий Евгеньевич – д-р техн. наук (КФУ, Казань)
E-mail: Dmitry.kfu@ya.ru

Киселев Сергей Константинович – д-р техн. наук (АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения», Ульяновск; УлГТУ, Ульяновск)
E-mail: ksk@ulstu.ru

ДВУХКАНАЛЬНЫЙ ДАТЧИК УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

Ф.В. Ехлаков, С.В. Кривошеев

Представлен малогабаритный двухканальный гироскопический датчик угловой скорости с управлением с помощью электромагнитных датчиков силы. Приведена его математическая модель, произведен синтез контура обратной связи методом логарифмических характеристик и представлены результаты моделирования.

Ключевые слова: двухканальный гироскоп, сферическая опора, двухканальный датчик угловой скорости, датчик угла, датчик силы, синтез контуров обратной связи, исследование устойчивости.

Гироскопические датчики угловых скоростей, включая двухканальные датчики угловых скоростей, широко применяются для построения систем стабилизации и навигации [1–3].

В частности, двухканальные гироскопы со сферическим подвесом ротора гироскопа применяются для построения индикаторных гироскопических стабилизаторов различных типов, например, при построении датчика информации непрерывного гироскопического инклинометра ИГН-73 [4–5]. Применение двухканальных гироскопов в подобных системах обусловлено ограничением на максимальный наружный диаметр инклинометрической трубы (по стандарту 110, 73, 42 мм). Благодаря небольшим габаритам возможна реализация измерений полного вектора состояния угловой скорости за счет использования двух двухканальных гироскопов в датчике информации. Также выбор данного типа двухканального датчика угловых скоростей обеспечивает приемлемое соотношение между точностью измерений и стоимостью датчика. Стоимость двухканального гироскопа значительно меньше, но он менее точен, чем, например, динамически настраиваемые гироскопы, также используемые в гироинклинометрах. Наиболее экономичные MEMS-гироскопы ввиду значительной погрешности измерений применяются только как вспомогательные датчики, позволяющие увеличить диапазон измерений углов наклона траектории скважины.

В работе в качестве объекта исследования рассматривается двухканальный датчик угловой скорости [6], построенный на базе малогабаритных двухканальных гироскопов [7–9].

Пример конструкции данной линейки датчиков представлен на рис. 1, *a* (условное изображение гироскопа в разрезе). Основными элементами прибора являются корпус 1, крышка 2, ротор гиромотора 3 на шарикоподшипниковой сферической опоре 4, а также торцевые датчики угла 7 и датчики момента 6 (на рис. 1, *b* представлен вид на основание с датчиками угла и момента). Внутри ротора 3 располагается ферритовое кольцо 5, применяемое в качестве роторной части датчика угла и датчика момента.

Как было сказано, ключевой особенностью двухканальных гироскопов является использование специального сферического шарикоподшипника (опоры), который обеспечивает три степени свободы (одна – неограниченное вращение вокруг оси *X*, по которой направлен кинетический момент \bar{H} , реализуется гистерезисным трехфазным двигателем (на рис. 1, *a*, *b* условно не показан), и две ограниченные степени вокруг осей *Y*, *Z*), что позволяет существенно сократить массу и габариты прибора, а также повысить его надежность за счет сокращения подвижных элементов. В качестве чувствительных элементов в гироскопе применяются торцевые П-образные датчики угла. Для формирования управляющего момента относительно осей *Y*, *Z* используются датчики момента, представляющие собой по каждой оси два торцевых Ш-образных датчика силы электромагнитного типа.

Основной недостаток прибора – наличие квадратичной зависимости момента, развиваемого датчиком момента, от токов управления в его катушках, что дает нелинейную выходную характеристику по напряжению.

Цель работы – исследование устойчивости математической модели двухканального датчика угловых скоростей, построенного на базе двухканального гироскопа со сферическим подвесом ротора гиромотора, с учетом схемной линеаризации [6] характеристик датчиков моментов, которая не предполагает изменение конструкции двухканального гироскопа, в отличие от конструкторской линеаризации, которая предполагает изменение конструкции датчиков силы в двухканальном гироскопе [10].

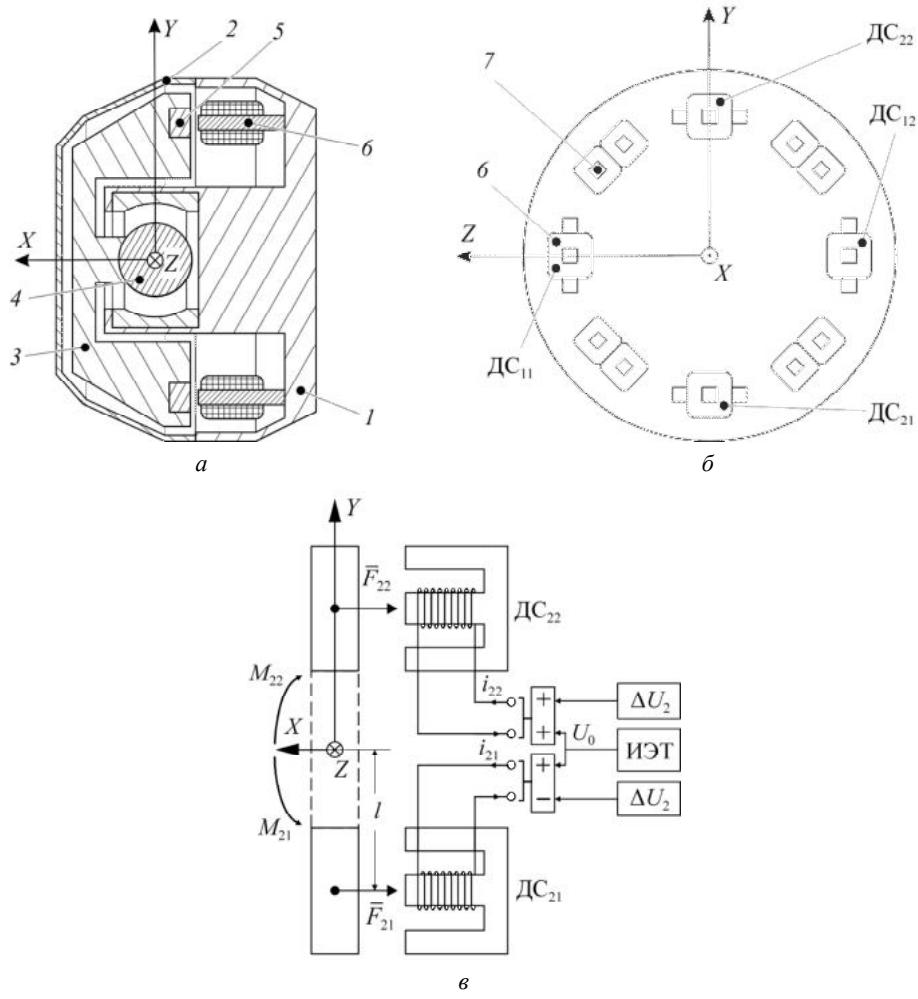


Рис. 1

Принцип работы датчика момента на примере канала управления по оси Z продемонстрирован на рис. 1, в. Датчик момент представлен двумя датчиками силы DC_{21} и DC_{22} . Под воздействием токов i_{21} , i_{22} датчики силы DC_{21} , DC_{22} формируют магнитное поле и притягивают ферритовое кольцо с силой F_{21} , F_{22} . В итоге каждый датчик будет создавать момент относительно оси Z (M_{21} для DC_{21} и M_{22} для DC_{22}).

При этом силы, создаваемые DC_{21} и DC_{22} , равняются

$$F_{21} = k_{DC} i_{21}^2; \quad F_{22} = k_{DC} i_{22}^2,$$

где k_{DC} – коэффициент датчика силы; i_{2i} ($i = \overline{1,2}$) – токи, протекающие в катушках DC_{2i} .

Управляющий момент, создаваемый одним датчиком силы, определяется с учетом знака как

$$M_{21} = -lF_{21} = -lk_{DC} i_{21}^2; \quad M_{22} = lF_{22} = lk_{DC} i_{22}^2, \quad (1)$$

где l – расстояние от оси вращения ротора гироскопа X до точки приложения силы F_{2i} .

Зависимость момента, создаваемого датчиком, от протекающего тока является квадратичной, что при использовании двухканального гироскопа в качестве двухканального датчика угловых скоростей определяет квадратичную зависимость выходного напряжения гироскопа от измеряемой угловой скорости.

Предлагаемый вариант линеаризации выходной характеристики датчика момента описан в работе [6] и представляет собой формирование управляющего момента за счет одновременного использования обоих

датчиков силы, а также введения в контур датчика силы источника эталонного тока, сигнал которого смещает начало характеристики на половину диапазона управления.

Так как в двухканальном датчике угловых скоростей конструкция узла датчиков момента выполнена как в работе [6], то схема управления датчиками силы идентична схеме (см. рис. 1, в).

Рассмотрим работу датчиков силы DC_{21} , DC_{22} , создающих момент относительно оси Z гироскопа. Согласно работе [6] при введении источника эталонного тока в катушках датчиков силы при формировании управляющего момента протекает алгебраическая сумма (разность) токов, формируемая источником эталонного тока и цепями управления, при этом силы, развиваемые датчиками силы, определяются как

$$F_{2i} = k_{DC} i_{2i}^2 = k_{DC} \left(\frac{U_0 \pm \Delta U_2}{R_{DC}} \right)^2 = k_{DC} (i_0 \pm \Delta i_2)^2, \quad i = \overline{1, 2},$$

где U_0 , i_0 – напряжение и ток источника эталонного тока; ΔU_2 , Δi_2 – напряжение и ток управления в катушках DC_{21} и DC_{22} , которые формируются в зависимости от режима работы (командное управление или по типу обратной связи, что используется для построения двухканального датчика угловых скоростей).

При этом $|\Delta i_2| < i_0$, а $i_0 = \frac{i_m}{2}$, где i_m – максимальное значение тока.

Таким образом, с учетом (1) управляющий момент относительно оси Z определяется выражением

$$M_{DM}^Z = l(F_{22} - F_{21}) = lk_{DC} \left((i_0 + \Delta i_2)^2 - (i_0 - \Delta i_2)^2 \right) = 4lk_{DC} i_0 \Delta i_2. \quad (2)$$

Результирующий момент M_Z согласно (2) является функцией от Δi_2 , что дает линейную зависимость в отличие от (1). Канал измерения угловой скорости и формирования управляющего момента относительно оси Y аналогичен полученным выкладкам по каналу Z . Момент, развиваемый датчиком момента по оси Y : $M_{DM}^Y = 4lk_{DC} i_0 \Delta i_1$, где Δi_1 – ток управления в катушках DC_{11} , DC_{12} .

Для построения математической модели двухканального датчика угловых скоростей на базе двухканального гироскопа на сферической опоре ротора была составлена электроинженерная схема датчика (рис. 2), подробно рассмотренная в работе [6].

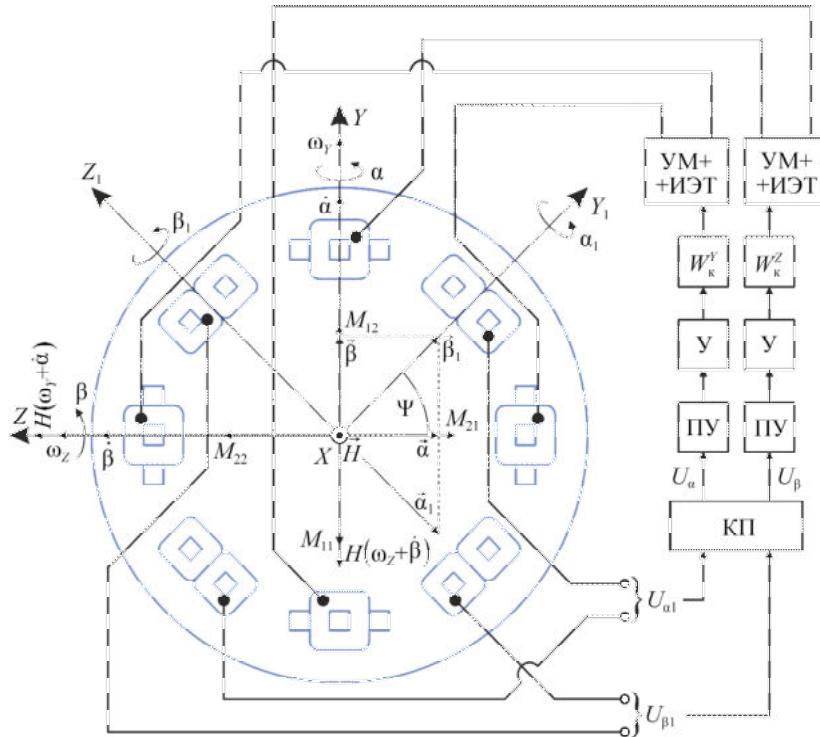


Рис. 2

Математическая модель малогабаритных двухканальных датчиков угловых скоростей состоит из модели двухканального гироскопа [11], модели токов в датчике момента и модели каналов измерения угловой скорости, которая в операторной форме записывается в следующем виде:

- уравнения движения ротора гироскопа относительно системы координат XYZ , связанной с корпусом

$$\begin{cases} -(J_3 p^2 + vp + m_{\text{п}}) \alpha(p) - (Hp + m_{\text{pb}}) \beta(p) - H\omega_Z(p) - (4lk_{\text{DC}} U_0 / (R_{\text{DC}} + R_{\text{M}})) \Delta i_1(p) = 0; \\ -(J_3 p^2 + vp + m_{\text{п}}) \beta(p) + (Hp + m_{\text{pb}}) \alpha(p) + H\omega_Y(p) + (4lk_{\text{DC}} U_0 / (R_{\text{DC}} + R_{\text{M}})) \Delta i_2(p) = 0; \end{cases} \quad (3)$$

