

ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Анисимова И.В., Фролов В.С. Расчет точки максимального сближения молекул в полярных средах</i>	3
<i>Бакланов А.В. Влияние струйной и центробежной газовой форсунок на образование токсичных веществ в камере сгорания</i>	10
<i>Бакланов А.В., Валиев Ф.М. Исследование структуры течения и концентраций токсичных веществ в многофорсуночной камере сгорания</i>	18
<i>Горшенин А.С., Краснова Н.П., Рахимова Ю.И. Увеличение энергоэффективности процесса термической обработки алюминиевых заготовок</i>	24
<i>Тимеркаев Б.А., Хуснутдинова А.А., Шакиров Б.Р. Синтез шестигранных наноалмазов при каталитическом участии атомов германия в германий-аргоновой электродуговой плазме</i>	29
<i>Хабриев И.Ш., Хайрутдинов В.Ф., Ахметзянов Т.Р., Абдулагатов И.М., Салихов И.З., Кабиров Р.Р. Фазовое равновесие бинарной смеси диоксид углерода + н-тетрадекан</i>	36

МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Галимов Э.Р., Шарафутдинова Э.Э., Галимова Н.Я. Исследование физико-механических свойств теплоизолирующих углеродных пен</i>	45
<i>Галимов Э.Р., Шарафутдинова Э.Э., Галимова Н.Я. Технология получения и физико-механические свойства углеродных пен на основе пека и летучего порообразователя</i>	48
<i>Есов В.Б., Каляшина А.В., Решетников Д.Л. Методика модернизации привода главного движения токарного станка</i>	52
<i>Лиманский А.С., Каховский К.В., Анкудимов В.В. Комбинированная регенеративная газотурбинная силовая установка с промежуточным охлаждением воздуха между компрессорами низкого и высокого давления</i>	58
<i>Шафигуллин Л.Н., Насыбуллин Ф.Ф., Хисамутдинов Р.М. Влияние параметров мощности резания лазерного раскроя металла на образование термических зон</i>	68

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

<i>Анцев В.Г., Семенова Е.Г., Русина А.А. Базовые направления развития аэрогеофизических приборов</i>	72
<i>Балашов В.М., Русина А.А. Риски модернизации информационного обеспечения подготовки операторов беспилотных авиационных систем</i>	77
<i>Ефремова Е.С., Мифтахов Б.И., Солдаткин В.В., Солдаткин В.М. Модели динамических погрешностей каналов системы измерения воздушных параметров движения летательного аппарата на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего потока</i>	82
<i>Козлов В.К., Минегалиев И.М., Валиуллина Д.М. Спектральный метод определения влагосодержания трансформаторного масла</i>	92
<i>Нигматуллин Р.Р. О возможности детектирования сверхслабых сигналов из бестрендовых случайных последовательностей</i>	98
<i>Соколов А., Кустов Т.В. Разработка метода количественной оценки плотности распределения микроорганизмов в градиенте химического раздражителя для оценки токсичности</i>	103
<i>Шафигуллин И.Д. Импедансный метод измерения и контроля поверхностной температуры и теплового потока на основе скин-эффекта</i>	111

CONTENTS

PHYSICAL SCIENCE

<i>Anisimova I.V. and Frolov V.S. Calculation of the point of maximum approach of molecules in polar environments.....</i>	3
<i>Baklanov A.V. Influence of jet and centrifugal gas injectors on the formation of toxic substances in the combustion chamber</i>	10
<i>Baklanov A.V. and Valiev F.M. Study of flow structure and concentrations of toxic substances in a multi-injector combustion chamber</i>	18
<i>Gorshenin A.S., Krasnova N.P., and Rakhimova Yu.I. Increasing of aluminum billets heat treatment process energy efficiency</i>	24
<i>Timerkaev B.A., Khusnutdinova A.A., and Shakirov B.R. Synthesis of hexagonal nano-diamonds with catalytic participation of germanium atoms in germanium-argon electric arc plasma.....</i>	29
<i>Khabriev I.Sh., Khairutdinov V.F., Akhmetzyanov T.R., Abdulagatov I.M., Salikhov I.Z., and Kabirov R.R. Phase equilibrium of a binary mixture of carbon dioxide + n-tetradecane</i>	36

MECHANICAL ENGINEERING

<i>Galimov E.R., Sharafutdinova E.E., and Galimova N.Ya. Study of physical and mechanical properties heat-insulating carbon foams</i>	45
<i>Galimov E.R., Sharafutdinova E.E., and Galimova N.Ya. Production technology and physical and mechanical properties of carbon foams based on pitch and volatile pore-forming agent</i>	48
<i>Esov V.B., Kalyashina A.V., and Reshetnikov D.L. Modernization of the main motion drive of a lathe.....</i>	52
<i>Limanskii A.S., Kakhovskii K.V., and Ankudimov V.V. Combined regenerative gas turbine power plant with intermediate air cooling between low- and high-pressure compressors</i>	58
<i>Shafigullin L.N., Nasybullin F.F., and Khisamutdinov R.M. Influence of the cutting power parameters of laser metal cutting on the formation of thermal zones</i>	68

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT MAKING AND COMMUNICATIONS

<i>Antsev V.G., Semenova E.G., and Rusina A.A. Basic directions of aerogeophysical devices development</i>	72
<i>Balashov V.M. and Rusina A.A. Risks of modernisation of information support for unmanned vehicle operators training.....</i>	77
<i>Efremova E.S., Miftakhov B.I., Soldatkin V.V., and Soldatkin V.M. Models of dynamic errors of the channels of the system of measuring air parameters of the aircraft movement based on the ultrasonic method of monitoring the parameters of the incident flow.....</i>	82
<i>Kozlov V.K., Minegaliev I.M., and Valiullina D.M. Spectral method for determining the moisture content of transformer oil.....</i>	92
<i>Nigmatullin R.R. On the possibility of detecting ultraweak signals from trendless random sequences</i>	98
<i>Sokolov A. and Kustov T.V. Development of a system for quantifying microbial distribution density in a chemical stimulus gradient for toxicity evaluation</i>	103
<i>Shafigullin I.D. Impedance method based on the skin effect for measuring and controlling thermodynamic parameters of electrically conductive thermophysical objects</i>	111

РАСЧЕТ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОГО СБЛИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ В ПОЛЯРНЫХ СРЕДАХ

И.В. Анисимова, В.С. Фролов

Исследуется проблема описания процессов переноса в полярных средах на основе молекулярно-кинетической теории. Построен потенциал взаимодействия молекул, представляющий собой суперпозицию модели, разработанной ранее, и потенциала Штокмайера. На основе введенного потенциала для полярных сред проведены обоснование и адаптация метода сжимающих операторов для поиска точки максимального сближения молекул.

Ключевые слова: переносные характеристики среды, уравнение Больцмана, сжимающий оператор, Wolfram Mathematica.

Проблема адекватного описания процессов переноса при математическом моделировании задач механики жидкости и газа в настоящее время исследуется во многих работах [1–4]. Однако в этой области решены не все задачи, в том числе вопросы, связанные с математическим моделированием поведения полярных сред. Соответствующие процессы чрезвычайно сложны для теоретического исследования, несмотря на все возрастающую мощность используемых для этих целей ЭВМ. Основная трудность при этом заключается в необходимости разработки новых математических моделей, в конечном счете направленных на создание достаточно эффективных расчетных технологий для определения переносных характеристик многокомпонентных сред. В данной работе использовался подход современной кинетической теории, где все свойства переноса возможно выразить через так называемые интегралы столкновений. Эти интегралы учитывают всю динамику столкновения молекулы и, следовательно, закон действия межмолекулярных сил.

Далее представлена модель потенциала взаимодействия молекул в полярных средах, представляющего собой суперпозицию двух моделей – $(2(n+3), 6)$ -потенциала, разработанного ранее, и потенциала диполь-дипольного взаимодействия Штокмайера.

Согласно кинетической теории газов и жидкостей при интегрировании уравнения Больцмана коэффициенты переноса выражаются через интегральные скобки полиномов Сонина, которые являются линейными комбинациями интегралов столкновения молекул. Эти интегралы учитывают всю динамику столкновения молекул и, следовательно, закон действия межмолекулярных сил. В работе были выполнены обоснование и адаптация метода сжимающих операторов в полном метрическом пространстве для поиска точки максимального сближения молекул на основе введенного потенциала для полярных сред, а также приведены тестовые результаты поиска координат точки максимального сближения молекул для полярной среды – воды.

Практическое использование уравнений кинетической теории для расчета свойств переноса требует решения вопроса о выборе модельного потенциала. С инженерной точки зрения, для большинства газов со сферически симметричным силовым полем молекул удовлетворительные результаты достигаются при применении потенциалов (6-12) Леннарда – Джонса. В настоящее время из моделей, описывающих процесс взаимодействия двумолекулярных газов, самой востребованной является (m, n) -потенциал. Однако такой потенциал получен для описания процесса взаимодействия молекул только в бинарной газовой среде и требует экспериментального определения нескольких параметров, что не всегда возможно. В данной работе использовалась математическая модель однопараметрического потенциала $(2(n+3), 6)$, разработанная ранее [5]:

$$\varphi(r) = \varepsilon f(n) \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{2(n+3)} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right], \quad (1)$$

где

$$f(n) = \left(\frac{n+3}{3} \right)^{3/n} \left/ \left(1 - \left(\frac{n+3}{3} \right)^{-1} \right) \right.$$

На рис. 1 приведены графики потенциала (1) при различных значениях n .