- уравнения приращения токов, проходящих через обмотки датчиков силы

$$\begin{aligned} \Delta i_1(p) &= \begin{cases} (k_{\text{ду}} k_{\text{ПУ}} k_{\text{КП}} k_y k_{\text{УМ}} / (R_{\text{DC}} + R_{\text{M}})) W_{\text{кз}}^Y(p) \beta(p) \quad \forall T_{\text{DC}} = 0; \\ (k_{\text{ду}} k_{\text{ПУ}} k_{\text{КП}} k_y k_{\text{УМ}} / [(T_{\text{DC}} p + 1)(R_{\text{DC}} + R_{\text{M}})]) W_{\text{кз}}^Y(p) \beta(p) \quad \forall T_{\text{DC}} \neq 0; \end{cases} \\ \Delta i_2(p) &= \begin{cases} (k_{\text{ду}} k_{\text{ПУ}} k_{\text{КП}} k_y k_{\text{УМ}} / (R_{\text{DC}} + R_{\text{M}})) W_{\text{кз}}^Z(p) \alpha(p) \quad \forall T_{\text{DC}} = 0; \\ (k_{\text{ду}} k_{\text{ПУ}} k_{\text{КП}} k_y k_{\text{УМ}} / [(T_{\text{DC}} p + 1)(R_{\text{DC}} + R_{\text{M}})]) W_{\text{кз}}^Z(p) \alpha(p) \quad \forall T_{\text{DC}} \neq 0; \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

- выходные напряжения по каждому каналу, пропорциональные измеряемым угловым скоростям в соответствии с работой [6]

$$\Delta U(\omega_Y) = \frac{R_{\text{M}} (R_{\text{M}} + R_{\text{DC}}) H}{2lk_{\text{DC}} U_0} \omega_Y; \quad \Delta U(\omega_Z) = \frac{R_{\text{M}} (R_{\text{M}} + R_{\text{DC}}) H}{2lk_{\text{DC}} U_0} \omega_Z, \quad (5)$$

где J_3 – экваториальный момент инерции ротора гироскопа; v – коэффициент воздушного демпфирования; $m_{\text{п}}$ – удельный перекрестный момент, приводящий гироскоп к дрейфу; α – угол отклонения ротора относительно оси Y ; H – кинетический момент ротора; m_{pb} – удельный радиально-восстанавливающий момент гироскопа; β – угол отклонения ротора относительно оси Z ; U_0 – напряжение на выходе источника эталонного тока; R_{DC} – сопротивление обмотки датчиков силы; R_{M} – сопротивление масштабного резистора в контуре измерения угловой скорости; ω_Z – входная угловая скорость относительно оси Z ; ω_Y – входная угловая скорость относительно оси Y ; $k_{\text{ду}}$, $k_{\text{ПУ}}$, $k_{\text{КП}}$, k_y , $k_{\text{УМ}}$ – коэффициенты усиления для датчика угла, предварительного усилителя, координатного преобразователя, усилителя напряжения и усилителя мощности; $W_{\text{кз}}^Y(p)$, $W_{\text{кз}}^Z(p)$ – передаточные функции корректирующих звеньев; $T_{\text{DC}} = L_{\text{DC}} / R_{\text{DC}}$ – постоянная времени катушек датчиков силы.

Приведем постановку задачи.

При известных конструктивных параметрах $H = 10,5 \cdot 10^{-3}$ Нмс, $J_3 = 4,57 \cdot 10^{-6}$ кг·м², $v = 10^{-6}$ Нмс, $k_{\text{DC}} = 86,7$ Н/А², $m_{\text{п}} = 2,1 \cdot 10^{-3}$ Нм/рад, $m_{\text{pb}} = 1,2 \cdot 10^{-5}$ Нм/рад, $l = 1,2 \cdot 10^{-2}$ м, $U_0 = 10$ В, $R_{\text{DC}} = 50$ Ом, $R_{\text{M}} = 150$ Ом, $i_0 = U_0 / (R_{\text{DC}} + R_{\text{M}})$ А, $k_{\text{КП}} = 0,707$, заданных максимальных значениях входных угловых скоростей $\omega_{Ym} = \omega_{Zm} = \omega_m = 30$ град/с = $0,52$ с⁻¹ и углах отклонения ротора $\alpha_m = \beta_m = 5'$ определить ограничение на общую крутизну контура коррекции S , исследовать устойчивость математической модели.

Для исследования устойчивости необходимо, исходя из уравнений статики, которые в соответствии с (3), (4) имеют вид

$$\begin{aligned} m_{\text{pb}} \beta - H\omega_Z - \frac{4lk_{\text{DC}} KU_0}{(R_{\text{DC}} + R_{\text{M}})^2} \beta &= 0; \\ m_{\text{pb}} \alpha + H\omega_Y + \frac{4lk_{\text{DC}} KU_0}{(R_{\text{DC}} + R_{\text{M}})^2} \alpha &= 0, \end{aligned}$$

где $K = k_{\text{д}у}k_{\text{п}у}k_{\text{к}п}k_{\text{у}}k_{\text{у}м}$ – суммарный коэффициент усиления электронных цепей обратных связей, определить статическую крутизну контура коррекции S , которая с учетом очевидного неравенства $m_{\text{п}в}(\beta_m \vee \alpha_m) \ll H\omega_m$ приобретает вид

$$S = \frac{4lk_{\text{д}С}KU_0}{(R_{\text{д}С} + R_m)^2} = 3,75 \text{ Нм/рад.} \quad (6)$$

Исследование устойчивости двухканального датчика угловых скоростей, динамика которого описывается системой уравнений (3) – (4), производится методом логарифмических частотных характеристик – логарифмической амплитудной характеристикой и логарифмической фазовой характеристикой [12].

Так как радиально-восстанавливающий момент $m_{\text{п}в} \ll S$, то им можно пренебречь, так как он почти не будет влиять на работу системы. В таком случае после преобразования операторная модель (3) – (4) с учетом (6) примет вид

$$\begin{cases} p\alpha(p) = \frac{v^{-1}}{(Tp+1)} \left[-m_n\alpha(p) - Hp\beta(p) - H\omega_Z(p) - W_{k3}^Y(p)S\beta(p) \right]; \\ p\beta(p) = \frac{v^{-1}}{(Tp+1)} \left[-m_n\beta(p) + H\alpha(p) + H\omega_Y(p) + W_{k3}^Z(p)S\alpha(p) \right], \end{cases} \quad (7)$$

где $T = J_3/v$ – постоянная времени.

Система (7) является двухканальной с перекрестными антисимметричными обратными связями по гироскопическим моментам. В дальнейшем синтез контуров управления производится при допущении $H\omega_Z = 0$, $M_{\text{д}M}^Y = 0$, что позволит свести систему (7) к одноканальной (рис. 3) и произвести в ней синтез корректирующего звена.

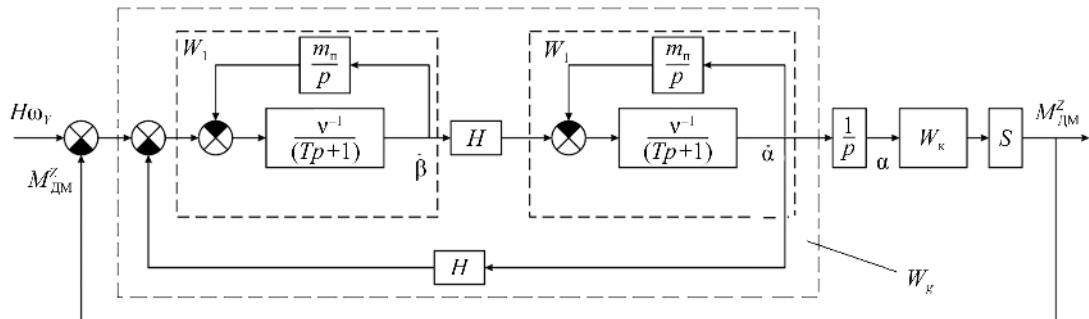


Рис. 3

Передаточная функция разомкнутой системы по моменту сводится к следующему виду:

$$W_{\text{рас}}(p) = \frac{M_{\text{д}M}^Z(p)}{H\omega_Z(p)} = \frac{W_1 H W_1}{1 + W_1 H^2 W_1} \frac{1}{p} S,$$

$$\text{где } W_1(p) = \frac{m_n^{-1} p}{T_1^2 p^2 + T_1^2 T^{-1} p + 1}; \quad T_1^2 = \frac{J_3}{m_n}.$$

Передаточная функция гироскопа $W_g(p)$ записывается как

$$W_g(p) = \frac{H m_n^{-2} p^2}{T_1^4 p^4 + 2 \frac{T_1^4}{T} p^3 + \left[\frac{T_1^4}{T^2} + H^2 m_n^{-2} + 2T_1^2 \right] p^2 + 2 \frac{T_1^2}{T} p + 1}.$$

Определим передаточную функцию разомкнутой системы:

$$W_{\text{pas}}(p) = W_g \frac{S}{p} = \frac{SHm_{\text{n}}^{-2} p}{T_1^4 p^4 + 2 \frac{T_1^4}{T} p^3 + \left[\frac{T_1^4}{T^2} + H^2 m_{\text{n}}^{-2} + 2T_1^2 \right] p^2 + 2 \frac{T_1^2}{T} p + 1} = \\ = \frac{SHm_{\text{n}}^{-2} p}{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4},$$

где $a_0 = T_1^4$; $a_1 = 2 \frac{T_1^4}{T}$; $a_2 = \frac{T_1^4}{T^2} + H^2 m_{\text{n}}^{-2} + 2T_1^2$; $a_3 = 2 \frac{T_1^2}{T}$; $a_4 = 1$.

Графики логарифмической амплитудной характеристики и логарифмической фазовой характеристики для $W_{\text{pas}}(p)$ представлены на рис. 4.

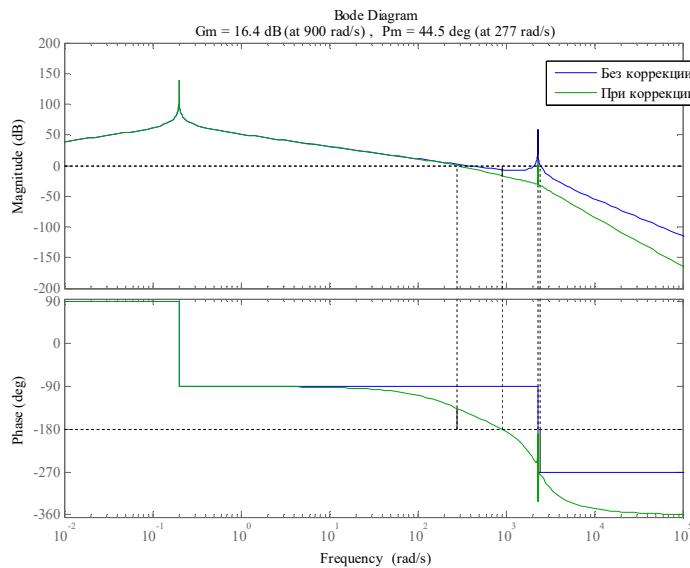


Рис. 4

В силу отрицательных запасов по амплитуде и фазе ($\Delta A = -58,2$ дБ; $\Delta\varphi = -89,9^\circ$) для $W_{\text{pas}}(p)$ система является неустойчивой. На логарифмической амплитудной характеристике наблюдаются два резонансных всплеска: один на частоте $\omega_p = m_{\text{n}}/H$, обусловленной прецессией гироскопа под действием удельного перекрестного момента, второй – на частоте нутации $\omega_{\text{n}} = H/J_{\text{z}}$.

Задача синтеза непрерывной последовательной коррекции заключается в построении такого корректирующего звена, чтобы переходная характеристика замкнутой системы при воздействии сигнала управления в виде ступенчатого воздействия удовлетворяла показателям качества, которые обычно отражают требования технического задания: время регулирования $t_p = 0,05$ с, перерегулирование $\sigma = 30\%$.

В качестве корректирующего звена был выбран режекторный фильтр (фильтр-пробка), настроенный на частоту нутации ω_{n} с добавлением апериодического звена. Данный регулятор может быть реализован на операционных усилителях с RC-цепями [12]:

$$W_{\text{k}}(p) = \frac{T_{\text{n}}^2 + 2\xi_1 T_{\text{n}} + 1}{T_{\text{n}}^2 + 2\xi_2 T_{\text{n}} + 1} \frac{1}{T_{\text{k}} p + 1}, \quad (8)$$

где $\xi_1 = 0,004$; $\xi_2 = 0,5$; $T_{\text{k}} = 0,003$ с.

Передаточная функция скорректированной разомкнутой системы определяется как $W_{\text{RSK}}(p) = W_{\text{pas}}(p)W_{\text{k}}(p)$, при этом передаточная функция замкнутой системы имеет вид $W_{\text{ZSK}}(p) =$

$=W_{RSK}(p)/(1+W_{RSK}(p))$. Учитывая запасы по амплитуде и фазе для скорректированной системы $W_{RSK}(p)$ ($\Delta A = 16,4$ дБ; $\Delta\varphi = 44,5^\circ$), можно сделать вывод о том, что коррекция (8) позволяет добиться устойчивого переходного процесса.

Показатели качества одноканальной замкнутой скорректированной системы представлены в таблице.

Система	Перерегулирование $\sigma, \%$	Время регулирования $t_p, \text{с}$
Одноканальная (синтез коррекции)	24,00	0,0217
Канал Y (поверочное моделирование)	25,28	0,0230
Канал Z (поверочное моделирование)	14,97	0,0150

После синтеза коррекции было выполнено поверочное моделирование двухканального датчика угловых скоростей как двухканальной системы для реальных случаев воздействия угловых скоростей. На рис. 5 приведена реакция системы на воздействие угловой скорости вдоль оси Y : a – переходные процессы по угловым скоростям; b – переходные процессы по углам отклонения ротора гироскопа).