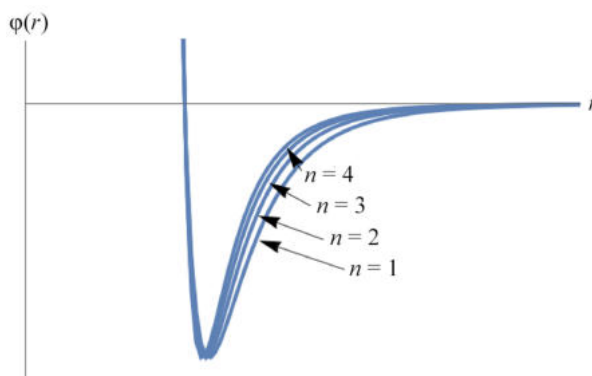


Рис. 1

Первый член уравнения (1) описывает энергию отталкивания, второй – энергию притяжения. В потенциале (1) параметры ε , σ являются постоянными, характеризующими химическую разновидность взаимодействующих молекул. Параметр σ определяет значение расстояния r между молекулами, при котором потенциал взаимодействия $\varphi(r) = 0$. Величина ε – максимальное значение энергии притяжения (глубина потенциальной ямы), которое соответствует $r = 2^{1/6} \sigma$. Потенциал (1) является обобщающим, при $n=3$ из (1) получается потенциал Леннарада – Джонса. В отличие от других моделей, модель $(2(n+3), 6)$ учитывает упругие и геометрические параметры молекул при их взаимодействии. Хотя потенциал (1) получен для описания взаимодействия в бинарной среде, но допустимо его обобщение для многокомпонентной среды. Это возможно осуществить исходя из аппроксимации многокомпонентной среды «базовой» бинарной средой, состоящей из молекул с максимальной мольной концентрацией и молекул с осредненным диаметром оставшейся части смеси. Затем полученное выражение для потенциала «базовой» бинарной среды распространяется на многокомпонентную газовую среду с помощью функционального регуляризатора и обосновывается [5, 6].

Для систем, состоящих из полярных молекул, сформируем так называемый потенциал Штокмайера:

$$\varphi_{\text{eff}}(r) = \varepsilon f(n) \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{2(n+3)} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] - \frac{\mu_1 \mu_2}{r^3} \xi, \quad (2)$$

где ξ – множитель, учитывающий зависимость энергии взаимодействия от углов ориентации диполей; μ_1 , μ_2 – дипольные моменты молекул. Потенциал Штокмайера является суперпозицией двух моделей – модели $(2(n+3), 6)$ и потенциала диполь-дипольного взаимодействия. Действительно, если μ_1 или μ_2 стремятся к нулю, имеем потенциал $(2(n+3), 6)$. Как и в случае модели $(2(n+3), 6)$, шестая степень описывает притяжение молекул, а двенадцатая степень описывает отталкивающую часть потенциала. Минус третья степень в потенциале Штокмайера учитывает только диполь-дипольное взаимодействие [7, 8]. В безразмерных переменных уравнение (2) примет вид

$$\varphi_{\text{eff}}^*(r^*) = f(n) \left(\frac{1}{r^{*2(n+3)}} - \frac{1}{r^{*6}} - \frac{2\xi\delta}{f(n)r^{*3}} \right). \quad (3)$$

В уравнении (3) $r^* = \frac{r}{\sigma}$; $\delta = \frac{\mu_1 \cdot \mu_2}{2\varepsilon\sigma^3}$; $\varphi^* = \frac{\varphi}{\varepsilon}$ – безразмерные величины.

Отметим, что при $n = 3$ и при низких температурах $\xi = 2$ [7–9] из (3) получается комбинация потенциалов Леннарада – Джонса и Штокмайера:

$$\varphi_{\text{eff}}^*(r^*) = 4 \left(\frac{1}{r^{*12}} - \frac{1}{r^{*6}} - \frac{\delta}{r^{*3}} \right). \quad (4)$$

На рис. 2 изображены графики безразмерной функции (4). Цифры у кривых указывают значения δ .

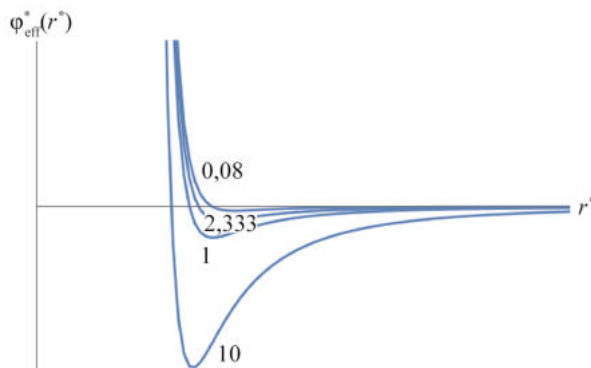


Рис. 2

Зависимость эффективного потенциала от «добавки» Штокмайера сказывается на характере столкновения молекул.

Следуя кинетической теории газов и жидкостей при интегрировании уравнения Больцмана методом Чепмена – Энскога, коэффициенты переноса выразим через интегральные скобки полиномов Сонина, которые являются линейными комбинациями интегралов столкновения молекул. Данные интегралы являются кратными несобственными интегралами, содержащими функцию угла рассеяния взаимодействующих молекул:

$$\chi(b^*, g^*) = \pi - 2b^* \int_{(r^*)_{\min}}^{\infty} \frac{dr^*/(r^*)^2}{\sqrt{1 - \varphi_{\text{eff}}^*/(g^*)^2}}, \quad (5)$$

где g^{*2} – приведенная кинетическая энергия движения; b^* – приведенный прицельный параметр.

Для вычисления несобственного интеграла выражения (5) важно знать значение нижнего предела $(r^*)_{\min}$, которое выражает координату точки максимального сближения молекул. Она определяется как минимальный положительный корень уравнения [8], которое в безразмерных переменных имеет вид

$$\varphi_{\text{eff}}^*(r^*) = g^{*2} \quad (6)$$

или

$$f(r^*) = \varphi_{\text{eff}}^*(r^*) - g^{*2} = 0, \quad r^* \in [p; q]. \quad (7)$$

Здесь $\varphi_{\text{eff}}^*(r^*)$ имеет вид (4). Уравнение (7) представляет собой нелинейное уравнение с параметрами. Найдем его приближенное решение методом простых итераций. Для этого проверим, что в рассматриваемой области уравнение (7) имеет единственный корень, и последовательность приближенных решений, построенных методом простых итераций, сходится к корню. Согласно теореме [10] в полном метрическом пространстве всякий сжимающий оператор $\Phi[x]$ имеет одну и только одну неподвижную точку, т. е. уравнение

$$\Phi[x] = x \quad (8)$$

имеет одно и только одно решение. Оператор $\Phi[x]$ называется сжимающим, если он удовлетворяет условию сжатия:

$$\rho(\Phi[x_1, x_2]) \leq \alpha \cdot \rho(x_1, x_2), \quad 0 \leq \alpha < 1.$$

Для числовых функций это выражается условием Липшица:

$$\forall x_1, x_2 \in X \quad \exists \alpha \in [0; 1): \quad |\Phi[x_1] - \Phi[x_2]| \leq \alpha |x_1 - x_2|.$$

Применим принцип сжатых операторов для доказательства существования и единственности решения уравнения (7). Преобразуем уравнение (7) к виду, пригодному для применения принципа сжимающих операторов. Введем полное метрическое пространство R с метрикой $\rho(r_1^*, r_2^*) = |r_1^* - r_2^*|$. Сжимающий оператор $\Phi: [p; q] \rightarrow R$ будем строить в виде

$$\Phi[r^*] = r^* + c \cdot f(r^*). \quad (9)$$

Воспользуемся теоремой Лагранжа о приращениях для $\Phi[r^*] \in C^1[p; q]$ при условии, что

$$|\Phi'| \leq \alpha < 1. \quad (10)$$

Согласно теореме существует число $r_c^* \in [p; q]$, для которого выполняется

$$|\Phi(r_1^*) - \Phi(r_2^*)| = |\Phi'(r_c^*)| \cdot |r_1^* - r_2^*| \leq \alpha \cdot |r_1^* - r_2^*|. \quad (11)$$

Следовательно, оператор $\Phi: [p; q] \rightarrow R$ является сжимающим с коэффициентом сжатия α .

Уточним c так, чтобы выполнялось (10):

$$|\Phi'[r^*]| = |1 + c \cdot f'(r^*)| < 1, \quad \forall r^* \in [p; q].$$

Раскрывая модуль, получим оценку для числа c :

$$-\frac{2}{f'(r^*)} < c < 0, \quad \forall r^* \in [p; q].$$

На $[p; q] \subset R$, где $p > 0, q > 0, p < q$, $f(r^*) \in C^2[p; q]$, найдем производную:

$$f'(r^*) = (\varphi_{\text{eff}}^*(r^*) - g^{*2})' = 4 \left[\frac{3\delta}{r^{*4}} + \frac{6}{r^{*7}} - \frac{12}{r^{*13}} \right]. \quad (12)$$

Поскольку $f'(r^*) > 0 \quad \forall r^* \in [p; q]$, число c подберем из условия

$$-\frac{2}{\sup_{r^* \in [p; q]} f'(r^*)} < c < 0, \quad \forall r^* \in [p; q]. \quad (13)$$

Так как $\forall r^* \in [p; q]: f''(r^*) > 0$ и $f'(r^*)$ монотонно возрастает, то можно взять

$$\sup_{r^* \in [p; q]} f'(r^*) = f'(q) = 4 \left[\frac{3\delta}{q^{*4}} + \frac{6}{q^{*7}} - \frac{12}{q^{*13}} \right].$$

Следовательно, из (13) получим:

$$-\frac{2}{f'(q)} = -\frac{2}{4\left[\frac{3\delta}{q^{*4}} + \frac{6}{q^{*7}} - \frac{12}{q^{*13}}\right]} < c < 0.$$

Итак, при любом значении числа c из промежутка

$$c \in \left(-\frac{1}{6\left(\frac{\delta}{q^{*4}} + \frac{2}{q^{*7}} - \frac{4}{q^{*13}}\right)}; 0 \right) \quad (14)$$

оператор (9) $\Phi: [p; q] \rightarrow R$, $\Phi[r^*] = r^* + c \cdot f(r^*)$ является сжимающим. Таким образом, к уравнению (6), представленному в виде

$$r^* + c \cdot f(r^*) = r^* \quad (15)$$

с учетом (14), можно применить принцип сжимающих операторов [10–13], а это значит, оно имеет единственное решение, и для поиска точки максимального сближения молекул можно использовать метод простых итераций.

Как указано в работе [12], число итераций существенно зависит от коэффициента сжатия

$$\alpha = 1 + c \cdot f'(r^*), \quad 0 \leq \alpha < 1.$$

Чем меньше α , тем выше скорость сходимости метода простых итераций, поэтому число c лучше выбирать из промежутка (14) так, чтобы коэффициент сжатия α стремился к нулю.

Определим априорную оценку достаточного числа итераций для нахождения приближенного решения уравнения (15). В полном метрическом пространстве R справедлива оценка точности [10]:

$$\rho(x_n, x) \leq \frac{\alpha^n}{1 - \alpha} \rho(x_0, x_1),$$

поэтому для заданного ε необходимо подобрать такой априорный n , что

$$\frac{\alpha^n}{1 - \alpha} \rho(x_0, x_1) < \varepsilon \Rightarrow n < \log_{\alpha} \frac{\varepsilon(1 - \alpha)}{\rho(x_0, x_1)}.$$

Следовательно, априорная оценка $N_{\text{арг}}$ числа итераций находится по формуле

$$N_{\text{арг}} = \left\lceil \log_{\alpha} \frac{\varepsilon(1 - \alpha)}{\rho(x_0, x_1)} \right\rceil + 1,$$

где квадратные скобки означают целую часть заключенного в них числа.

Выполним численный расчет точки максимального сближения молекул для полярной среды – воды – на основе модели (4), где $\delta = 2,3333$ взято из работы [9].

Численное решение уравнения реализуем методом простых итераций. Предварительно локализуем корни уравнения (7), построив графики $f(r^*)$ (рис. 3).

Корни уравнений содержатся на отрезке $r^* \in [0,5; 1]$. Значения для $g^{*2} \in [0,4; 10]$ было взято с учетом равномерной сходимости функции угла рассеяния взаимодействующих молекул на множестве R [13]. Подберем $c = -0,5$ из условия (14), сформируем оператор согласно (9):

$$\Phi: [0,4; 10] \rightarrow R, \quad \Phi[r^*] = r^* - 0,5 \cdot f(r^*).$$

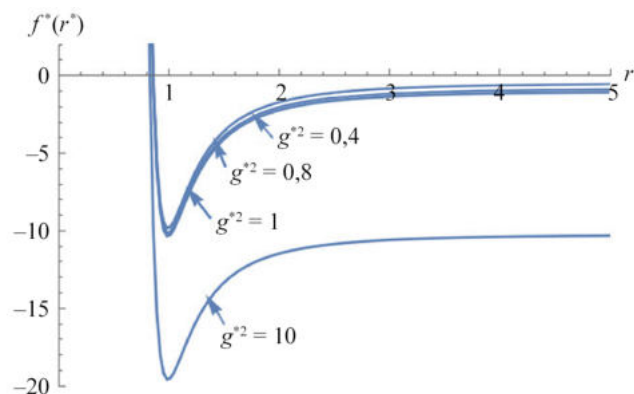


Рис. 3

Убедимся, что оператор $\Phi[r^*]$ является сжимающим:

$$r^* \in [0,5; 1]: \quad |\Phi'[r^*]| = |1 - 0,5 \cdot f'(r^*)| < 1.$$

Таким образом, к уравнению (7), представленному в форме (15), применим принцип сжимающих операторов, а это значит, что оно имеет единственное решение, и для поиска приближенного решения можно использовать метод простых итераций:

$$r_n^* = \Phi[r_{n-1}^*], \quad n = 1, 2, \dots, .$$

Для $r_0^* \in [0,5; 1]$ и $\varepsilon = 10^{-4}$ число итераций не превышало $N_{\text{ap}} = 25$.

Реализация алгоритма метода осуществлялась в системе компьютерной математики Wolfram Mathematica.

На рис. 4 показан график значений $(r^*)_{\min}$ – координаты точки максимального сближения молекул в зависимости от g^{*2} .

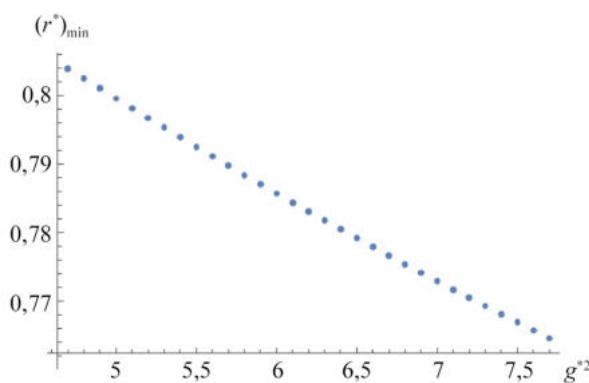


Рис. 4

Следует отметить, что в дальнейшем эти данные необходимы для вычисления значений функции угла рассеяния взаимодействующих молекул для вычисления переносных характеристик полярных сред.

В данной работе впервые была представлена модель потенциала взаимодействия молекул в полярных средах. Она представляет собой суперпозицию двух потенциалов: модели $(2(n+3), 6)$, разработанной ранее, и потенциала диполь-дипольного взаимодействия Штокмайера. В работе впервые были выполнены обоснование и адаптация метода сжатых отображений поиска точки максимального сближения молекул на базе введенного потенциала для полярных сред и расчет достаточного числа итераций в зависимости от заданной точности, выбора начальной точки и коэффициента сжатия. Также были выполнены тестовые расчеты поиска координат точки максимального сближения молекул для полярной среды – во-

ды. В дальнейшем результаты работы будут использованы в вычислительных технологиях определения переносных характеристик многокомпонентных сред на основе кинетической теории, включая распределенные вычисления.

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. Петров В.Н. и др. Физическое моделирование газожидкостных потоков // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2019. № 1. С. 104–110.
2. Ахунов А.А. и др. Конфигурация защитной пленки при конвективно-плёночном охлаждении пластины // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2024. № 2. С. 5–9.
3. Тимеркаев Б.А. и др. Синтез наноалмазов в керосине // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2024. № 3. С. 13–17.
4. Альдербас Р.Х.М., Сидоров А.В., Гуреев В.М. Оценка на основе численного моделирования влияния плотности и вязкости нефтепродуктов на характеристики многоступенчатых центробежных нефтеперекачивающих насосов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2024. № 3. С. 18–24.
5. Анисимова И.В., Игнатьев В.Н. Вычислительные и компьютерные технологии определения коэффициентов переноса в моделях многокомпонентных смесей. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та им. А.Н. Туполева, 2019. 256 с.
6. Анисимова И.В. и др. О потенциале взаимодействия молекул в многокомпонентных газовых средах // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. № 4. С. 69–74.
7. Ferziger J.H., Kaper H.G. Mathematical Theory of Transport Processes in Gases. North-Holland, 1972. 579 p.
8. Hirschfelder J.O., Curtiss Ch.F., Bird R.B. Molecular Theory of Gases and Liquids. N.Y: John Wiley & Sons Inc., 1954. 1249 p.
9. Цветков О.Б., Лаптев Ю.А., Волков Д.Г. Методы расчета свойств переноса рабочих веществ холодильной техники. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 63 с.
10. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа М.: Физматлит, 2004. 572 с.
11. Треногин В.А. Функциональный анализ. М.: Физматлит, 2007. 488 с.
12. Филимонова Н.В. Конспект лекций по функциональному анализу. СПб.: Лань, 2015. 176 с.
13. Анисимова И.В., Игнатьев В.Н. Равномерная сходимость функции угла рассеяния в газовых смесях // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 4. С. 195–201.

Поступила в редколлегию 18.03.25

CALCULATION OF THE POINT OF MAXIMUM APPROACH OF MOLECULES IN POLAR ENVIRONMENTS

I.V. Anisimova and V.S. Frolov

The work is devoted to the problem of describing the processes of transfer in polar media based on the molecular kinetic theory. In the course of the work, the potential of interaction of molecules was constructed, which is a superposition of the model developed by the authors earlier and the Stockmayer potential. Based on the introduced potential for polar media, the method of contraction operators was substantiated and adapted to search for the point of maximum approach of molecules.

Keywords: transport characteristics of the medium, Boltzmann equation, contraction operator, Wolfram Mathematica.

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

Фролов Владимир Сергеевич – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: overlord.17ks@yandex.ru

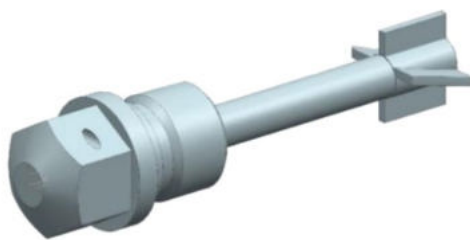


Рис. 2

Другим способом подачи топлива является струйная подача, формирующая на выходе из форсунки топливные струйки. Данную форсунку можно классифицировать как струйную газовую форсунку. Такая форсунка (рис. 3) отличается от центробежной газовой форсунки тем, что из конструкции исключен шнек, а на кончике форсунки вместо одного центрального отверстия располагаются четыре равнорасположенных отверстия диаметром d для выхода струек газа.

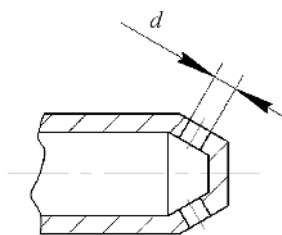


Рис. 3

Расчетное исследование проводилось с целью поиска оптимальной конструкции форсунки для камеры сгорания, которая обеспечивает наиболее эффективное сжигание топлива, влияя на снижение эмиссии оксида углерода. Также проверено, как влияют эти изменения на концентрацию оксидов азота.

В данной работе использовалась модель турбулентности RNG $k-\epsilon$, обеспечивающая получение наиболее адекватной картины течения высокотемпературных продуктов сгорания. Немаловажно, что модель достаточно устойчива при выполнении вычислений [4].

При моделировании горения использовались три модели горения – EddyDissipationConcept, FiniteRate/EddyDissipation, NonPremixed_flamelet с пакетом реакций (kee58) с типовым набором модельных констант. Задачи решались в неадиабатной постановке [5].

Приведем граничные условия. Геометрические и сеточные модели рассматриваемых модификаций камер сгорания двигателя НК-16СТ созданы для 1/32 сектора камеры сгорания, что соответствует условию нахождения одного горелочного устройства в рассматриваемом секторе [6].