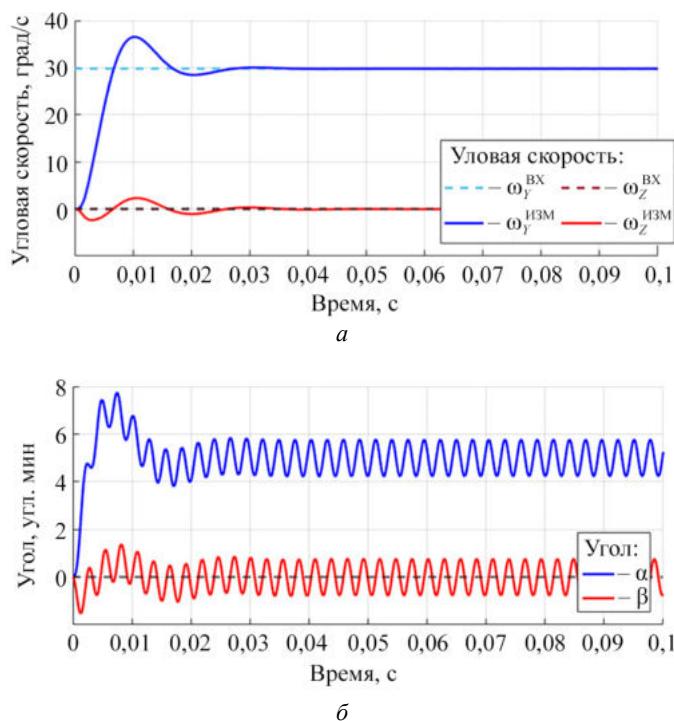


Рис. 5

Рис. 6 демонстрирует реакцию системы при воздействии угловой скорости по обеим осям измерений: a – переходные процессы по угловым скоростям; b – переходные процессы по углам отклонения ротора гироскопа). Основные результаты моделирования подтвердили допустимость синтеза двухканальной системы сведением к одноканальной системе.

Таким образом, на основе технического решения [6], которое позволяет в случае электромагнитного датчика моментов схемным способом линеаризовать выходную характеристику в зависимости от тока управления, с учетом математической модели двухканального гироскопа построена математическая модель двухканального датчика угловых скоростей.

На основе математической модели двухканального датчика угловых скоростей исследована устойчивость его работы методом логарифмических частотных характеристик и проведен синтез корректирующего звена, включенного в цепь коррекции с учетом анализа.

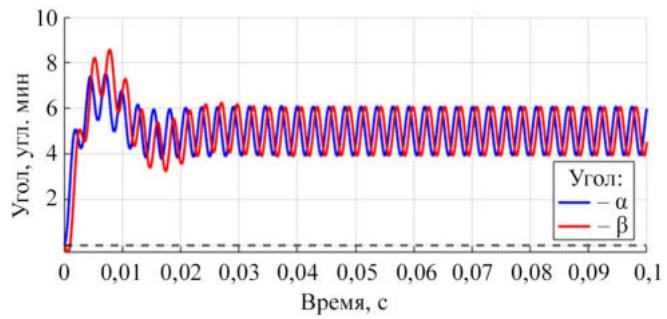
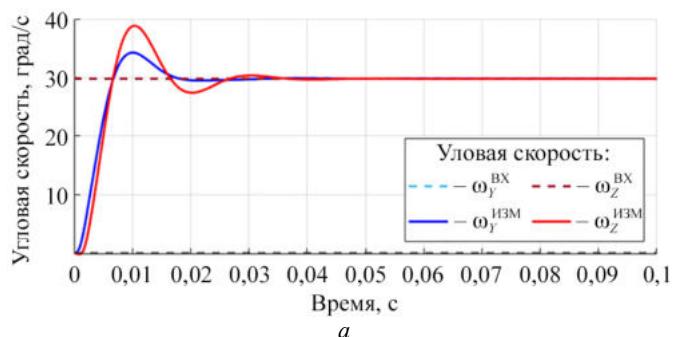


Рис. 6

Предполагается использовать двухканальный датчик угловых скоростей для построения гироинерциального блока гирокопического инклинометра, в котором для построения алгоритма навигации необходимо измерять три проекции мгновенной угловой скорости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Королев М.Н. Исследование технических характеристик современных типов датчиков угловых скоростей // Приборостроение-2019: Материалы 12-й Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 13–15 нояб. 2019. Минск: БНТУ, 2019. С. 21–23.
2. Депутатова Е.А., Калихман Д.М., Таракнов Н.В. Современная методика анализа динамических характеристик навигационных приборов и поворотных стендов для их контроля. Саратов: Саратовский гос. техн. ун-т им. Гагарина Ю.А., 2024. 156 с.
3. Виноградов Г.М., Кривошеев С.В. Динамически настраиваемые гироскопы. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2008. 128 с.
4. Гуськов А.А. и др. Непрерывные гирокопические инклинометры – особенности построения и результаты эксплуатации // Каротажник. 2009. № 181. С. 12–30.
5. Гуськов А.А., Норинская И.В. Метод начальной азимутальной ориентации гироинклинометра // Изв. ТулГУ. Технические науки. Системный анализ, управление и обработка информации. 2019. № 8. С. 217–231.
6. Двухканальный датчик угловой скорости: пат. 2725880 Рос. Федерации, № 2019145510; заявл. 30.12.2019; опубл. 7.07.2020, Бюл. № 19.
7. Гироскоп (варианты): пат. 2460040 Рос. Федерации, № 2011109981/28; заявл. 16.03.2011; опубл. 27.08.2012, Бюл. № 24.
8. Гироскоп (варианты): пат. 2308680 Рос. Федерации, № 2005137296/28; заявл. 30.11.2005, опубл. 10.06.2007, Бюл. № 29.
9. Гироскоп: пат. 2446382 Рос. Федерации, № 2010133531/28, заявл. 10.08.2010; опубл. 27.03.2012, Бюл. № 9.
10. Самулюк Ф.В. Гироскоп на сферической шарикоподшипниковой опоре с линейной характеристикой датчика момента // 24-е Туполевские чтения: Материалы междунар. молодеж. конф., г. Казань, 7–8 нояб. 2019: Сб. докл.: в 6 т. Казань: Изд-во ИП Сагиева А.Р., 2019. Т. 3. С. 109–113.
11. Распопов В.Я. и др. Гирокопические датчики углов со сферическим шарикоподшипниковым подвесом // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2016. № 10. С. 266–280.
12. Гаркушенко В.И. Теория автоматического управления: практическое пособие к выполнению курсовой работы [Электронный ресурс]. URL: http://elibs.kai.ru/_docs_file/452/HTML/index.html (дата обращения: 5.05.25).

Поступила в редакцию 5.06.25

TWO-CHANNEL ANGULAR VELOCITY SENSOR

F.V. Ekhlakov and S.V. Krivosheev

A small-sized two-channel gyroscopic angular velocity sensor with electromagnetic force sensors is presented. Its mathematical model is presented, the feedback loop is synthesized by the method of logarithmic characteristics, and the simulation results are presented.

Keywords: two-channel gyroscope, spherical bearing, two-channel angular velocity sensor, angle sensor, force sensor, synthesis of feedback loops, assessment of sustainability.

Ехлаков Филипп Владимирович – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: ekhlakov.ph@yandex.ru

Кривошеев Сергей Валентинович – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: ksv-ap2-au-kai@mail.ru

ИНФОРМАТИВНОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОБИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ И МУТНОСТИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В.К. Козлов, Д.М. Валиуллина, А.Х. Сабитов, И.М. Минегалиев

Анализируется информативность показателей пробивного напряжения и мутности трансформаторного масла для контроля технического состояния изоляции силовых трансформаторов. Проведены экспериментальные исследования влияния электрического пробоя на химические и физические свойства трансформаторного масла. Рассмотрен вопрос влияния показателя мутности масла на точность диагностики состояния трансформатора.

Ключевые слова: трансформаторное масло, пробивное напряжение, коллоидные частицы, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, мутность масла, спектры пропускания, экспертиза параметров.

Основной документ, регламентирующий перечень испытаний силовых трансформаторов в процессе эксплуатации, предельно допустимые значения контролируемых показателей и периодичность контроля, – РД 34.45-51.300-97 [1] с расширенным перечнем контролируемых параметров, где в дополнение к традиционным показателям оценки состояния силовых трансформаторов введены измерения пробивного напряжения и мутности.

В последнее время состав комплекса параметров для контроля состояния изоляции трансформаторов, их нормирования и оценки их диагностической ценности определяется эксперты путем на основании знаний о физических процессах, происходящих в оборудовании, с учетом накопленного опыта эксплуатации, анализа повреждаемости результатов контроля и ремонта. При этом до недавнего времени для электрооборудования, включая трансформаторы, не использовались количественные методы оценки диагностической ценности контролируемых параметров. Такая возможность описана в работе [2], при этом количественная оценка диагностической ценности показателей базируется на положениях и методах, разработанных в теории информации.

Отметим, что значения предельных показателей состояния оборудования как в российских [1, 3, 4], так и зарубежных работах [5–8], как правило, не имеют достаточного научно-технического обоснования и устанавливаются методом экспертных оценок. При этом корректировка, внесение необходимых обоснованных изменений и дополнений, а не переработка РД 34.45-51.300-97 является методологической основой при совершенствовании норм испытаний электрооборудования [3].

Следует отметить, что в действующем РД 34.45-51.300-97 отсутствуют показатели, отражающие влияние разброса пробивного напряжения масла на статистические характеристики состояния масла силовых трансформаторов [3]. В частности, актуальны вопросы статистической обоснованности многократных измерений пробивного напряжения $U_{\text{пр}}$ (так как каждый пробой изменяет свойства масла [9–11]), а также проблема корректности методик измерения мутности, используемой для оценки загрязнения коллоидными частицами [12–14].

Согласно результатам современных исследований [15–19] традиционные показатели недостаточно отражают процессы старения изоляции, особенно при наличии наночастиц [20–22] или влаги.

Целью данной работы является оценка информативности показателей пробивного напряжения $U_{\text{пр}}$ и мутности трансформаторного масла для диагностики состояния изоляции силовых трансформаторов на основе экспериментального анализа их изменений при электрических воздействиях и оптических измерениях.

Измерения параметров осуществлялись на серийно выпускаемом оборудовании. Для проведения экспериментальных исследований были отобраны образцы масла из работающего оборудования «Казанских электрических сетей». Спектры пропускания трансформаторных масел записаны при комнатной температуре в кварцевых кюветах толщиной 50 нм на спектрометре Avantes. Диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) измерялись на приборе «Тангенс-3М». Пробивное

напряжение трансформаторного масла исследовалось на приборе АИМ-90А. Для уменьшения разложения жидкого материала в момент пробоя в приборе обеспечено минимально короткое время горения дуги и ограничена сила тока при пробое за счет автоматического выключателя и включения токоограничивающего сопротивления [23].

Трансформаторное масло подвергалось многократному пробою в серии из ста пробоев, и определялось пробивное напряжение. Серия проводилась с усреднениями по пяти измерениям. Результаты измерений пробивного напряжения приведены на рис. 1.

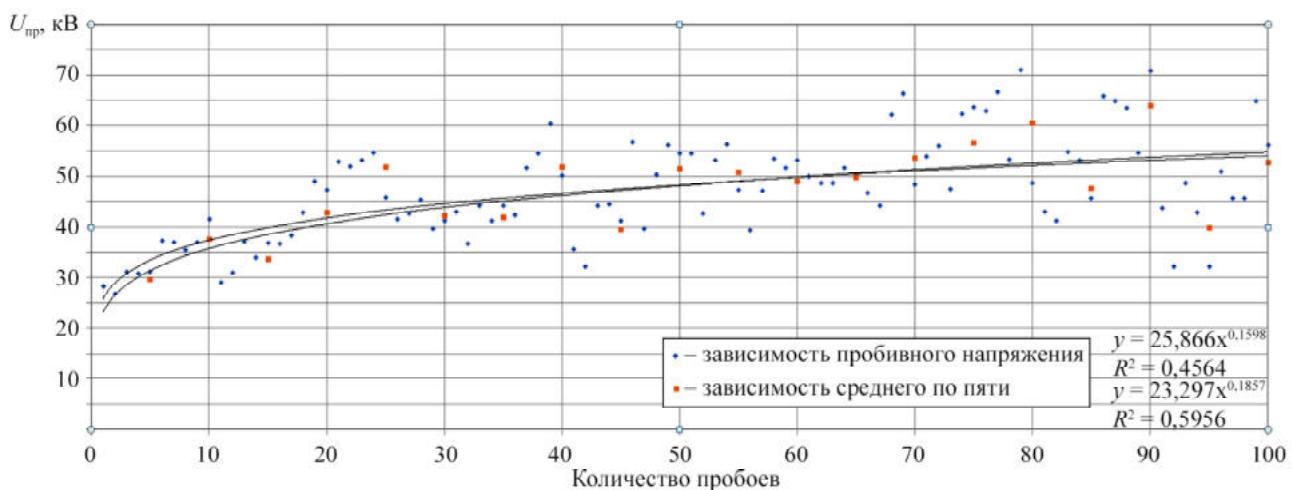


Рис. 1

В начале измерений у исходного образца масла были определены диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь. Эти же характеристики были определены у трансформаторного масла после ста пробоев. Результаты измерений приведены в таблице.

Измерение	Пустая измерительная ячейка	Масло исходного образца	Масло конечного образца
$\operatorname{tg}\delta$	0,0004	0,00022	0,00025
$\operatorname{tg}\delta$ при 70 °C	-	0,00183	0,00107
$\operatorname{tg}\delta$ при 90 °C	-	0,00448	0,00227
ϵ_x	-	2,206	2,145
ϵ_x при 70 °C	-	2,002	1,612
ϵ_x при 90 °C	-	1,863	1,271

Для выявления природы возрастания пробивного напряжения в результате пробоев масла дополнительно исследовали спектры пропускания исходного (до пробоев) образца и образца, подвергнутого ста пробоям. Спектры пропускания этих образцов приведены на рис. 2.