Исходные параметры для моделирования следующие. На номинальном режиме работы газотурбинной установки НК-16СТ давление воздуха за компрессором $P_k^* = 895000$ Па ; температура воздуха за компрессором $T_k^* = 596$ К ; суммарный коэффициент избытка воздуха в камере сгорания $\alpha_{\Sigma} = 5$; расход воздуха $G_b = 98/32 = 3,0625$ кг/с ; расход топлива $G_T = 1,18/32 = 0,03689$ кг/с.

На входе в диффузор камеры сгорания задавался массовый расход воздуха с однородным распределением параметров потока. Аналогично задавался расход топливного газа. В качестве топливного газа рассматривался метан. На выходе камеры сгорания задавалось условие постоянства давления в поперечном сечении, соответствующее номинальному режиму работы. На границах сектора были определены периодические граничные условия. Параметры турбулентности на входе – гидравлический диаметр и интенсивность турбулентности, равная 5 %.

Расчетная сетка базовой модели, адаптированная к геометрии камеры сгорания, содержала порядка 4,76 млн элементов и состояла из гексаэдральных, клиновидных, а в более сложных областях – горелочном устройстве и примыкающих к ней участках – из тетраэдральных и пирамидальных элементов.

Процессы теплопередачи по элементам конструкции не учитывались, и сетка на элементы конструкции не накладывалась. Также не рассматривались процессы теплообмена с элементами конструкции [7].

При построении геометрической модели в качестве граничных условий для расчетного сегмента, ограничивающих выделенный объем камеры сгорания от смежных областей, задавались периодические условия на боковых стенках жаровой трубы камеры сгорания на всех остальных боковых поверхностях сегмента (рис. 4). Условия периодического подвода позволяют воспроизводить закрутку потока лопатками завихрителя горелочного устройства.

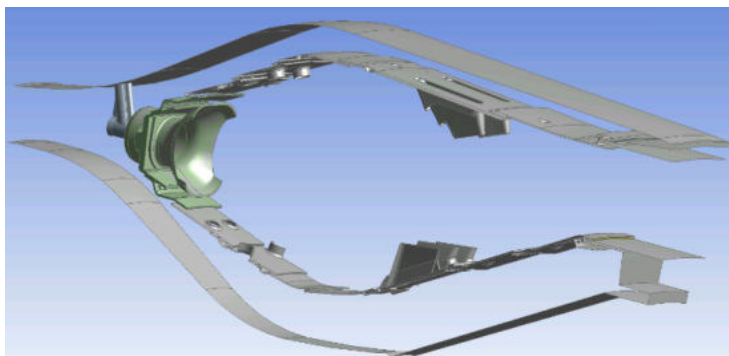


Рис. 4

Примеры температурных полей в плоскости, проходящей через ось горелочного устройства ($z = 0$), показаны в табл. 1. Проиллюстрировано влияние модели горения и конструкции форсунки на распределение зон горения и высокотемпературных областей по внутрикамерному пространству.

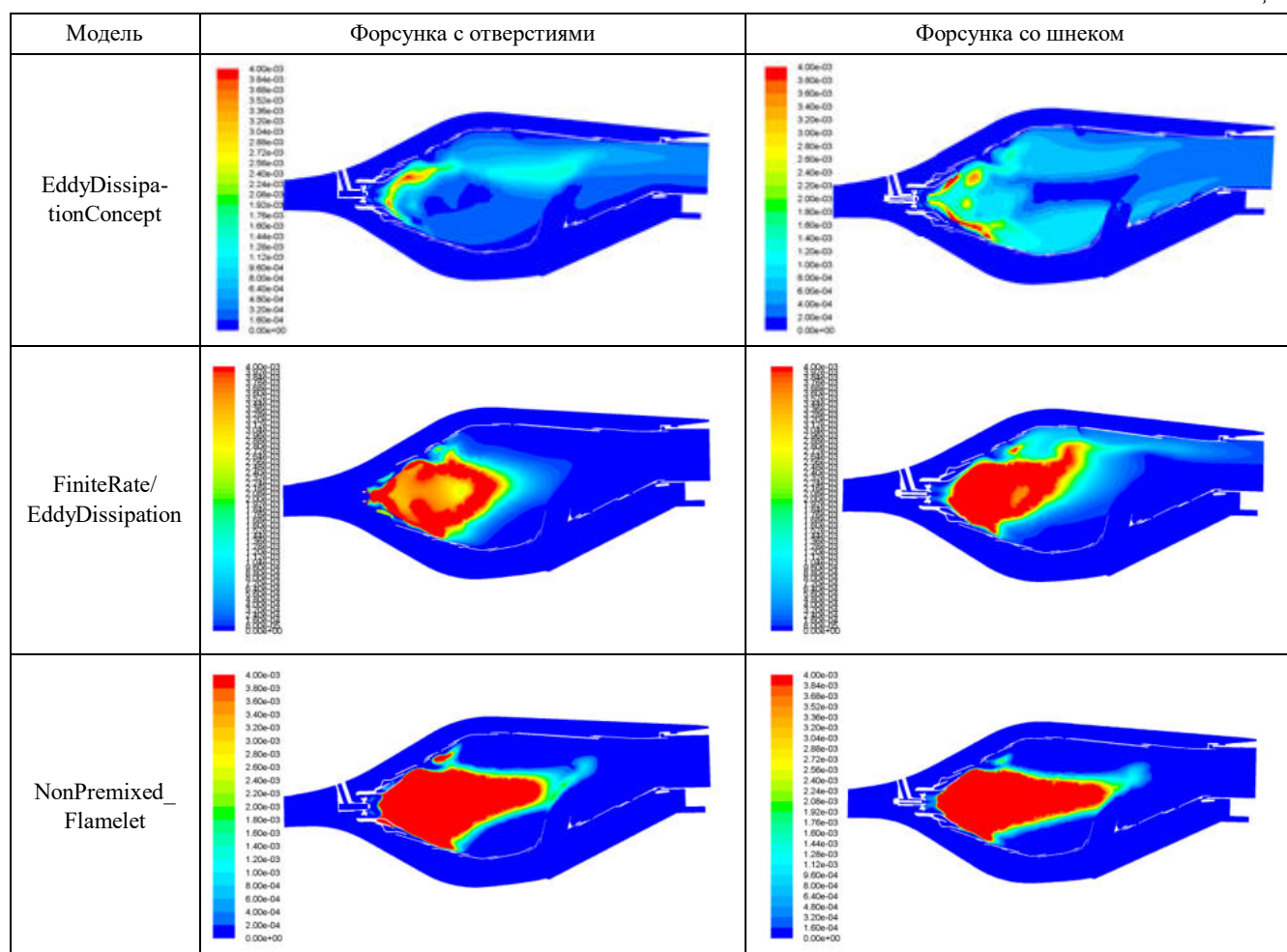
Таблица 1

Модель	Форсунка с отверстиями	Форсунка со шнеком
EddyDissipationConcept		
FiniteRate/ EddyDissipation		
NonPremixed_ Flamelet		

По результатам моделирования получены близкие значения распределения температур во внутри-камерном пространстве и, в частности, ярко выраженная высокотемпературная область. Она формируется во фронтальной части камеры сгорания и продолжается до области подвода воздуха через патрубки. Также согласно результатам распределения температур выявлены завышенные значения температур у фронтальной плиты в моделях FiniteRate/EddyDissipation и NonPremixed_Flamelet, что не наблюдается в реальных условиях работы камеры сгорания. Высокие температуры у фронтальной плиты обусловлены тем, что модели турбулентности прогнозируют интенсивные зоны рециркуляционных токов между фронтальной плитой и горелочным устройством. Камера сгорания с центробежной газовой форсункой формирует более горячее ядро потока. При этом камера со струйной газовой форсункой формирует более широкое ядро потока, что является принципиальным отличием распределения температур в зоне горения.

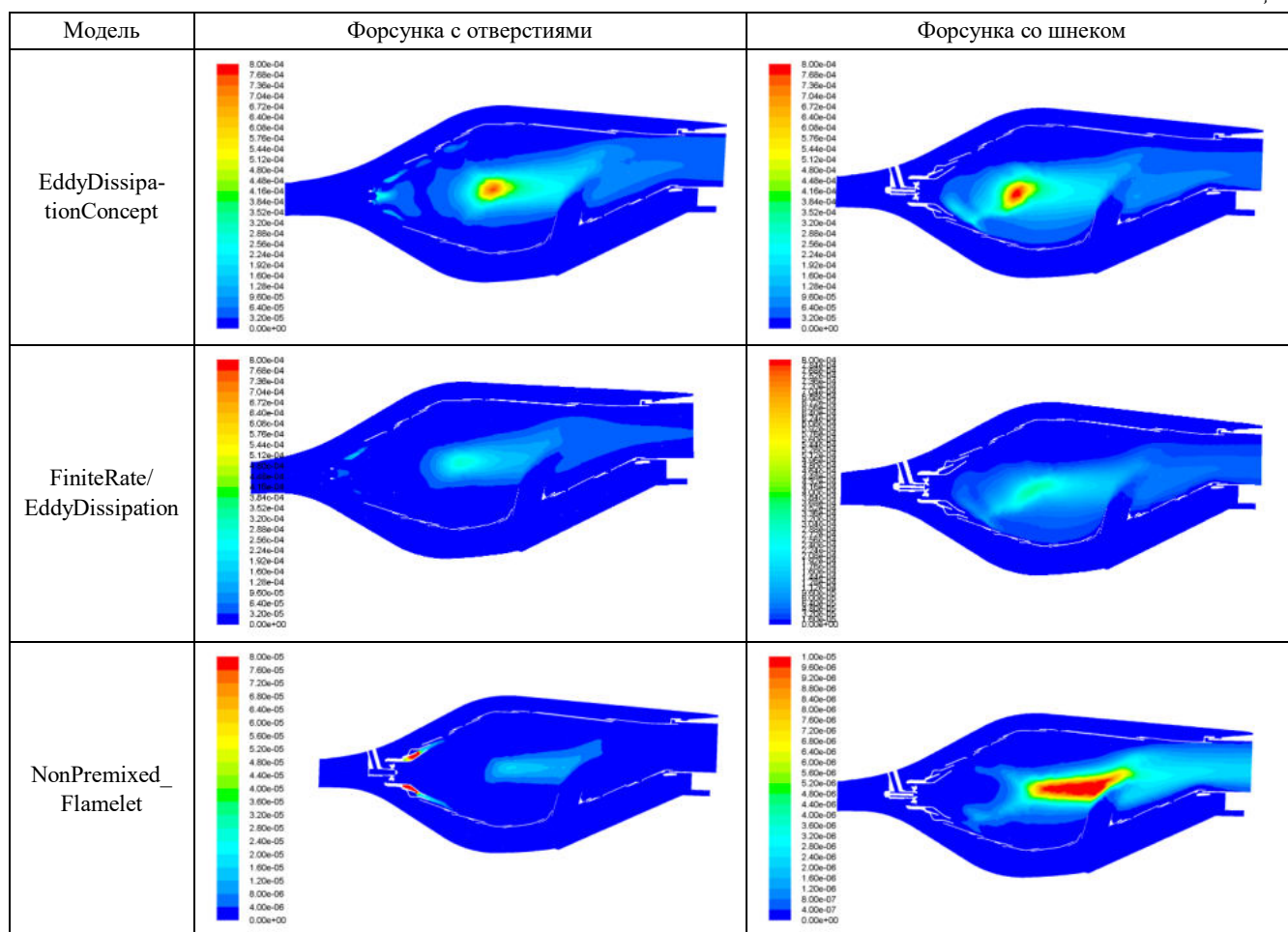
В табл. 2 показаны поля распределения концентраций оксидов углерода по различным моделям горения.