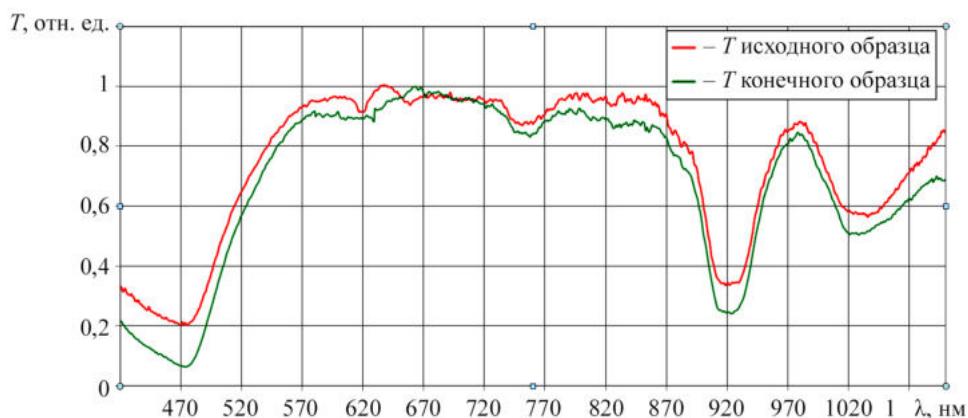


Рис. 2

Как следует из рис. 1, пробивное напряжение после серии из ста пробоев увеличилось от 30 кВ до 55 кВ, т. е. в среднем на 250 В на один пробой.

Зависимость пробивного напряжения от количества электрических пробоев свидетельствует об изменении химического состава, количества и размеров коллоидных частиц в трансформаторном масле, причем, как следует из таблицы, происходит уменьшение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь трансформаторного масла после воздействия на него электрических пробоев.

Для алканов (парафинов) характерна наименьшая диэлектрическая проницаемость, она повышается при переходе к аренам (ароматическим углеводородам) [24]. От содержания асфальто-смолистых веществ в нефти зависят электрические свойства, и с увеличением их значений можно говорить об электрической проводимости нефти. Величина удельной электропроводности нефтей изменяется в диапазоне $0,5 \cdot 10^7 \dots 0,5 \cdot 10^{-6}$ Ом \cdot м $^{-1}$, светлых нефтепродуктов – в диапазоне $10^{-10} \dots 10^{-16}$ (Ом \cdot м $^{-1}$) [25].

Таким образом, по полученным результатам можно сделать вывод о том, что при электрических разрядах в трансформаторном масле происходят разрывы сложных молекул с образованием более простых. Данный процесс включает преобразование ароматических соединений в парафиновые и разрыв больших коллоидных частиц с получением более мелких, что приводит к уменьшению тгб. Подтверждением этого являются спектры пропускания трансформаторного масла (см. рис. 2). Происходит изменение пропускания в области длин волн короче 600 нм, что связано с молекулярным поглощением, и изменение пропускания в области длин волн больше 600 нм, которое связано с рассеянием на коллоидных частицах [11, 19]. Изменение рассеяния обусловлено дроблением коллоидных частиц на более мелкие и увеличением их количества.

Происходящие изменения свойств трансформаторного масла при электрическом пробое свидетельствуют о том, что каждое последующее измерение пробивного напряжения происходит в изменившейся среде. Следовательно, усреднение значений пробивного напряжения по серии измерений статистически не обосновано, и параметр масла – пробивное напряжение – может рассматриваться как качественная характеристика трансформаторного масла и не может применяться как количественная характеристика при исследовании, как например, электрической прочности трансформаторного масла с наночастицами [20].

Вторым показателем качества трансформаторного масла, с точки зрения его информативности, является мутность, которая определяется согласно методическим указаниям [26]. Сущность методики заключается в расчете мутности трансформаторного масла на основе определения оптической плотности при температуре 20 °С на длине волны $\lambda = 490$ нм, измеряемой при угле 0° к направлению освещдающего пучка относительно эталонной жидкости.

За рубежом применяется стандартный метод испытания для измерения мутности в минеральном изоляционном масле нефтяного происхождения, но для минимизации помех используют свет с узкой полосой пропускания, который не поглощается испытуемым образцом, с длиной волны 600 ± 6 нм и шириной полосы 40 ± 8 нм [12], и именно эти длины волн отличают российский и зарубежный метод измерения мутности. Как показано в работе [11], спектр пропускания трансформаторного масла в видимой области формируется в интервале длин волн короче 600 нм поглощением молекул ароматических соединений, а в интервале длин волн больше 600 нм пропускание трансформаторного масла обусловлено рассеянием на коллоидных частицах.

Таким образом, измеряя пропускание трансформаторного масла на длине волны $\lambda = 490$ нм, измеряют чисто молекулярное поглощение, которое является помехой для измерения рассеяния (мутности) на коллоидных частицах. Корректное измерение мутности может проводиться только на длинах волн 600 нм и выше.

Таким образом, в результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

Электрический пробой трансформаторного масла существенно изменяет химический состав и размеры коллоидных частиц, что не позволяет проводить корректное усреднение получаемого пробивного напряжения по нескольким измерениям. Пробивное напряжение, как параметр качества трансформаторного масла, может быть лишь качественным и не может применяться для количественных, статистически обоснованных измерений электрических характеристик трансформаторного масла.

Параметр мутности трансформаторного масла не может определяться на длине волны $\lambda = 490$ нм, так как на этой длине волны наблюдается интенсивное молекулярное поглощение ароматических молекул, являющееся помехой для измерения коллоидного рассеяния, которое необходимо измерять на длинах волн больше 600 нм, где показатель мутности трансформаторного масла не искажается молекулярным поглощением [12], т. е. длина волны [26], на которой происходит измерение (490 нм), должна быть заменена на длину волны в районе 600 нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. М.: НЦ ЭНАС, 2004. 254 с.
2. *Львов М.Ю.* Оценка информативности показателей контроля технического состояния изоляции трансформаторного оборудования // Электрические станции. 2002. № 12. С. 44–51.
3. *Львов М.Ю. и др.* Методологические и методические аспекты совершенствования и развития РД «Объем и нормы испытаний электрооборудования» для силовых трансформаторов и автотрансформаторов // Энергоэксперт. 2016. № 5 (58). С. 40–44.
4. *Назарычев А.Н., Мельникова О.С., Сулыненков И.Н.* Диагностика главной изоляции силовых трансформаторов по статистическому критерию электрической прочности масла // Электричество. 2022. № 9. С. 22–32.
5. IEC 60422:2013. Mineral Insulating Oils in Electrical Equipment – Supervision and Maintenance Guidance.
6. IEEE Std C57.106-2015. IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment.
7. *Mishra D., Baral A., Chakravorti S.* Reliable Assessment of Oil-Paper Insulation Used in Power Transformer Using Concise Dielectric Response Measurement // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2023. Vol. 30. № 3. P. 1255–1264.
8. *Barkas K., et al.* Condition Assessment of Power Transformers through DGA Measurements Evaluation Using Adaptive Algorithms and Deep Learning // Energies. 2023. Vol. 16. № 1. Article № 54.
9. *Munajad A., Subroto C., Suwarno.* Study on the Effects of Thermal Aging on Insulating Paper for High Voltage Transformer Composite with Natural Ester from Palm Oil Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) // Energies. 2017. Vol. 10. № 11. Article № 1857.
10. *Pan H. et al.* Detection of Cellulose Particles in Transformer Oil Based on Transport of Intensity Equation // Energies. 2022. Vol. 15. № 16. Article № 5836.
11. *Козлов В.К. и др.* Влияние молекулярного поглощения и дисперсно-коллоидного рассеяния на спектры видимого диапазона трансформаторных масел // Международный научно-исследовательский журнал. 2025. № 2 (152). С. 1–9.
12. ASTM D6181-03. Standard Test Method for Measurement of Turbidity in Mineral Insulating Oil of Petroleum Origin [Electronical Resource]. URL: <https://www.astm.org/d6181-03.html> (дата обращения: 4.05.2025).
13. *Hadjadj Y. et al.* Assessing Insulating Oil Degradation by Means of Turbidity and UV/VIS Spectrophotometry Measurements // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. Vol. 22. № 5. P. 2653–2660.
14. *Leong Y.S. et al.* UVVis Spectroscopy: A New Approach for Assessing the Color Index of Transformer Insulating Oil // Sensors. 2018. Vol. 18. № 7. Article № 2175.
15. *Elele U. et al.* Towards Online Ageing Detection in Transformer Oil: A Review // Sensors. 2022. Vol. 22. № 20. Article № 7923.
16. *Wang Y. et al.* Acoustic Sensors for Monitoring and Localizing Partial Discharge Signals in Oil Immersed Transformers under Array Configuration // Sensors. 2024. Vol. 24. № 14. Article № 4704.
17. *Zhang E. et al.* State-of-Art Review on Chemical Indicators for Monitoring the Aging Status of Oil-Immersed Transformer Paper Insulation // Energies. 2023. Vol. 16. № 3. Article № 1396.
18. *Cinar M. A.* Modified Dissolved Gas Analysis Scoring Approach for Transformer Health Evaluation Considering Delta and Rate Values of Dissolved Gases in Mineral Oil // Energies. 2024. Vol. 17. № 16. Article № 4161.
19. *Валиуллина Д.М., Козлов В.К., Садыков Э.М.* Исследование корреляций между характеристиками трансформаторного масла // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2021. № 1. С. 62–66.
20. *Ридель А.В. и др.* Электрическая прочность трансформаторного масла с наночастицами // Средства и методы неразрушающего контроля. Общие вопросы диагностирования, эксплуатации и ремонта электротехнического оборудования. Новосибирск: НГТУ, 2024. С. 181–184.
21. *Bhatt M. A., Bhatt P. J.* A Review on Electrical Characteristics of Nanofluid Based Transformer Oil // Indian Journal of Science and Technology. 2019. Vol. 12. № 27. P. 1–20.

22. Oommen T.V., Prevost T.A. Cellulose Insulation in Oil-Filled Power Transformers: Part II – Maintaining Insulation Integrity and Life // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2006. Vol. 22. № 2. P. 5–14.
23. ГОСТ 6581-75. Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний от 01.01.1977 [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004511> (дата обращения: 4.05.2025).
24. Батуева И.Ю. и др. Химия нефти. Л.: Химия, 1984. 360 с.
25. Богомолов А.И. и др. Химия нефти и газа. Л.: Химия, 1989. 424 с.
26. Методические указания по определению оптической мутности трансформаторного масла герметичных вводов 110 кВ и выше силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов [Электронный ресурс]. URL: <https://library-full.nadzor-info.ru/doc/51464> (дата обращения: 4.05.2025).

Поступила в редакцию 4.06.25

INFORMATIVENESS OF BREAKDOWN VOLTAGE AND TURBIDITY INDICATORS FOR MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF TRANSFORMER EQUIPMENT INSULATION

V.K. Kozlov, D.M. Valiullina, A.Kh. Sabitov, and I.M. Minegaliev

This paper is devoted to the study of the informative value of breakdown voltage and transformer oil turbidity indicators for monitoring the technical condition of power transformer insulation. Experimental studies were conducted on the effect of electrical breakdown on the chemical and physical properties of transformer oil. The influence of oil turbidity on the accuracy of transformer condition diagnostics was considered.

Keywords: transformer oil, breakdown voltage, colloidal particles, dielectric permeability, dielectric loss tangent, oil turbidity, transmission spectra, parameter analysis.

Козлов Владимир Константинович – д-р физ.-мат. наук (КГЭУ, Казань)
E-mail: kozlov_vk@bk.ru

Валиуллина Диляя Мансуровна – канд. техн. наук (КГЭУ, Казань)
E-mail: valiullinadiliya@mail.ru

Сабитов Айдар Хайдарович – канд. техн. наук (КГЭУ, Казань)
E-mail: sabitov_ah@mail.ru

Минегалиев Ильсур Маратович – аспирант (КГЭУ, Казань)
E-mail: minegaliev.1998@mail.ru

РОЛЬ МЕЖФАЗНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ И СКИН-ЭФФЕКТА В МИКРОВОЛНОВОМ ЭКРАНИРОВАНИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Е.А. Петухова

Представлены результаты исследования механизмов экранирования электромагнитного излучения СВЧ-диапазона в полимерных композитах на основе полипропилена с гибридным углеродным наполнителем (технический углерод и углеродные нанотрубки). Методом решения задачи с использованием модели Нильсена определены комплексные диэлектрические проницаемости наполнителей. Методом конечно-элементного моделирования в среде COMSOL проанализировано распределение электромагнитного поля в элементарном объеме композита и количественно оценен вклад исследуемых эффектов.

Ключевые слова: полимерные композиты, электромагнитное экранирование, межфазная поляризация, скин-эффект, углеродные нанотрубки, диэлектрическая проницаемость, микроволновое излучение.

Интенсификация развития электронных устройств и систем беспроводной связи стимулирует научно-исследовательскую активность в области создания эффективных материалов для экранирования электромагнитных помех [1].

Полимерные композиционные материалы с электропроводящими наполнителями являются перспективной альтернативой традиционным металлическим экранам благодаря низкой плотности, гибкости, коррозионной стойкости и технологичности [2]. Однако при создании таких материалов возникает необходимость учета сложных физических явлений, возникающих на микроуровне.

Особенно актуально изучение роли межфазной поляризации и скин-эффекта в формировании экранирующих свойств композитов [3–5]. Межфазная поляризация, связанная с накоплением зарядов на границах раздела сред с различными диэлектрическими свойствами, может существенно усиливать поляризационные потери. Скин-эффект, проявляющийся в вытеснении высокочастотных токов на поверхность проводящих включений, влияет на эффективную проводимость композита [6], особенно в композитах с наноразмерными наполнителями – углеродных нанотрубках, – где геометрия и ориентация частиц играют ключевую роль в распределении электромагнитного поля.

Целью данной работы является исследование вклада межфазной поляризации и скин-эффекта в механизм экранирования микроволнового излучения полимерными композитами с углеродными наполнителями.

Для исследований были изготовлены композитные пленки на основе полипропилена (ПП Бален 01270) и мастербатч (МБ) с гибридным углеродным наполнителем (смесь технического углерода и углеродных нанотрубок). Процесс получения включал этап смешения в расплаве с использованием двухшнекового микрокомпаундера Xplore Micro Compounder 15H при температуре 230 °C с последующей экструзией через плоскощелевую фильтру размером 35×0,2 мм. Толщина пленки – 300 мкм. Этот метод обеспечивает однородное распределение наполнителя, минимизируя агломерацию частиц и сохраняя их функциональные свойства.