Таблица 2



По результатам расчета оксидов углерода по двум моделям горения (EddyDissipationConcept, FiniteRate/EddyDissipation), камера сгорания с центробежной газовой форсункой имеет большую область формирования этого компонента в объеме жаровой трубы по сравнению с камерой сгорания, содержащей струйную газовую форсунку. При этом расчеты, выполненные по модели FiniteRate/EddyDissipation, показали весьма завышенные значения оксида углерода. Применение модели NonPremixed_flamelet продемонстрировало идентичное распределение оксида углерода в объеме жаровой трубы в случае обоих вариантов камеры сгорания, при этом его уровень оказался высоким.

В табл. 3 приведены поля распределения концентраций оксидов азота по различным моделям горения.



При использовании модели EddyDissipationConcept в ходе сравнительного анализа двух камер сгорания выявлено незначительно большее количество оксидов азота в объеме жаровой трубы с центробежной газовой форсункой и на выходе из камеры сгорания. В случае модели FiniteRate/EddyDissipation установлено незначительное расхождение в уровне концентрации оксидов азота между двумя камерами. При этом также в камере сгорания с центробежной газовой форсункой концентрация оксидов азота оказалась выше. Применение модели NonPremixed_Flamelet показало значительное завышение уровня оксидов азота в камере сгорания с центробежной газовой форсункой.

Эмиссионные характеристики рассчитанных вариантов камеры сгорания оценивались в данной работе по приведенным параметрам. Обработка результатов расчетов для получения параметров эмиссии проводилась в соответствии с требованиями [8]. Уровни эмиссии оксида углерода и оксидов азота приводились к стандартным условиям, к 15 %-му содержанию кислорода в продуктах сгорания, а также к «сухой пробе», т. е. учитывалась доля паров, содержащаяся в продуктах сгорания. Так как NO представляет собой неустойчивое соединение и окисляется при контакте с атмосферным воздухом до NO₂, то все продукты эмиссии оксидов азота приводились к NO₂.

Исходными значениями для приведения были мольные доли CO и NO на выходе камеры сгорания. Так как распределения концентраций в выходном сечении неравномерны, для получения этих величин вычислялись их осредненные по площади значения. Так как мольная доля не зависит от температуры и давления, приведение к нормальным условиям по давлению и температуре не требуется. Для приведения к концентрации NO₂ полученное осредненное по площади значение NO умножалось на мольную массу NO₂:

$$C_{NO} = NO \cdot 2,054, \quad (1)$$

где NO – осредненная по площади мольная доля; 2,054 – мольная масса NO₂.

Приведенная концентрация оксида углерода рассчитывалась по формуле

$$C_{CO} = CO \cdot 1,025, \quad (2)$$

где CO – осредненная по площади мольная доля; 1,025 – мольная масса CO .

Приведение к 15 % содержания кислорода проводилось по формуле

$$C_i^{15} = C_i \frac{20,95 - 15}{20,95 - O_2}. \quad (3)$$

В расчетах содержание кислорода в пробе O_2 принимается по среднестатистическим данным, полученным в результате многократного отбора проб в шахте выхлопа (17 %).

С целью подтверждения работоспособности и эффективности камер сгорания со струйной газовой форсункой проведены испытания двигателя НК-16СТ. По результатам испытаний выполнено измерение концентрации оксидов углерода (рис. 5, а) и оксидов азота (рис. 5, б) в продуктах сгорания на различных режимах работы двигателя.

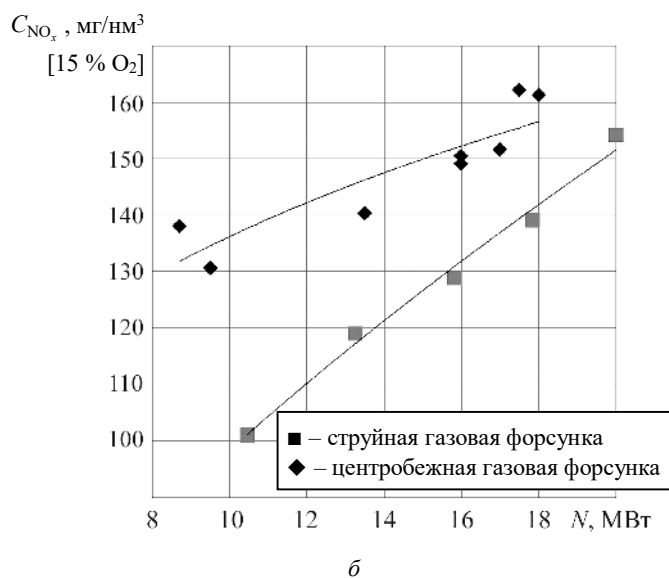
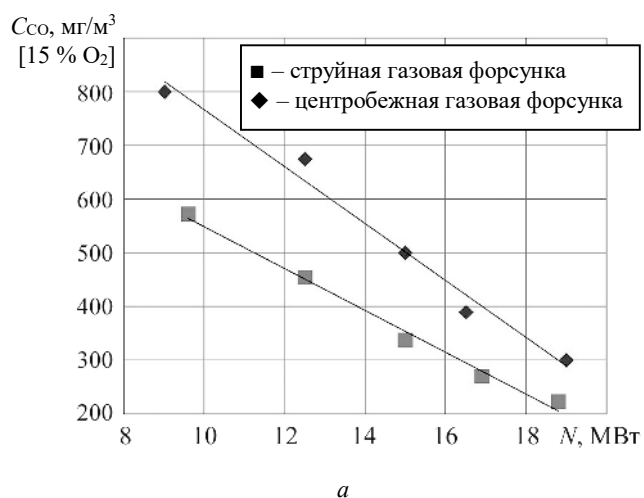


Рис. 5

Как видим (см. рис. 5), с увеличением мощности двигателя уровень концентрации оксида углерода в продуктах сгорания падает, при этом в двигателе с камерой сгорания, содержащей струйную газовую форсунку, выбросы оксидов углерода на 35 % ниже, в отличие от камеры сгорания с центробежной газовой форсункой, что обеспечивает концентрацию оксидов углерода, соответствующую нормам по ГОСТу [9].

Выбросы оксидов азота с увеличением мощности двигателя растут, что связано с увеличением давления и температуры на входе в камеру сгорания.

Для определения полноты сгорания, которая является отношением тепла, выделившегося при сгорании смеси, к теплотворной способности топлива, используется зависимость

$$\eta = \frac{G_T (H_U - G_{nc} \sum g_i H_{Ui})}{G_T H_U} = 1 - \frac{G_{nc} \sum g_i H_{Ui}}{G_T H_U} = 1 - \frac{(G_T + G_B) \sum g_i H_{Ui}}{G_T H_U}, \quad (4)$$

где G_T – расход топлива; G_B – расход воздуха; H_U – низшая теплотворная способность топлива; G_{nc} – расход продуктов сгорания; H_{Ui} – низшая теплотворная способность несгоревших компонент; g_i – массовая доля несгоревших компонент, к которым относятся CO, C_nH_m . Пренебрегая различием теплотворной способности топлива и несгоревших компонент, получим следующую формулу для расчета коэффициента полноты сгорания [10]:

$$\eta = 1 - \frac{(G_T + G_B) \sum g_i}{G_T} = 1 - (1 + \alpha k_m) \sum g_i. \quad (5)$$

При расчете полноты сгорания в качестве несгоревших компонент учитываются доли метана и оксида углерода.

Рассмотрим количественные значения выбросов токсичных веществ (табл. 4).

Таблица 4

Модель	Концентрация оксида углерода CO, ppm	Концентрация оксида углерода CO, мг/м³	Концентрация оксида углерода, приведенная к 15 %-му содержанию кислорода CO(O ₂), мг/м³	Концентрация оксидов азота NO _x , ppm	Концентрация оксидов азота NO _x , мг/м³	Концентрация оксидов азота, приведенная к 15 %-му содержанию кислорода NO _x (O ₂) мг/м³	Коэффициент полноты сгорания η
Камера сгорания с центробежной газовой форсункой							
FiniteRate/EddyDissipation	275	343,7	515,6	46	94,4	141,7	0,97
EddyDissipationConcept	253	316,2	474,3	52	106,8	160,8	0,98
NonPremixed_flamelet	340	425	637,5	39	80	120	0,87
Эксперимент	245	306	459,3	48	98,6	147,8	0,98
Камера сгорания со струйной газовой форсункой							
FiniteRate/EddyDissipation	173	216,26	324,3	41	84,2	126	0,987
EddyDissipationConcept	161	201,5	301,8	51	104,7	157	0,99
NonPremixed_flamelet	185	231,25	346,12	30	61,6	92,4	0,98
Эксперимент	158	197,5	296,25	43	88,3	132,4	0,99

По результатам расчета, с помощью рассмотренных моделей горения возможно спрогнозировать концентрации токсичных веществ. Концентрации оксида углерода и оксидов азота, полученные при помощи модели EddyDissipationConcept, наиболее близки к экспериментальным данным.

Таким образом, при организации форсункой струйной подачи топлива возможно наиболее эффективно сжигать газообразное топливо. Струйная подача топлива позволяет на 35 % снизить концентрацию оксидов углерода в продуктах сгорания двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриценко Е.А. и др. Некоторые вопросы проектирования авиационных газотурбинных двигателей. Самара: СНЦ РАН, 2002. 527 с.
2. Гриценко Е.А. и др. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения. Самара: СНЦ РАН, 2004. 266 с.
3. Бакланов А.В. Влияние способа подачи газообразного топлива в камеру сгорания на образование оксидов углерода в продуктах сгорания газотурбинного двигателя // Вестник МАИ. 2019. № 1. С. 111–125.
4. Sadiki A. et al. Numerical and Experimental Investigations of Confined Swirling Combusting Flows // Progress in Computational Fluid Dynamics. 2003. Vol. 3. № 2-4. P. 78–88.

5. Варнатц Ю. и др. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. М.: Физматлит, 2003. 352 с.
6. Бакланов А.В. Управление процессом сжигания топлива путем изменения конструкции горелки в камере сгорания газотурбинного двигателя // Вестник МАИ. 2018. № 2. С. 73–85.
7. Roy G.D. et al. High-Speed Deflagration and Detonation: Fundamentals and Control. Moscow: ELEX-KM Publishers, 2001. 384 p.
8. ГОСТ 29328-92. Установки газотурбинные для привода турбогенераторов. Общие технические условия. М.: Госстандарт, 1991. 12 с.
9. ГОСТ 28775-90. Агрегаты газоперекачивающие с газотурбинным приводом. Общие технические условия. М.: Стандартиформ, 2005. 12 с.
10. Мингазов Б.Г. и др. Анализ применимости моделей горения для расчета многофорсуночной камеры сгорания ГТД // Вестник СГАУ. 2011. № 5 (29). С. 208–214.

Поступила в редколлегию 13.02.25

INFLUENCE OF JET AND CENTRIFUGAL GAS INJECTORS ON THE FORMATION OF TOXIC SUBSTANCES IN THE COMBUSTION CHAMBER

A.V. Baklanov

The results of modeling the working processes in the combustion chamber of a gas turbine engine running on gaseous fuel are presented. Two variants of the combustion chamber are considered: with a nozzle having a jet gas supply and with a nozzle having a swirling gas supply. The calculation of intra-chamber processes is performed using the combustion models EddyDissipationConcept, FiniteRate/EddyDissipation, NonPremixed_flamelet. According to the calculation results, it is determined that the organization of jet fuel supply allows the most efficient combustion of gaseous fuel. The combustion model that showed the closest value to the experimental data on CO and NO_x emissions is the EddyDissipationConcept model.

Keywords: combustion chamber, nitrogen oxides, temperature field, modeling, combustion processes.

Бакланов Андрей Владимирович – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: andreybaklanov@bk.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ И КОНЦЕНТРАЦИЙ ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ В МНОГОФОРСУНОЧНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

А.В. Бакланов, Ф.М. Валиев

Приведены результаты исследования структуры течения и концентраций токсичных веществ в первичной зоне камеры сгорания с двухъярусным расположением форсунок, работающей на керосине. Описаны особенности конструкции форсунок, устанавливаемых во фронтальном устройстве камеры сгорания. Приводится описание стендового оборудования и отсека камеры сгорания, где проводились исследования.

Ключевые слова: камера сгорания, форсунка, фронтальное устройство, структура течения, концентрации токсичных веществ.

Основные характеристики вредных выбросов и качественные физические модели для камер сгорания газотурбинных двигателей могут быть получены по измерениям в выходном сечении камеры или двигателя [1]. Однако детали сложного процесса горения, необходимые для анализа влияния изменений конструкций камеры и для сравнения с аналитическими моделями расчета, применяются только в том случае, если известна газодинамическая структура течения в объеме жаровой трубы, а также распределение составов и концентраций токсичных веществ [2, 3].

Газодинамика течения и распределение составов газа в объеме жаровой трубы имеет пространственный характер, осложненный отрывными течениями, взаимодействием струй, фазовыми превращениями, горением. В данной работе получены осредненные по времени поля скоростей пространственно не ориентированного потока, каковым является течение в жаровой трубе. Скорости потока измерялись пятиточечным сферическим насадком при холодных продувках камеры сгорания. Такой насадок позволил получить картину течения без горения в девятифорсуночном отсеке камеры сгорания за различными горелочными устройствами, которые в данной камере сгорания называются форсунками [4].

Во фронтальном устройстве камеры сгорания НК-8 размещено три варианта форсунок. Форсунка № 1 (рис. 1, а) состоит из корпуса, к которому через лопатки завихрителя крепят диффузорную втулку. Внутри диффузорной втулки имеется перфорированный конический стабилизатор. Угол лопаточного завихрителя – 45° . Форсунка № 2 (рис. 1, б) имеет угол лопаточного завихрителя 30° и увеличенный по сравнению с форсункой № 3 диаметр сопла конфузорной втулки $d = 20$. Форсунка № 3 (рис. 1, в) имеет конфузорную втулку с выходным диаметром 14 мм и углом лопаточного завихрителя 45° . В корпусе каждой из представленных форсунок установлены распылитель и фильтр [5].

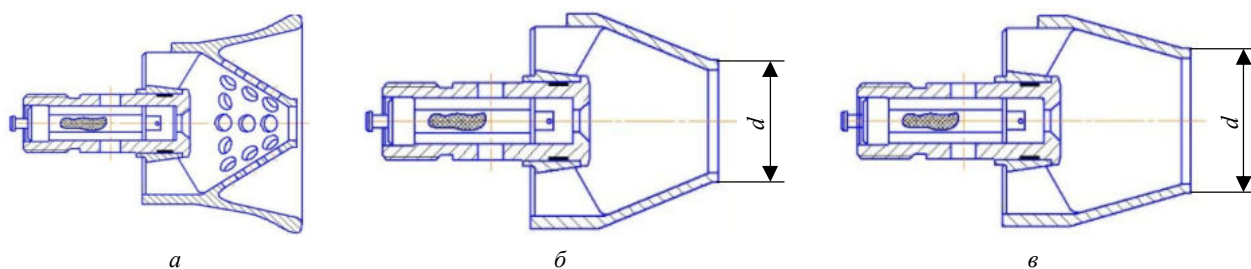


Рис. 1

В состав установки для испытания камеры сгорания (рис. 2) входит источник сжатого воздуха (компрессор), приводом которого является электродвигатель, а также воздухоподводящая магистраль с регулирующей арматурой и приборами для измерения параметров потока, в которой расположено топочное устройство и теплообменник. На выходе воздухоподводящей магистрали расположена камера сгорания [6]. Также установка содержит линию подвода топлива к камере сгорания и линию подвода топлива к топочному устройству. Каждая линия подвода содержит баки с жидким топливом, топливные фильтры, топливные насосы и приборы для измерения параметров.

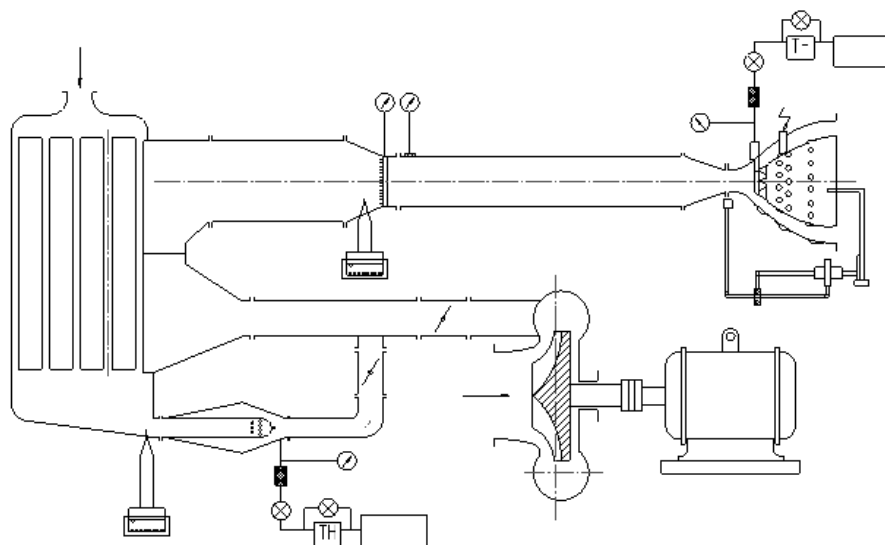


Рис. 2

Применение пятиточечного сферического насадка позволило оценить примерное направление и величину вектора местной скорости, что заметно увеличивает информативность результатов исследования газодинамики течения в жаровой трубе.

Исследования проводились в отсеке, содержащем девять форсунок. Отсек представляет собой сектор (1/14 часть полноразмерной кольцевой камеры сгорания), состоящий из наружного и внутреннего корпусов, жаровой трубы с фронтным устройством с установленными форсунками. Жаровая труба ограничена с обеих сторон боковыми охлаждаемыми стенками [7].

Для исследования газодинамической структуры течения в первичной зоне камеры сгорания устанавливается подвижный зонд с приемником полного и статического давления, который позволяет при пересчете определить поля скоростей в характерных сечениях отсека. В качестве характерных сечений в случае установки серийных форсунок приняты продольные сечения, проходящие по их оси, как показано на рис. 3.

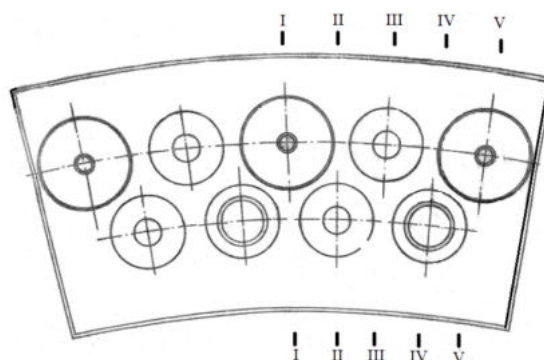


Рис. 3

По результатам измерений получены соответствующие поля скоростей (рис. 4).