Измерения экранирующей эффективности проводились на экспериментальной установке с источником СВЧ-излучения (магнетрон с частотой 300 ГГц, что соответствует длине волны 1 мм в вакууме) и детектором (рис. 1). Для каждого образца проводились многократные измерения с последующей статистической обработкой данных.

Результаты показали, что у образца с содержанием углеродных частиц 8 мас. % наблюдается эффективность экранирования 100 % при удельном сопротивлении $8,51 \times 10$ Ом·м (таблица). Это объясняется формированием непрерывной проводящей сети в матрице, усиливаемой межфазными эффектами [7]. При сравнении с образцами с меньшим содержанием наполнителя (5 и 7,5 %) выявлен экспоненциальный рост эффективности с увеличением концентрации, что подтверждают теоретические модели перколяции.

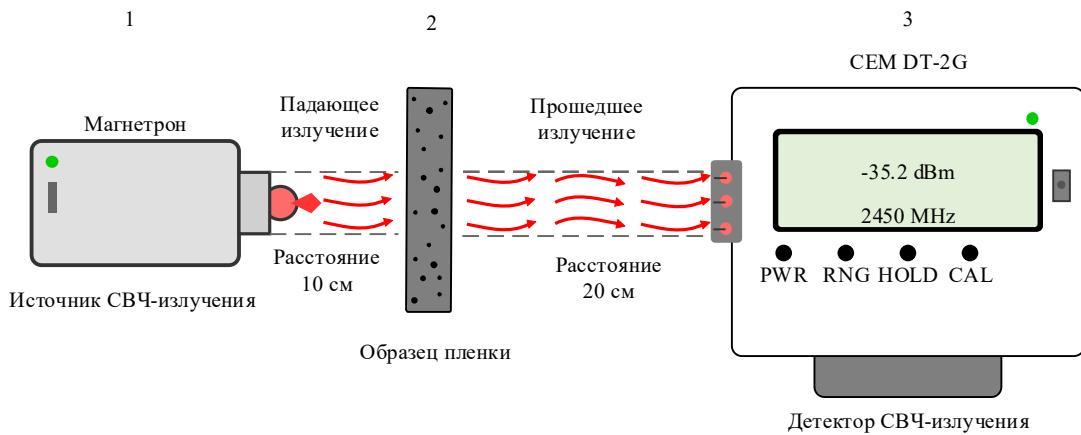


Рис. 1

Номер образца	Содержание	Массовая доля углеродных частиц, %	Эффективность экранирования δ , %	Удельное электрическое сопротивление
1	ПП + 50 % МБ	5,0	53,4	$5,32 \cdot 10^6$
2	ПП + 75 % МБ	7,5	68,2	$1,02 \cdot 10^6$
3	ПП + 80 % МБ	8,0	100,0	$8,51 \cdot 10^4$

Для описания электромагнитных свойств композита и оценки комплексной диэлектрической проницаемости наполнителей использовалась модель Нильсена [7]:

$$\epsilon_{\text{комп}} = \epsilon_m \frac{1 + AB\theta}{1 - Bv\theta},$$

где ϵ_m – диэлектрическая проницаемость матрицы; θ – концентрация наполнителя; $B = \frac{\epsilon_f/\epsilon_m - 1}{\epsilon_f/\epsilon_m + A}$, ϵ_f – комплексная диэлектрическая проницаемость наполнителя; $v = 1 + \frac{1 - V}{V^2\theta}$ – предельный объем, занимаемый наполнителем (волях); A – коэффициент, учитывающий геометрию образца (для сферических частиц $A = 1,5$, для цилиндрических $A = 3,5$).

Высокие значения мнимой части диэлектрической проницаемости, особенно для углеродных нанотрубок, свидетельствуют о значительных потерях на поляризацию.

На основе экспериментальных данных [8–11] были получены значения для технического углерода $\epsilon_{\text{ТУ}} = 8,1 \div 0,62i$ и углеродных нанотрубок $\epsilon_{\text{УНТ}} = 27,3 \div 18,4i$.

Методом конечно-элементного моделирования в среде COMSOL Multiphysics проанализировано распределение электромагнитного поля в элементарном объеме композита со случайнм распределением наполнителя. Неструктурированная сетка тетраэдральных элементов строилась с учетом геометрии частиц. Технический углерод был аппроксимирован в виде сфер, в то время как углеродные нанотрубки были представлены цилиндрами с осевым соотношением 18:0,5 (36:1) (рис. 2). Характерный размер элементов в области полимерной матрицы и для сферических частиц – 1–2 мкм. В зонах расположения углеродных нанотрубок и вблизи границ раздела фаз сетка аддитивно сгущалась до размеров 0,1–0,5 мкм, что обеспечивало корректный учет таких явлений, как межфазная поляризация и скин-эффект. Удельное объемное электрическое сопротивление – 10^{-4} Ом·м, теплопроводность – 1200 Вт/м·К. Удельное объемное электрическое сопротивление ПП Бален – 10^{14} Ом·м, теплопроводность – 0,2 Вт/м·К.

Микроволновое излучение частотой 300 ГГц (длина волны – 1 мм) падало перпендикулярно на одну из граней кубического элемента размером $20 \times 20 \times 20$ мкм. Волна распространялась через объем и выходила через противоположную грань, в то время как остальные четыре грани считались идеально изолированными. Для исследования температурных эффектов на одной из граней задавался источник нагре-

ва/охлаждения, а противоположная грань поддерживалась при постоянной температуре 293 К, тем самым моделировалась тепловая изоляция.

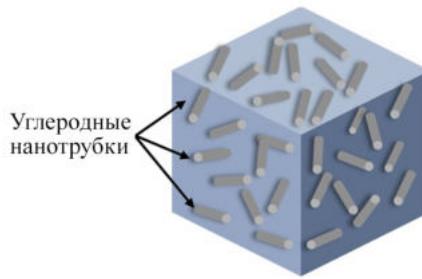


Рис. 2

Решение системы уравнений Максвелла выполнялось методом конечных элементов с учетом анизотропии свойств углеродных нанотрубок. Для этого использовалась анизотропная модель диэлектрической проницаемости, в которой значения вдоль и поперек оси нанотрубок различались. В моделировании учитывалась пространственная ориентация углеродных нанотрубок, параллельная и перпендикулярная направлению распространения волны, что позволяло анализировать влияние ориентации на экранирующие свойства. Геометрия частиц учитывалась через коэффициент A модели Нильсена, который для цилиндрических частиц (углеродных нанотрубок) составлял $A = 3,5$.

Методом конечно-элементного моделирования в среде COMSOL Multiphysics было проанализировано распределение электромагнитного поля в элементарном объеме композита. Решение системы уравнений Максвелла позволило визуализировать процессы межфазной поляризации. Как показано на рис. 3, эффект Максвелла – Вагнера проявляется в виде значительного накопления заряда на границах раздела матрица – наполнитель, что приводит к образованию дополнительных дипольных моментов и усилению поглощения электромагнитной энергии. Наблюдалась концентрация магнитного поля вблизи крупных агломератов наполнителя.

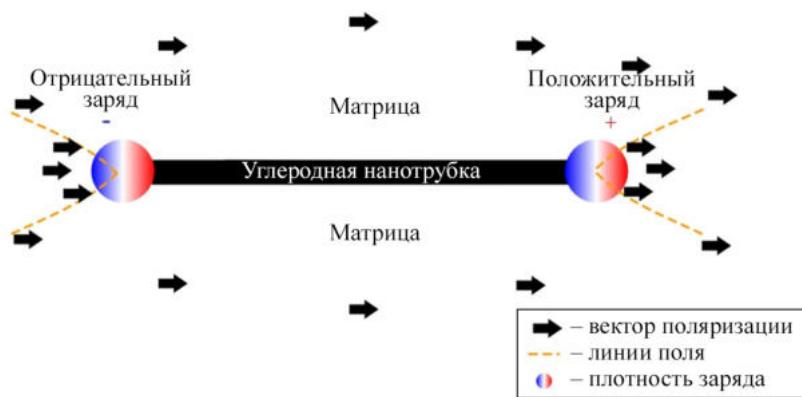


Рис. 3

На рис. 4 представлено трехмерное распределение электрического поля и поверхностной поляризации в структуре. Геометрия и ориентация нанотрубок влияют на локальное распределение электрического поля, которое визуализировано с помощью стрелок, показывающих направление и интенсивность поля на поверхности каждой трубы. Цветовая шкала, нанесенная на поверхность нанотрубок, отражает величину поверхностной поляризации – от низких значений (синий цвет) до максимальных (красный цвет).

Наибольшая поляризация наблюдается в отдельных участках некоторых нанотрубок, что связано с их положением и взаимным расположением в пространстве. Данные результаты демонстрируют сложное взаимодействие электромагнитных полей вnanoструктурах и подтверждают требование обязательного

заземления таких материалов при их использовании в качестве экранирующих для предотвращения накопления зарядов и возникновения разности потенциалов.

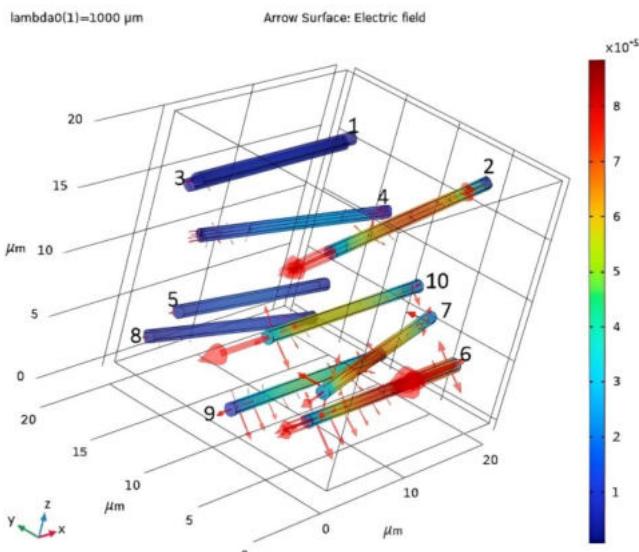


Рис. 4

Исследование скин-эффекта показало неравномерное распределение поверхностной поляризации вдоль оси углеродных нанотрубок. Обнаружено резкое возрастание поляризации вблизи концов цилиндрических частиц на расстоянии 0,1–0,2 мкм (рис. 5), что соответствует толщине скин-слоя. Толщина скин-слоя оценена величиной 0,18 мкм.

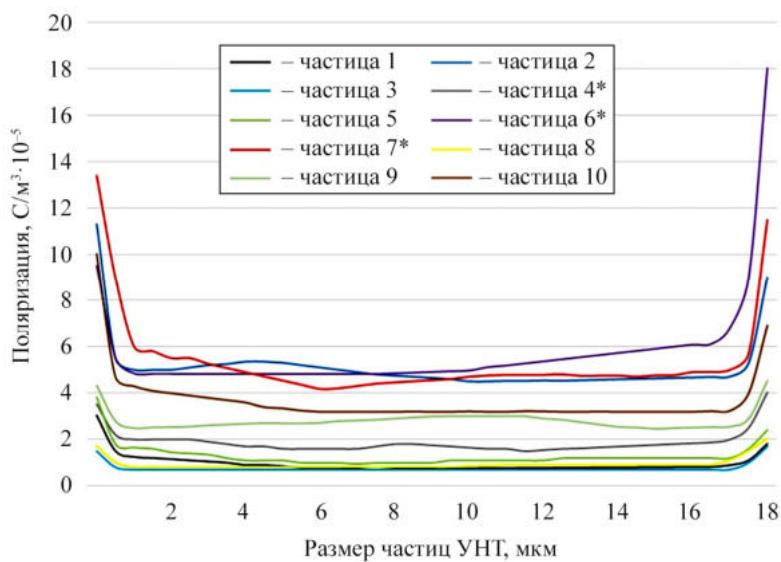


Рис. 5

Толщина скин-слоя δ для углеродных нанотрубок вычисляется по формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \mu_r \sigma}},$$

где σ – проводимость углеродных нанотрубок, См/м; ω – угловая частота, рад/с.

Анализ влияния ориентации анизотропных частиц показал, что наибольшая эффективность экранирования достигается при ориентации углеродных нанотрубок перпендикулярно направлению распространения

странения электромагнитной волны. В этом случае наблюдается наиболее эффективное рассеяние энергии. Моделирование подтвердило, что параллельная ориентация снижает эффективность на 20–30 % из-за уменьшения взаимодействия поля с поверхностью частиц.

В результате проведенного исследования установлено, что межфазная поляризация и скин-эффект играют определяющую роль в формировании экранирующих свойств полимерных композитов на основе полипропилена с гибридным углеродным наполнителем.

Экспериментально установлены высокие значения экранирования для полипропиленовых пленок толщиной 300 мкм.

Для образца с содержанием углеродных частиц 8 мас. % (ПП + 80 % МБ) при частоте 300 ГГц ($\lambda = 1$ мм) достигнута эффективность экранирования 100 %, что сопровождалось снижением удельного электрического сопротивления до $8,51 \cdot 10^4$ Ом·м.

Обнаружено резкое возрастание поляризации в приконцевых областях цилиндрических частиц на характерном расстоянии 0,1–0,2 мкм, что соответствует проявлению скин-эффекта в проводящих включениях.

Полученное значение толщины скин-слоя 0,18 мкм для частоты 300 ГГц указывает на то, что именно поверхностные слои углеродных нанотрубок являются основной зоной диссипации электромагнитной энергии в исследованном частотном диапазоне.

Обнаруженный эффект пространственной локализации поляризации обуславливает высокую эффективность экранирования даже при относительно низких объемных концентрациях углеродных нанотрубок. Поскольку активная зона взаимодействия с электромагнитным полем ограничена тонким поверхностным слоем, существенное увеличение диаметра трубок выше определенного предела не приводит к пропорциональному увеличению экранирующих свойств.