Полученные поля скоростей в жаровой трубе при установке серийных форсунок указывают на следующие характерные особенности течения.

За каждой форсункой образуется индивидуальная зона обратных течений (см. рис. 4), которая имеет продольный размер (примерно 30–40 мм), при этом в форсунке № 1 наблюдается зона рециркуляции потока между диффузорной втулкой и перфорированным коническим стабилизатором (рис. 4, а). Зона обратных течений также образуется в пространстве между форсунками, в пристеночной области за боковыми отверстиями жаровой трубы (рис. 4, б–г), а также в следе за патрубком пускового воспламенителя (см. рис. 4, а). Сложная картина течения с областями рециркуляции потока наблюдается в

зоне, близкой к фронтальному устройству. Затем по ходу движения направление потока постепенно выравнивается, и ближе ко входу в зону смешения жаровой трубы течение принимает в основном осевое направление (см. рис. 4).

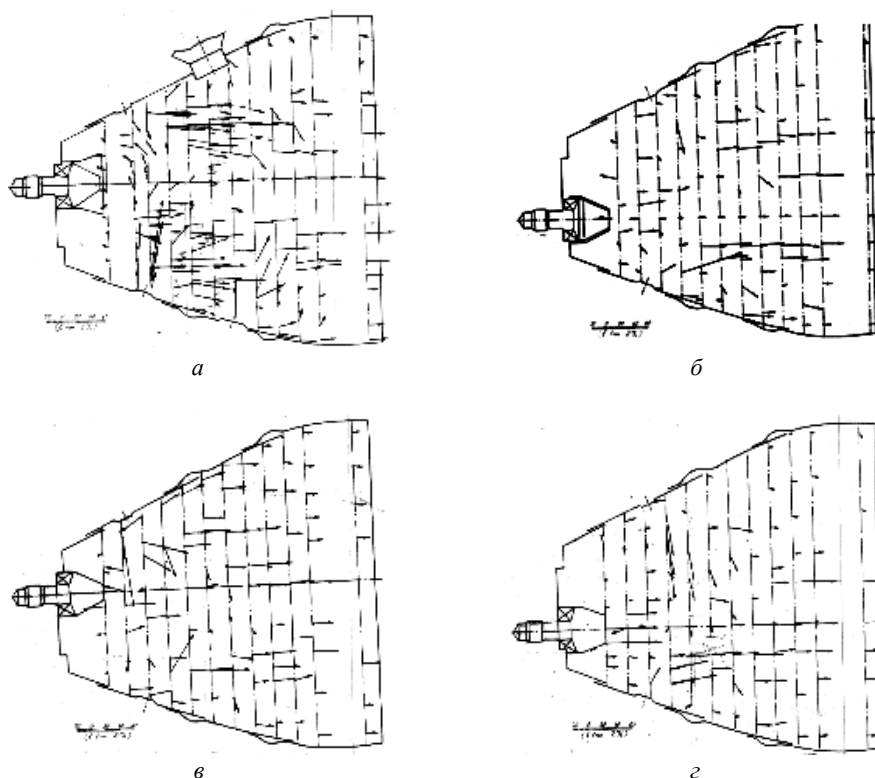


Рис. 4

Поле течения в первичной зоне камеры формируется тремя составляющими, каждая из которых условно изображена на рис. 4. Поток воздуха из боковых щелей между плитой и диффузорной частью жаровой трубы формирует основную зону возвратных течений. Данный поток охватывает все поперечное сечение диффузорной части камеры сгорания. Созданные им обратные токи являются основным механизмом переноса к фронтальному устройству тепла, необходимого для воспламенения свежей смеси. Резкая диффузорность головной части жаровой трубы способствует высокой интенсивности возвратных течений.

В жаровой трубе наблюдается два крупномасштабных течения – струи воздуха из боковых отверстий жаровой трубы и струи топливовоздушной смеси за вихревыми форсунками. Воздушные струи слабо влияют на интенсивность возвратных течений, поскольку они втекают внутрь жаровой трубы под наклоном и с относительно небольшим расходом. Влияние закрученных струй топливовоздушной смеси, направление движения которых противоположно возвратным токам, значительнее [8].

Процесс смешения в первичной зоне многофорсуночной камеры можно классифицировать по масштабу перемешивания:

- грубое перемешивание, осуществляемое рециркуляционным течением в зоне стабилизации пламени, крупными боковыми струями воздуха и закрученными струями топливовоздушной смеси;
- перемешивание среднего масштаба, обусловленное турбулентными пульсациями, генерируемыми в зонах высоких касательных напряжений движения потоков газа, взаимодействием закрученных и боковых струй друг с другом;
- перемешивание на молекулярном уровне в процессе рассеивания кинетической энергии турбулентного движения.

Перемешивание во всем диапазоне масштабов осуществляется каскадным рассеянием энергии, первоначально содержащейся в высокоскоростных струях воздуха и закрученных потоках топливо-

воздушной смеси [9]. В целом эта энергия зависит от перепада давления на стенках жаровой трубы. Масштаб процесса каскадного рассеяния энергии зависит от размера потока, составляющего поле течения, и кинетической энергии турбулентности [10].

Измерение полей концентраций диоксида углерода, кислорода, оксида углерода, углеводородов внутри жаровой трубы проводилось на той же установке (см. рис. 2) с подачей топлива и горением. Отборы проб газа осуществлялись одноканальным водоохлаждаемым пробоотборником. Благодаря этим результатам и картине течения выявлены условия горения и образования загрязняющих веществ в конкретной камере сгорания, что особенно важно при разработке физической модели процессов [11].

Результаты исследования распределения составов и динамики изменения концентраций токсичных веществ также представлены в виде полей концентраций диоксида углерода, кислорода, оксида углерода в отмеченных характерных сечениях камеры. Соответствующие поля приведены на рис. 5.

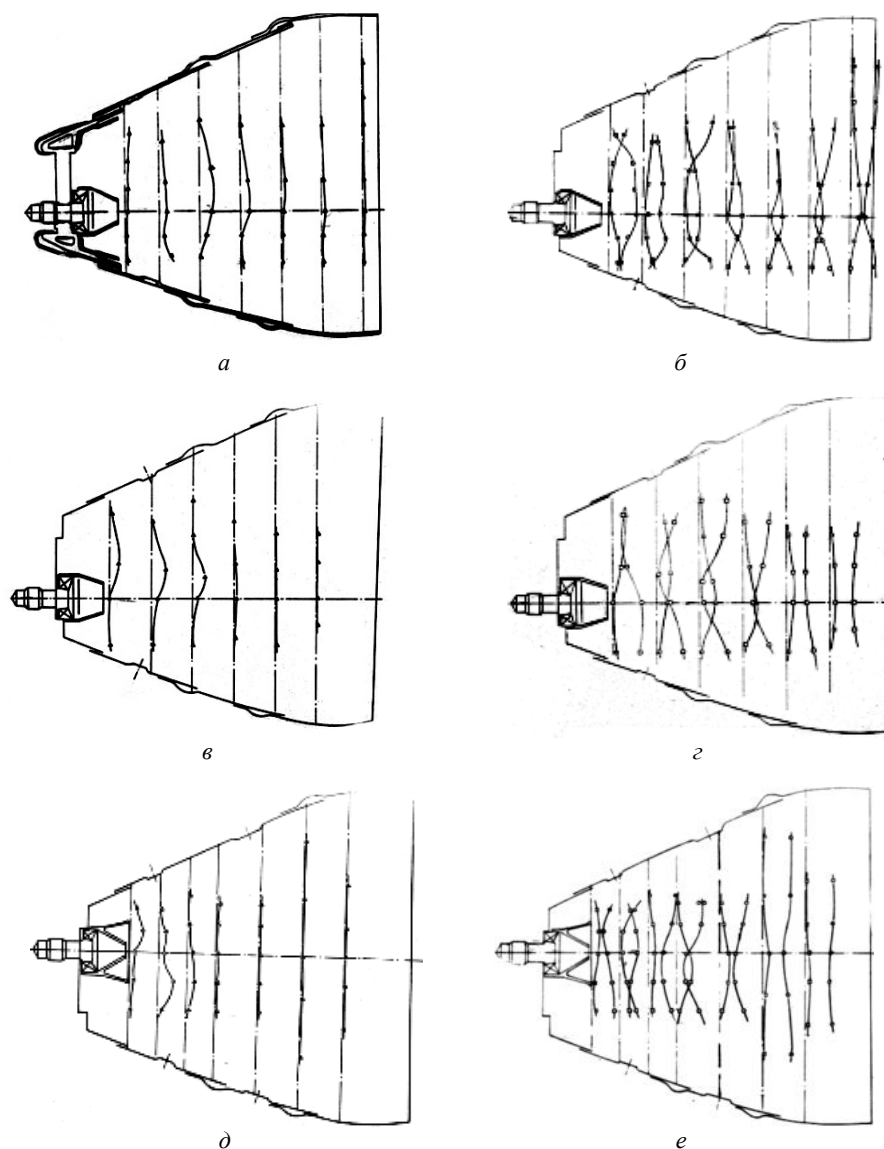


Рис. 5

С помощью полученных полей распределения концентраций веществ при горении в жаровой трубе с серийными форсунками выявлены следующие характерные особенности.

Топливо в основном сконцентрировано в следе за форсунками. Существенная неравномерность распределения топлива сохраняется в пределах всей длины зоны горения жаровой трубы (рис. 5, а, в, д). Концентрация оксида углерода резко возрастает по длине жаровой трубы вблизи форсунок, достигает максимума, и в дальнейшем происходит ее уменьшение (рис. 5, а, в, д).

Увеличение концентрации кислорода наблюдается в области вдувания струй воздуха (рис. 5, б, г, е). Содержание диоксида углерода минимально в закрученной струе форсунок № 1, 2, при этом его концентрация максимальна в струе форсунки № 3.