Локальные максимумы поляризации на концах трубок могут способствовать образованию цепочек токопроведения через емкостные связи, усиливая перколяционный эффект даже при отсутствии прямого физического контакта между частицами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Celozzi S. *et al.* Electromagnetic Shielding: Theory and Applications. John Wiley & Sons, 2022. 560 c.
2. Sajan S., Selvaraj D.P. A Review on Polymer Matrix Composite Materials and Their Applications // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 47. C. 5493–5498.
3. Lee J. *et al.* Single-Walled Carbon Nanotube Polyelectrolytes with a Coherent Skin Effect for Electromagnetic Interference Shielding // ACS Applied Nano Materials. 2024. Vol. 7. № 6. P. 5776–5783.
4. Wagner K.W. Erklärung der Dielektrischen Nachwirkungsvorgänge auf Grund Maxwellscher Vorstellungen // Archiv für Elektrotechnik. 1914. Vol. 2. P. 371–387.
5. Che J. Dielectric Polymer Nanocomposites for Energy Storage: Doctoral Dissertation. Université de Bordeaux, 2022. 223 p.
6. Тонков Д.Н. и др. Электрические и механические свойства гибких полимерных композиционных материалов с различными углеродными наполнителями // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. № 3. С. 68–81.
7. Galyaltdinov S. *et al.* High Permittivity Polymer Composites on the Basis of Long Single-Walled Carbon Nanotubes: The Role of the Nanotube Length // Nanomaterials. 2022. Vol. 12. № 19. Article № 3538.
8. Prokopchuk A. *et al.* Dielectric Permittivity Model for Polymer–Filler Composite Materials by the Example of Ni-and Graphite-Filled Composites for High-Frequency Absorbing Coatings // Coatings. 2021. Vol. № 2. Article № 172.
9. Vasin S.V. *et al.* Influence of the Magnetic Field on the Formation and Properties of Polyvinyl Alcohol-Multi-Walled Carbon Nanotube Nanocomposites // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2103. № 1. Article № 012108.
10. Поздеева Т.Ю., Порозова С.Е., Лебедева А.С. Особенности исследования магнитного структурирования литых композиционных углерод-керамических материалов // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2022. № 2. С. 23–31.
11. Москалюк О.А. и др. Электропроводящие полимерные композиционные мононити со смесевым наполнителем // Химия волокон. 2023. № 2. С. 88–96.

Поступила в редакцию 12.09.25

THE ROLE OF INTERFACIAL POLARIZATION AND SKIN EFFECT IN MICROWAVE SHIELDING OF POLYMER COMPOSITES

E.A. Petukhova

The paper presents the results of a comprehensive study of the mechanisms of microwave electromagnetic radiation shielding in polymer composites based on polypropylene with a hybrid carbon filler (carbon black and carbon nanotubes). The complex permittivities of fillers were determined by solving the inverse problem using the Nielsen model. The distribution of the electromagnetic field in an elementary volume of the composite was analyzed using finite element modeling in the COMSOL environment and the contribution of the studied effects was quantitatively estimated.

Keywords: polymer composites, electromagnetic shielding, interfacial polarization, skin effect, carbon nanotubes, permittivity, microwave radiation.

Петухова Екатерина Алексеевна – ст. преподаватель (ГУАП, Санкт-Петербург)
E-mail: super_poz@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ДАЛЬНОМЕРНОГО КАНАЛА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЕСОВОЙ ТРЕТИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

А.И. Сустин, А.П. Пудовкин, Ю.Н. Панасюк

Предложен метод весовой третичной обработки информации с использованием динамической дисперсии невязки по дальности, на основе которого синтезирован алгоритм третичной обработки информации дальномерного канала информационно-измерительной и управляющей системы, где используется оценка весовых коэффициентов для двух радиолокационных станций, расположенных в разных местах на аэродроме. Получены результаты оценки точности разработанного алгоритма.

Ключевые слова: информационно-измерительная и управляющая система, дальномерный канал, третичная обработка информации, динамические весовые коэффициенты.

Актуальной проблемой в области диспетчерского сопровождения маневрирующих воздушных судов является обеспечение высоких точностных характеристик оценки координат маневрирования воздушного судна для повышения пропускной способности информационно-измерительных и управляющих систем, работающих в зоне аэродрома.

План развития гражданской авиации на 2013–2028 гг., утвержденный Международной организацией гражданской авиации, и Федеральные авиационные правила [1] предполагают использование информационно-измерительных и управляющих систем для диспетчерского сопровождения воздушных судов в районе аэродрома с третичной обработкой информации от нескольких радиолокационных станций (РЛС). Разработка алгоритма третичной обработки информации для оценки дальности информационно-измерительной и управляющей системой производится с целью исследования точностных характеристик оценки дальности при использовании динамической дисперсии невязки оценки дальности. Это позволит повысить точность и достоверность оценки координат движения воздушных судов (дальности, азимута, угла места). Основными направлениями повышения точности и достоверности оценки координат маневрирования воздушных судов является использование в информационно-измерительных и управляющих системах с третичной обработкой информации оценки весовых коэффициентов для каждой РЛС при определении координат движения воздушных судов [2, 3]. Существующие информационно-измерительные и управляющие системы с третичной обработкой информации при обработке информации от РЛС используют постоянные весовые коэффициенты [2–5], а динамическая дисперсия невязки при формировании весовых коэффициентов оценки дальности в третичной обработке информации ранее не использовалась [6].

Этап оценки координат маневрирующего воздушного судна с третичной обработкой информации заключается в вычислении уточненных координат воздушного судна на основе результатов вторичной обработки информации и производится методом математического усреднения либо методом весовой обработки информации [7, 8].

Рассмотрим оценку дальности в третичной обработке информации от двух РЛС различными методами на примере дальномерного канала.

Метод математического усреднения радиолокационной информации один из наиболее простых, но в то же время наименее точный из существующих методов третичной обработки информации. В методе математического усреднения для оценки дальности до воздушного судна используется информация о дальности, которая поступает от каждой РЛС в диспетчерский пункт, где производится вторичная обработка [9]. В этом случае дальность до воздушного судна определяется выражением [7, 9]

$$\Delta_{\text{тои}}(k) = \frac{\Delta_1(k) + \Delta_2(k)}{2}, \quad (1)$$

где $\Delta_{\text{тои}}(k)$ – значение дальности воздушного судна относительно диспетчерского пункта, полученное в результате третичной обработки информации в момент времени k ; $\Delta_1(k)$, $\Delta_2(k)$ – оценки дальности от воздушного судна от РЛС1 и РЛС2, которые получены после вторичной обработки дальности в моменты времени k .

Метод математического усреднения оценки дальности до воздушного судна не учитывает точностные характеристики РЛС при различных маневрах воздушного судна для оценки дальности с третичной обработкой информации. В этом случае точность оценки дальности с третичной обработкой информации методом математического усреднения имеет низкие показатели, которые не соответствуют современным требованиям.

Для повышения точности оценки дальности с третичной обработкой информации используется метод весовой обработки информации (оценка дальности от двух РЛС) согласно выражению [6, 9]

$$\Delta_{\text{тои}}(k) = b_1 \Delta_1(k) + b_2 \Delta_2(k), \quad (2)$$

где b_1 , b_2 – значения весовых коэффициентов для дальностей $\Delta_1(k)$ и $\Delta_2(k)$, полученных от РЛС1 и РЛС2.

Весовые коэффициенты, которые используются в формуле (2), являются априорными. Весовые коэффициенты зависят от точностных характеристик РЛС1 и РЛС2, они задаются изначально и не изменяются в процессе слежения за воздушным судном. На значения весовых коэффициентов b_1 , b_2 влияют погрешности оценки дальности до воздушного судна в каждой РЛС. В этом случае методом весовой обработки происходит оценка дальности до воздушного судна согласно выражению [6]

$$\Delta_{\text{тои}}(k) = \frac{\frac{1}{\sigma_1^2} \Delta_1(k) + \frac{1}{\sigma_2^2} \Delta_2(k)}{\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2}}, \quad (3)$$

где σ_1 , σ_2 – априорные среднеквадратические погрешности дальности до воздушного судна от РЛС1 и РЛС2.

Поскольку используемые значения среднеквадратических погрешностей априорные и являются статическими, точность весовой обработки в третичной обработке информации не соответствует современным требованиям.

Для повышения точности оценки дальности при весовой третичной обработке информации с третичной обработкой информации необходимо использовать оценку весовых коэффициентов на каждом шаге измерения дальностей РЛС1 и РЛС2, значения которых зависят от динамики движения воздушного судна относительно диспетчерского пункта.

Для оценки весовых коэффициентов предлагается использовать информацию о невязках при вторичной обработке информации от каждой РЛС.

Невязки дальности РЛС1 и РЛС2 являются динамическими характеристиками РЛС, которые имеют различные значения в процессе полета маневрирующего воздушного судна и определяются выражением [2, 4]

$$\Delta\Delta(k) = \Delta_{\text{и}}(k) - \Delta_{\text{о}}(k), \quad (4)$$

где $\Delta_{\text{и}}(k)$ – измеренные значения дальности до воздушного судна относительно РЛС в моменты времени k ; $\Delta_{\text{о}}(k)$ – экстраполированные значения дальности до воздушного судна, которые зависят от модели состояния калмановского фильтра РЛС в момент времени i .

Для реализации метода весовой обработки, который учитывал бы погрешности экстраполированных значений дальности до воздушного судна, необходимо использовать весовые коэффициенты, изменяющиеся на каждом шаге измерения. Предлагается для оценки весовых коэффициентов b_1 , b_2 на каж-

дом шаге измерения дальности в РЛС использовать теорию оптимальной фильтрации в системах со случайной скачкообразной структурой [10]. Применение метода фильтрации в системах со случайной структурой позволяет определить весовые динамические коэффициенты для оцененных координат воздушного судна для третичной обработки информации [10]:

$$\hat{x}_k = \sum_{j=1}^2 W_k^{(j)} x_k^{(j)} = \frac{\sum_{i=1}^2 \tau(j) (2\pi A_k^{(i)})^{1/2} \exp \left\{ -\frac{(v_k^{(i)})^2}{2A_k^{(i)}} \right\} W_{k-1}^{(i)} \hat{x}_k^{(i)}}{\sum_{i=1}^2 \tau(j) (2\pi A_k^{(i)})^{1/2} \exp \left\{ -\frac{(v_k^{(i)})^2}{2A_k^{(i)}} \right\} W_{k-1}^{(i)}}, \quad (5)$$

где $W_k^{(j)}$ – значения веса динамических вероятностей номеров структур системы; $x_k^{(j)}$ – значение оценок координат воздушного судна; $i, j = 1, 2$ – условия, определяемые использованием двух моделей; $\tau(j)$ – интервал времени, определяющий использование той или иной модели движения воздушного судна; $A_k^{(i)}$ – значение дисперсии невязки системы; $v_k^{(i)}$ – значение невязки системы.

Метод фильтрации в системах со случайной структурой является основой метода динамической весовой третичной обработки информации в информационно-измерительных и управляющих системах [6].

Оценка дальности информационно-измерительной и управляющей системы с применением третичной обработки информации до воздушного судна в зоне аэродрома производится с применением одинаковых моделей состояния и наблюдения калмановского фильтра в РЛС1 и РЛС2. На основании выражений (2), (5) оценка дальности с третичной обработкой информации от двух наземных РЛС методом весовой обработки при использовании невязок дальности будет иметь вид [7]

$$\Delta_{\text{TOI}}(k) = b_1(k) \Delta_{\text{o1}}(k) + b_2(k) \Delta_{\text{o2}}(k); \quad (6)$$

$$b_1(k) = \frac{\left((2\pi D_1(k))^{-0.5} \exp \left\{ -\frac{(\Delta \Delta_1(k))^2}{2D_1(k)} \right\} (1 - b_1(k-1)) \right)}{\left((2\pi D_1(k))^{-0.5} \exp \left\{ -\frac{(\Delta \Delta_1(k))^2}{2D_1(k)} \right\} (1 - b_1(k-1)) + (2\pi D_2(k))^{-0.5} \exp \left\{ -\frac{(\Delta \Delta_2(k))^2}{2D_2(k)} \right\} (1 - b_2(k-1)) \right)}; \quad (7)$$

$$b_2(k) = \frac{\left((2\pi D_2(k))^{-0.5} \exp \left\{ -\frac{(\Delta \Delta_2(k))^2}{2D_2(k)} \right\} (1 - b_2(k-1)) \right)}{\left((2\pi D_1(k))^{-0.5} \exp \left\{ -\frac{(\Delta \Delta_1(k))^2}{2D_1(k)} \right\} (1 - b_1(k-1)) + (2\pi D_2(k))^{-0.5} \exp \left\{ -\frac{(\Delta \Delta_2(k))^2}{2D_2(k)} \right\} (1 - b_2(k-1)) \right)}. \quad (8)$$

Здесь: $D_1(k)$, $D_2(k)$ – значения динамических дисперсий невязки по дальности для РЛС1 и РЛС2; $\Delta \Delta_1(k)$, $\Delta \Delta_2(k)$ – значения невязок дальности до воздушного судна для РЛС1 и РЛС2; $\Delta_{\text{o1}}(k)$, $\Delta_{\text{o2}}(k)$ – значения оценок дальности до воздушного судна относительно РЛС1 и РЛС2.

На основе представленного метода разрабатывается алгоритм, включающий этапы первичной, вторичной, а также третичной обработки информации [6]:

$$\begin{cases} \Delta_{\text{o1}}(k) = \Delta_{\text{e1}}(k) + K_{\phi 11} \Delta \Delta_1(k); & V_{\text{o1}}(k) = V_{\text{e1}}(k) + K_{\phi 21} \Delta \Delta_1(k); \\ A_{\text{o1}}(k) = A_{\text{e1}}(k) + K_{\phi 31} \Delta \Delta_1(k); & \Delta_{\text{il}}(k) = \Delta_{\text{l}}(k) + \xi_{\text{di1}}(k); \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \Delta_{\text{о1}}(k) = \Delta_{\text{о1}}(k-1) + V_{\text{о1}}(k-1)\tau + A_{\text{о1}}(k-1)0,5\tau^2; & V_{\text{о1}}(k) = V_{\text{о1}}(k-1) + A_{\text{о1}}(k-1)\tau; \\ A_{\text{о1}}(k) = (1-\alpha\tau)A_{\text{о1}}(k-1); & \Delta\Delta_{\text{l}}(k) = \Delta_{\text{и1}}(k) - \Delta_{\text{о1}}(k); \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \Delta_{\text{о2}}(k) = \Delta_{\text{о2}}(k) + K_{\phi12}\Delta\Delta_{\text{l}}(k); & V_{\text{о2}}(k) = V_{\text{о2}}(k) + K_{\phi22}\Delta\Delta_{\text{l}}(k); \\ A_{\text{о2}}(k) = A_{\text{о2}}(k) + K_{\phi32}\Delta\Delta_{\text{l}}(k); & \Delta_{\text{и2}}(k) = \Delta_{\text{и2}}(k) + \xi_{\text{ди2}}(k); \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \Delta_{\text{о2}}(k) = \Delta_{\text{о2}}(k-1) + V_{\text{о2}}(k-1)\tau + A_{\text{о2}}(k-1)0,5\tau^2; & V_{\text{о2}}(k) = V_{\text{о2}}(k-1) + A_{\text{о2}}(k-1)\tau; \\ A_{\text{о2}}(k) = (1-\alpha\tau)A_{\text{о2}}(k-1); & \Delta\Delta_{\text{l}}(k) = \Delta_{\text{и2}}(k) - \Delta_{\text{о2}}(k); \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{тои}}(k) = \\ = \frac{\left((2\pi D_{\text{l}}(k))^{-0,5} \exp\left\{-\frac{(\Delta\Delta_{\text{l}}(k))^2}{2D_{\text{l}}(k)}\right\} (1-b_{\text{l}}(k-1)) \Delta_{\text{о1}}(k) \right) + \left((2\pi D_{\text{l}}(k))^{-0,5} \exp\left\{-\frac{(\Delta\Delta_{\text{l}}(k))^2}{2D_{\text{l}}(k)}\right\} (1-b_{\text{l}}(k-1)) \Delta_{\text{о2}}(k) \right)}{\left((2\pi D_{\text{l}}(k))^{-0,5} \exp\left\{-\frac{(\Delta\Delta_{\text{l}}(k))^2}{2D_{\text{l}}(k)}\right\} (1-b_{\text{l}}(k-1)) \right) + \left((2\pi D_{\text{l}}(k))^{-0,5} \exp\left\{-\frac{(\Delta\Delta_{\text{l}}(k))^2}{2D_{\text{l}}(k)}\right\} (1-b_{\text{l}}(k-1)) \right)}; \end{aligned} \quad (13)$$

$$D_{\text{l}}(k) = \sigma_{\text{l}}^2 H P_{\text{о1}}(1) H^T + R_{\text{l}}(k); \quad (14)$$

$$D_{\text{l}}(k) = \sigma_{\text{l}}^2 H P_{\text{о2}}(1) H^T + R_{\text{l}}(k); \quad (15)$$

$$b_{\text{l}}(0) = b_{\text{l}}(0) = 0,5; \quad (16)$$

$$R_{\text{l}}(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=i_0}^m \Delta\Delta_{\text{l}}(k) \Delta\Delta_{\text{l}}^T(k) - H P_{\text{о1}}(k) H^T; \quad (17)$$

$$R_{\text{l}}(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=i_0}^m \Delta\Delta_{\text{l}}(k) \Delta\Delta_{\text{l}}^T(k) - H P_{\text{о2}}(k) H^T; \quad (18)$$

$$b_{\text{l}}(0) = b_{\text{l}}(0) = 0,5. \quad (19)$$

Здесь: $K_{\phi11}, K_{\phi21}, K_{\phi31}, K_{\phi12}, K_{\phi22}, K_{\phi32}$ – значения коэффициентов калмановской фильтрации вторичной обработки информации в РЛС1 и РЛС2; $V_{\text{о1}}, A_{\text{о1}}, V_{\text{о2}}, A_{\text{о2}}$ – оцененные значения скорости и ускорения для вторичной обработки информации в РЛС1 и РЛС2; τ – дискрета времени; α – постоянная времени маневра; H – матрица измерений; $P_{\text{о1}}, P_{\text{о2}}$ – апостериорные ковариационные матрицы ошибок фильтрации для РЛС1 и РЛС2; $R_{\text{l}}(k), R_{\text{l}}(k)$ – оценочные значения дисперсий шумов измерений для РЛС1 и РЛС2; M – количество тактов усреднения в скользящем окне для формирования достаточной статистики.

Применение алгоритма третичной обработки информации, основанного на методе весовой обработки с динамическими весовыми коэффициентами, позволяет повысить точность оценки дальности при маневрировании воздушного судна относительно диспетчерского пункта. Это связано с тем, что метод динамической весовой обработки позволяет учитывать динамику маневрирования воздушного судна за счет использования изменения дисперсии невязок дальности до воздушного судна.

Оценку повышения точности оценки при использовании алгоритма динамической весовой обработки информации о дальности возможно проводить использованием критерия минимума среднеквадратических погрешностей [8], а также имитационного моделирования движения воздушного судна при выполнении маневра «правильный вираж» и третичной обработки информации о дальности до воздушного судна от двух РЛС с учетом изменения невязок дальности до воздушного судна в процессе маневрирования.

Для определения изменения значений точности оценки дальности до воздушного судна при вторичной обработке информации в РЛС1, РЛС2, а также при третичной обработке информации проводилось имитационное моделирование полета воздушного судна маневра «правильный вираж» относительно

двух пространственно-разнесенных РЛС. Схема маневрирования представлена на рис. 1. По условиям моделирования, время маневрирования воздушного судна – 852 с, высота маневрирования постоянная – 500 м, скорость воздушного судна в процессе маневрирования – 300 км/ч.

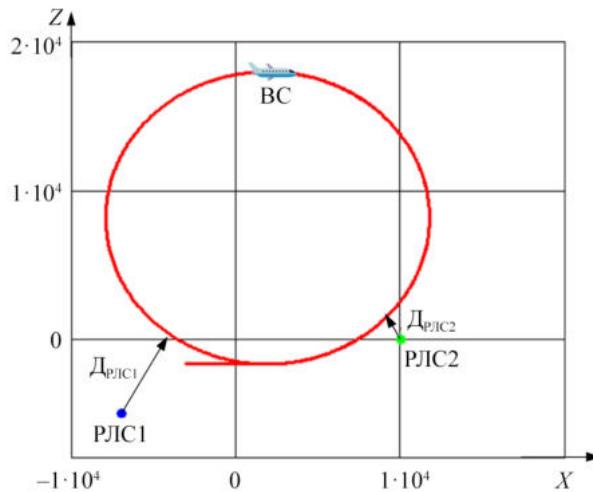


Рис. 1

Определение дальности до воздушного судна относительно РЛС1 и РЛС2 может производиться геометрическими методами [7]. На рис. 2 показаны зависимости дальности воздушного судна относительно РЛС1 и РЛС2 от времени полета воздушного судна для маневра «правильный вираж».

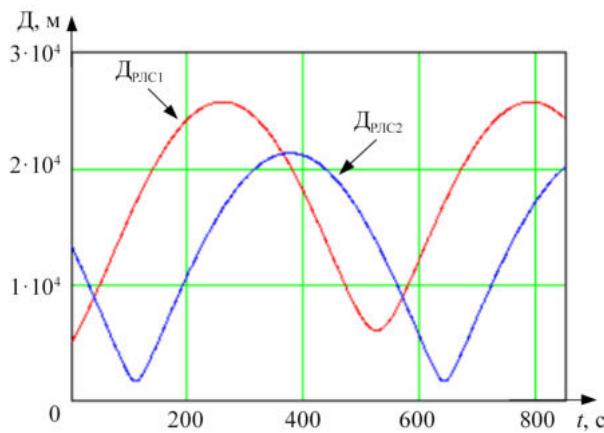


Рис. 2

Как видим (см. рис. 2) изменение дальности $D_{РЛС1}$ и $D_{РЛС2}$ характеризуется большой нелинейностью в различное время полета воздушного судна. Графики изменения дальностей $D_{РЛС1}$, $D_{РЛС2}$ зависят от пространственного размещения наземных РЛС относительно полета воздушного судна. Нелинейный характер изменения дальности до воздушного судна влияет на среднюю квадратичную погрешность при оценке дальности в калмановском фильтре РЛС1 и РЛС2.

Чем больше нелинейность изменения дальности РЛС относительно воздушного судна, тем больше погрешность оценки дальности в калмановском фильтре РЛС1 и РЛС2. Это связано с тем, что при нелинейном законе изменения дальности увеличивается невязка дальности калмановского фильтра. В алгоритме (9) – (18) значения весовых коэффициентов $b_1(k)$ и $b_2(k)$ зависят от динамических дисперсий невязок $D_1(k)$ и $D_2(k)$. Чем больше значение дисперсии невязки дальности, тем меньше значение весового коэффициента $b(k)$. Это значит, что по оценке дальности третичной обработкой информации (13) будет улучшаться ее точность. Если погрешность оценки дальности $D_{o1}(k)$ будет увеличиваться, то ве-

свой коэффициент $b_1(k)$ будет уменьшаться. Если погрешность оценки дальности $D_{o2}(k)$ будет уменьшаться, то весовой коэффициент $b_2(k)$ будет увеличиваться. В результате оценка дальности третичной обработкой информации (6) будет определяться в основном оценкой дальности $D_{o2}(k)$.

Точность определения дальности информационно-измерительной и управляющей системы с использованием алгоритма динамических весовых коэффициентов оценивалась с помощью имитационного моделирования для получения средней квадратичной погрешности дальности при вторичной обработке информации от двух РЛС ($\sigma_{\text{РЛС1}}(k)$, $\sigma_{\text{РЛС2}}(k)$), третичной обработке информации в информационно-измерительной и управляющей системе ($\sigma_{\text{ТОИ}}(k)$) [11]:

$$\sigma_{\text{РЛС1}}(k) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (\Delta_1(k) - D_{o1j}(k))^2}{N-1}}; \quad (20)$$

$$\sigma_{\text{РЛС2}}(k) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (\Delta_2(k) - D_{o2j}(k))^2}{N-1}}; \quad (21)$$

$$\sigma_{\text{ТОИ}}(k) = b_1(k)\sigma_{\text{РЛС1}}(k) + b_2(k)\sigma_{\text{РЛС2}}(k), \quad (22)$$

где $D_{o1j}(k)$, $D_{o2j}(k)$ – оценочные значения дальности РЛС1 и РЛС2 j -й реализации; j – номер реализации; N – количество реализаций (требуется не менее тридцати реализаций для каждого шага измерения).

Изменение среднеквадратических погрешностей дальности до воздушного судна, полученных при вторичной обработке радиолокационной информации в РЛС1, РЛС2, а также по результатам третичной обработки информации с использованием метода динамической весовой обработки, демонстрирует рис. 3.

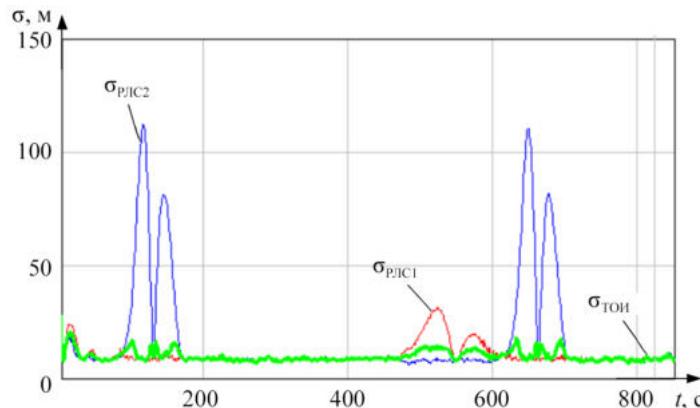


Рис. 3

Согласно графикам (см. рис. 3) максимальные погрешности $\sigma_{\text{РЛС1}}(k)$, $\sigma_{\text{РЛС2}}(k)$ наблюдаются на отдельных участках с наиболее интенсивным маневрированием. Среднеквадратические погрешности результатов третичной обработки информации $\sigma_{\text{ТОИ}}(k)$ значительно меньше максимальных погрешностей $\sigma_{\text{РЛС1}}(k)$, $\sigma_{\text{РЛС2}}(k)$ на этих участках. Это объясняется оптимальным пространственным размещением наземных РЛС, что позволяет при вторичной обработке радиолокационной информации в РЛС получить максимальные значения среднеквадратических погрешностей в различных точках при маневрировании воздушного судна.

Проводилось сравнение результатов изменения реальной среднеквадратической погрешности результатов третичной обработки информации $\sigma_{\text{ТОИ}}(k)$ с использованием разработанного алгоритма динамической весовой обработки.

намической весовой обработки с изменением значений среднеквадратических погрешностей третичной обработки информации при использовании метода (3). По результатам сравнения (рис. 4) можно сделать вывод о существенном снижении величины среднеквадратических погрешностей при использовании разработанного алгоритма динамической весовой третичной обработки информации в сравнении с существующим методом третичной обработки информации на отдельных участках маневрирования на 70 %. Это объясняется использованием динамической дисперсии невязки дальности до воздушного судна, полученной при вторичной обработке радиолокационной информации в наземных РЛС. Использование динамической дисперсии невязки дальности при формировании весовых коэффициентов третичной обработкой информации позволяет учитывать динамику маневрирования воздушного судна в процессе оценки дальности при третичной обработке информации, что способствует повышению точности оценки дальности на отдельных участках маневрирования на 70 % и повышению пропускной способности информационно-измерительной и управляющей системы при сохранении допустимого уровня безопасности до 30 %.

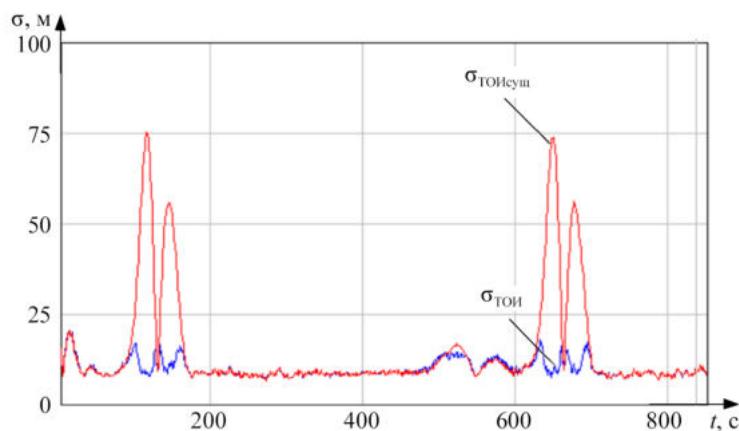


Рис. 4

На основании результатов имитационного моделирования маневрирования воздушного судна по траектории маневра «правильный вираж» в зоне ответственности информационно-измерительной и управляющей системы можно сделать вывод о том, что применение разработанного алгоритма динамической весовой обработки радиолокационной информации с использованием динамической дисперсии невязки дальности до воздушного судна способствует повышению точности оценки дальности в сравнении с результатами вторичной обработки радиолокационной информации на отдельных участках маневрирования на 85 %, а также третичной обработки информации с применением существующих алгоритмов, основанных на методах статической весовой обработки маневрирования, на 70 %. Применение алгоритма третичной обработки информации, основанного на методе динамической обработки информации при оценке дальности до воздушного судна, способствует повышению пропускной способности информационно-измерительной и управляющей системы при сохранении уровня безопасности маневрирования воздушного судна на 30 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сустин А.И., Пудовкин А.П., Панасюк Ю.Н. Синтез дальномерного канала повышенной точности информационно-измерительной и управляющей системы с применением третичной обработки информации // Южно-Сибирский научный вестник. 2024. № 2 (54). С. 91–97.
2. Ботов М.И., Вяхирев В.А. Основы теории радиолокационных систем и комплексов. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. 530 с.
3. Способ третичной обработки радиолокационной информации в вычислительной системе пункта управления: пат. 2561950 Рос. Федерация, № 2014125766/07; заявл. 25.06.2014; опубл. 10.09.2015.
4. Апорович В.А., Шевченко А.В. Отождествление траекторий с помощью метода притяжения при третичной обработке радиолокационной информации // Доклады Белорусского государственного уни-

- верситета информатики и радиоэлектроники. 2016. № 6 (100). С. 35–39.
5. Груздев Г.А. Модифицированный алгоритм многоцелевого гипотезного сопровождения третичной обработки радиолокационной информации // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. 2021. № 4 (15). С. 4–9.
 6. Способ оценки дальности до маневрирующего воздушного судна информационно-измерительной системой управления воздушным движением с применением дисперсии невязки по дальности в третичной обработке информации: пат. 2826437 Рос. Федерация, № 2024103973; заявл. 16.02.2024; опубл. 10.09.2024.
 7. He You, Xiu Jianjuan, Guan Xin. Radar Data Processing with Applications. Singapore: Wiley, 2016. 523 р.
 8. Пальгуев Д.А. и др. Особенности вторичной и третичной обработки информации о воздушных объектах в многопозиционных пространственно-разнесенных некогерентных радиолокационных системах // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2024. № 2 (54). С. 52–58.
 9. Waldschmidt C., Bonfert C., Grebner T. Millimeter Wave Radar. Hardware and Signal Processing. Springer Cham, 2025. 243 р.
 10. Клеки Э.А. Оптимальная фильтрация в системах со случайной структурой и дискретным временем. Автоматизация и телемеханика. 1987. № 11. С. 61–70.
 11. Глистан В.Н. Синтез алгоритма обработки азимута воздушного судна информационно-измерительной системой с учетом динамических и кинематических характеристик // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2020. № 2. С. 116–122.

Поступила в редакцию 24.06.25

IMPROVING THE ACCURACY OF THE RANGEFINDER CHANNEL OF THE INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEM WITH THE USE OF DYNAMIC WEIGHTING TERTIARY INFORMATION PROCESSING

A.I. Sustin, A.P. Pudovkin, and Yu.N. Panasyuk

A method of weight tertiary processing of information using dynamic dispersion of the residual in the range, on the basis of which the algorithm of tertiary processing of information of the rangefinder channel of the information-measuring and control system is synthesized, where the estimation of weight coefficients for two radar stations located in different places on the airfield is used. The results of the accuracy assessment of the developed algorithm are obtained.

Keyword: information-measuring and control system, rangefinder channel, tertiary information processing, dynamic weighting coefficients.

Сустин Александр Иванович – канд. техн. наук (ТГТУ, Тамбов)
E-mail: sasasustin@mail.ru

Пудовкин Анатолий Петрович – д-р техн. наук (ТГТУ, Тамбов)
E-mail: resbn@mail.ru

Панасюк Юрий Николаевич – канд. техн. наук (ТГТУ, Тамбов)
E-mail: resbn@mail.ru

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ МАТЕРИАЛОВ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫХ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛ «ВЕСТНИК КАЗАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМ. А.Н. ТУПОЛЕВА»

В журнале «Вестник Казанского государственного технического университете им. А.Н. Туполева» публикуются результаты фундаментальных и прикладных исследований ученых КНИТУ-КАИ, других вузов и научных организаций. Кроме того, в журнале публикуются статьи информационного и дискуссионного характера.

Представленная в журнал работа должна быть законченным научным исследованием и содержать новые научные результаты.

Отправляя рукопись в журнал, автор гарантирует, что соответствующий материал (в оригинале или в переводе на другие языки или с других языков) ранее нигде не публиковался и не находится на рассмотрении для публикации в других издательствах.

Статья не должна превышать по объему 8 – 9 страниц с учетом рисунков и таблиц. Обзоры направляются в редакционную коллегию по предварительному согласованию.

В статьях должна быть использована международная система единиц измерения СИ.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в тексте, таблицах, графиках; сокращения допускаются только общепринятые.

Цитируемая литература нумеруется в порядке упоминания, в тексте порядковый номер ссылки заключается в квадратные скобки.

Нумерация и включение в список литературы всех упомянутых в статье источников обязательны. Ссылки на статьи, находящиеся в печати, не допускаются.

Статья, нуждающаяся в доработке, направляется авторам с замечаниями. Доработанная статья рецензируется повторно.

Материалы, представляемые к публикации, направляются в редакционную коллегию журнала по адресу 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д.10, КНИТУ-КАИ, ответственному секретарю журнала.

Материалы должны содержать:

- два экземпляра статьи на бумаге формата А4, подписанные всеми авторами, и ее компьютерный вариант;
- лист с расшифровкой индексов, образованных от русских слов;
- сопроводительное письмо на имя главного редактора;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати;
- выписку из протокола заседания кафедры (отдела) или НТС организации с рекомендацией к опубликованию и указанием раздела журнала;
- сведения об авторах: фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, должность, полное название учреждения с указанием факультета и кафедры (отдела, сектора и т.п.); e-mail; телефон для связи;
- название статьи на английском языке;
- аннотацию и ключевые слова на русском и английском языках.

Обязательные структурные элементы статьи и их оформление

1. УДК: размер шрифта – 10 пт, светлый курсив, выравнивание по левому краю, интервал перед абзацем и после абзаца 0 пт.

2. Название статьи: размер шрифта – 14 пт, жирный прямой прописной, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 12 пт, после – 0 пт, межстрочный интервал одинарный.

3. Инициалы и фамилии авторов: размер шрифта – 12 пт, жирный прямой, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 8 пт, после – 12 пт;

4. Аннотация на русском языке: размер шрифта – 10 пт, светлый прямой, выравнивание по ширине, перед абзацем – 0 пт, после – 4 пт, отступ слева – 2 см, отступ справа – 2 см, межстрочный интервал – множитель 1,1.

5. Ключевые слова на русском языке: размер шрифта – 10 пт, жирный прямой, выравнивание по ширине, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 6 пт, межстрочный интервал – множитель 1,1.

6. Текст статьи основной: размер шрифта – 11 пт, светлый прямой, выравнивание по ширине, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 0 пт, межстрочный интервал – множитель 1,1, первая строка – отступ 0,6 см; подзаголовок: размер шрифта – 12 пт, жирный прямой, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 6 пт, после – 3 пт, межстрочный интервал – множитель 1,1.

7. Список литературы заголовок: размер шрифта – 11 пт, светлый прямой прописной, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 9 пт, после – 6 пт; текст списка: размер шрифта – 10 пт, светлый прямой, выравнивание по ширине, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 0 пт, отступ слева – 1 см, отступ справа – 1 см, первая строка – выступ 0,35 см, межстрочный интервал одинарный, фамилии авторов выполняются курсивом.

8. Дата отправки статьи в редакцию: размер шрифта – 10 пт, светлый прямой, выравнивание по правому краю, интервал перед абзацем – 6 пт, после – 0 пт.

9. Название статьи на английском языке: размер шрифта – 14 пт, жирный прямой прописной, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 12 пт, после – 0 пт, межстрочный интервал одинарный.

10. Инициалы и фамилии авторов по-английски: размер шрифта – 12 пт, жирный прямой, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 8 пт, после – 12 пт.

11. Аннотация на английском языке: размер шрифта – 10 пт, светлый прямой, выравнивание по ширине, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 4 пт, отступ слева – 2 см, отступ справа – 2 см, межстрочный интервал – множитель 1,1.

12. Ключевые слова на английском языке: размер шрифта – 10 пт, жирный прямой, выравнивание по ширине, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 6 пт, межстрочный интервал – множитель 1,1.

13. Сведения об авторах (Ф.И.О., звание, должность, структурное подразделение, организация, e-mail): размер шрифта – 11 пт, светлый прямой, выравнивание по левому краю, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 5 пт.

Требования к оформлению статей

Компьютерный вариант статьи оформляется в виде единого файла, включающего полный текст статьи, формулы, таблицы, рисунки, список литературы и сведения об авторах. Файл именуется по фамилии первого автора.

Файл должен быть представлен в редакторе Microsoft Word.

Параметры страницы:

- размер бумаги – А4;
- поля – зеркальные;
- верхнее поле – 1,8 см;
- нижнее поле – 2,9 см;
- внутреннее поле – 1,4;
- наружное поле – по 2,0 см;
- расстояние до верхнего колонтитула – 0 см;
- расстояние до нижнего колонтитула – 2,2 см.

Шрифт текста статьи – Times New Roman.

Таблицы и иллюстрации. На все помещаемые в статью таблицы и иллюстрации (чертежи, графики, схемы, компьютерные распечатки, диаграммы, фотоснимки, рисунки) в тексте должны присутствовать ссылки. Каждая иллюстрация и таблица должна иметь содержательное наименование и номер. Следует использовать сквозную нумерацию (арабскими цифрами) в пределах статьи отдельно для иллюстраций и таблиц. Таблицы и иллюстрации располагаются непосредственно после абзаца, в котором содержится ссылка на них.

Таблицы представляются по следующей форме.

Слово «Таблица»: размер шрифта – 9 пт, светлый, курсив, выравнивается по правому краю таблицы.

Название таблицы: размер шрифта – 9 пт, полужирный, располагать по центру. Содержимое ячеек следует располагать по центру.

Содержательная часть таблицы: размер шрифта – 9 пт, светлый, прямой.

Толщина линий в таблицах – 0,5 пт.

Пропуски в столбцах при отсутствии данных заполняют тире.

Размерности числовых данных в таблицах выносят в текст головки или название таблицы.

Иллюстрации должны быть тщательно подготовлены для печати в электронном виде (сканированы или выполнены в графическом редакторе) и вставлены в текст. Сканирование должно быть выполнено с разрешением не менее 300 dpi с расширением .tif или .jpg. Допускается представление иллюстраций в формате .cdr. Иллюстрации, выполненные при помощи средств рисования MS Office, не принимаются.

Графики должны иметь полную систему указателей в подрисуночных подписях или в тексте статьи. Внутририсуночные обозначения: размер символов – 9 пт, латинские символы – шрифт Times New Roman светлый курсив, символы кириллицы – шрифт Times New Roman светлый прямой, греческие символы – шрифт Symbol светлый прямой.

Оси координат и кривые должны быть изображены линиями одинаковой толщины 0,25 мм. Координатная сетка – линиями толщиной 0,18 мм. Подрисуночная подпись: размер шрифта – 9 пт, пояснение к подрисуночным подписям: размер шрифта – 8 пт.

Формулы набирать в редакторе формул MathType.

Латинские символы: шрифт Times New Roman светлый курсив.

Символы кириллицы – шрифт Times New Roman светлый прямой.

Греческие символы – шрифт Symbol светлый прямой.

Размер символов в формулах:

- обычный – 11 пт;
- индекс – 65 % от обычного;
- символ – 150 % от обычного.

Формулы, на которые имеются ссылки в тексте, нумеруются и располагаются по центру строки, номер формулы должен совпадать с правым краем границы текста. После каждой формулы в соответствии с контекстом должен стоять знак пунктуации (запятая, точка и т.п.).

Статьи, не удовлетворяющие указанным правилам оформления, будут возвращены авторам без рассмотрения.

За справками обращаться к ответственному секретарю журнала.

Тел.: 231-97-84

E-mail: at-secretary@yandex.ru

**ВЕСТНИК
КАЗАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА им. А.Н. ТУПОЛЕВА**

2025, № 3 (121)

Ответственный за выпуск *Е.М. Зиннатуллина*
Компьютерная верстка – А.А. Золина

Подписано в печать 20.09.25. Выход в свет 25.09.25
Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 13.
Тираж 200. Заказ №80. Цена 200 руб.

Адрес издателя, редакции, типографии: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, КНИТУ-КАИ,
редакция журнала «Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева».
Тел. (843) 238-58-10; факс (843) 236-60-32; www.kai.ru/vestnik/ E-mail: vestnik.kstu-kai@yandex.ru
Address: KNRTU-KAI, 10 Karl Marx Str., Kazan, 420111, Russia

Подписной индекс – 18040

Издательство КНИТУ-КАИ