По результатам исследования можно сделать вывод о том, что в исследуемой камере сгорания есть два типа закрученных струй – со слабой и сильной закруткой [12]. Первые практически не имеют собственных зон циркуляции, вторые образуют свои зоны рециркуляции. Следовательно, воздействие слабой или сильной закрученных струй с крупномасштабным противотоком протекает по-разному. Поскольку с обратными токами в свежую смесь поступает тепло, необходимое для поддержания реакции горения, то от размеров закрученных струй меняется интенсивность теплоотвода, скорость перемешивания топлива и воздуха, взаимодействие с продуктами сгорания и характерные значения времени пребывания, что влияет на изменение концентраций токсичных веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мингазов Б.Г. и др. Анализ применимости моделей горения для расчета многофорсуночной камеры сгорания ГТД // Вестник СГАУ им. акад. С.П. Королева. 2011. № 5 (29). С. 208–214.
2. Гриценко Е.А. и др. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения. Самара: СНЦ РАН, 2004. 266 с.
3. Гриценко Е.А. и др. Некоторые вопросы проектирования авиационных газотурбинных двигателей. Самара: СНЦ РАН, 2002. 527 с.
4. Бакланов А.В. Применение многопламенного горения в камере сгорания для повышения эффективности сжигания газа // Вестник МАИ. 2022. № 2. С. 88–94.
5. Маркушин А.Н., Бакланов А.В. Результаты испытаний закоксованных форсунок камер сгорания семейства НК промывкой смесью керосина с техническим моющим средством // Тр. МАИ [Электронный журнал]. 2018. № 99. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=91839C> (дата обращения: 13.01.2025).
6. Бакланов А.В., Валиев Ф.М. Методы и средства диагностирования технического состояния камер сгорания газотурбинных двигателей. Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2020. 96 с.
7. Бакланов А.В. Малоэмиссионная камера сгорания диффузионного типа с микропламенным горением для конвертированного авиационного газотурбинного двигателя // Вестник МАИ. 2017. № 2. С. 57–68.
8. Lefebvre A.H., Ballal D.R. Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions. CRC Press, 2010. 560 p.
9. Lefebvre A.H. Fuel Effects on Gas Turbine Combustion-Ignition, Stability, and Combustion Efficiency // Journal of Engineering of Gas Turbines and Power. 1985. Vol. 107. № 1. P. 24–37.
10. Канило П.М. Энергетические и экологические характеристики ГТД при использовании углеводородных топлив и водорода. Киев: Наукова думка, 1987. 224 с.
11. Ланский А.М., Лукачев С.В., Матвеев С.Г. Рабочий процесс камер сгорания малоразмерных ГТД. Самара: СНЦ РАН, 2009. 335 с.
12. Бакланов А.В., Маркушин А.Н., Цыганов Н.Е. Влияние формы насадка вихревой горелки на смешение в закрученной струе // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2014. № 3. С. 13–18.

Поступила в редколлегию 13.02.25

STUDY OF FLOW STRUCTURE AND CONCENTRATIONS OF TOXIC SUBSTANCES IN A MULTI-INJECTOR COMBUSTION CHAMBER

A.V. Baklanov and F.M. Valiev

This paper presents the results of a study of the flow structure and concentrations of toxic substances in the primary zone of a combustion chamber with a two-tier arrangement of injectors operating on kerosene. The design features of injectors installed in the front device of the combustion chamber are described. A description of the bench equipment and the combustion chamber section on which the studies were carried out is given.

Keywords: combustion chamber, injector, front device, flow structure, concentrations of toxic substances.

Бакланов Андрей Владимирович – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: andreybaklanov@bk.ru

Валиев Фарид Максимович – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: valievfm@mail.ru

УВЕЛИЧЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ ЗАГОТОВОК

А.С. Горшенин, Н.П. Краснова, Ю.И. Рахимова

Представлена математическая модель теплообмена, который происходит в системе охлаждения алюминиевых слитков после их гомогенизационного отжига. Разработанная модель позволила детально изучить процессы теплообмена в камере охлаждения. Для повышения энергоэффективности и уменьшения затрат предложены различные подходы к утилизации горячего воздуха, образующегося в процессе охлаждения. Также проведена оценка экономической эффективности каждого из предложенных методов.

Ключевые слова: полунепрерывное литье, алюминиевые сплавы, гомогенизационный отжиг, математическая модель теплообмена, энергоэффективность, экономическое обоснование снижения затрат, схемы утилизации.

Ключевой проблемой технологии полунепрерывного литья алюминиевых сплавов с использованием водоохлаждаемых кристаллизаторов является формирование неоднородной структуры, сопровождающееся микропорами и трещинами в слитках, что обусловлено неравномерным охлаждением по поперечному сечению [1, 2]. Для решения данной проблемы применяют термическую обработку, в частности гомогенизационный отжиг [3]. Этот процесс заключается в нагревании слитков до температуры, превышающей точку растворения легирующих компонентов, с последующей выдержкой.

После гомогенизации критически важным шагом является охлаждение слитков с соблюдением скорости, не превышающей установленную критическую норму во избежание нежелательной закалки сплава. Для большинства марок сплавов эта температура не должна превышать 70 °С/ч. Соблюдение данного требования можно обеспечить разными методами, однако наиболее эффективно использование специализированной камеры охлаждения, которая поддерживает заданный темп охлаждения и способствует повышению качества конечной продукции [4].

Применение существующих способов охлаждения алюминиевых слитков не позволяет выдерживать равную скорость охлаждения во всех частях каждого слитка. Кроме того, существующие режимы и способы охлаждения не учитывают геометрические характеристики камеры охлаждения и способы размещения слитков в камере, которые позволяют обеспечить равномерное охлаждение и снижение энергетических затрат на процесс охлаждения.

Решением данной проблемы является разработка математической модели регулируемого конвективного теплообмена между охлаждающим воздухом и алюминиевыми слитками.

Далее рассмотрена математическая модель охлаждения одиночного слитка. Слитки охлаждаются воздухом со скоростью W , м/с, они представляют собой цилиндры диаметром 0,24 – 0,127 м. В процессе охлаждения температура слитка уменьшается от начальной T_0 до конечной T_1 . Воздух в процессе теплообмена нагревается от начальной температуры $t_{в0}$ до конечной $t_{в1}$.

Примем следующие допущения.

1. При омывании слитка температура воздуха в пределах этого слитка $t_b \approx \text{const}$.
 2. Слиток термически тонкое тело ($Bi < 0,5$), поэтому температура по сечению слитка $t \approx \text{const}$.
- В результате таких допущений схема теплообмена имеет вид (рис. 1).

Модель теплообмена получена на основании теплового баланса между охлаждающим слитком и нагревающимся воздухом. Итоговая модель охлаждения одного алюминиевого слитка имеет вид

$$\frac{(T_1 - t_b)}{(T_0 - t_b)} = \exp(-Bi \cdot Fo \cdot 4).$$

Здесь: T_1 – конечная температуры охлаждения слитка; T_0 – начальная температура охлаждения слитка; т. е. температура, с которой слиток начинает охлаждаться; t_b – температура охлаждающего воздуха; Fo – критерий Фурье; Bi – критерий Био.

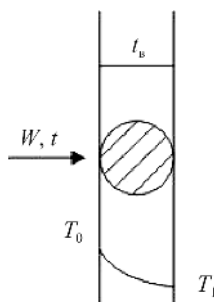


Рис. 1. Схема охлаждения слитка

Полученная математическая модель описывает теплообмен в камере охлаждения алюминиевых слитков, при этом учитывается геометрическое распределение слитков в камере охлаждения. Более подробно математическая модель, принятые к ней допущения, описание процесса теплообмена описаны в работах [5, 6].

С помощью полученной математической модели выполнено аналитическое исследование теплообмена в камере охлаждения между воздухом и алюминиевыми слитками. Было исследовано влияние конструктивных (диаметр слитка, высота канала между рядами слитков) и режимных (скорость охлаждающего воздуха) факторов. Согласно результатам исследования сохранение постоянной скорости охлаждающего воздуха не позволяет получить качественную продукцию, так как в начальный период охлаждения происходит закалка алюминиевых слитков вследствие превышения критической скорости охлаждения. В связи с этим было предложено поддерживать переменную скорость охлаждения слитков, что позволило выдержать заданную скорость охлаждения и сократить энергетические затраты. Результаты проведенных исследований представлены в работах [6–8].

По результатам проведенного исследования, температура охлаждающего воздуха на выходе из камеры составляет 120–130 °С. Удаление воздуха с такой температурой в окружающую среду экономически нецелесообразно, так как его использование позволит повысить энергоэффективность и снизить затраты на топливо в каком-либо технологическом процессе.

Рассмотрим варианты использования теплоты охлаждающего воздуха для конкретного участка термической обработки и производства алюминиевых изделий (рис. 2) и получаемую экономию топлива.

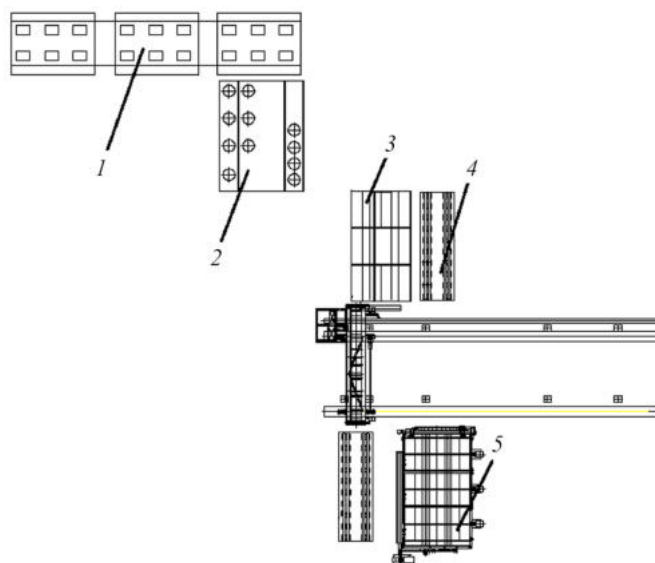


Рис. 2

Участок для термообработки и окраски (см. рис. 2) состоит из гомогенизационной печи 5 и камеры охлаждения 3. Участок окраски алюминиевых профилей включает моечную 1, окрасочную 2 и сушильную камеры, место для формирования садки 4. Мойка профилей осуществляется растворами, нагреваемыми горячей водой из котельной. Сушка проводится горячим воздухом, нагреваемым от продуктов сгорания природного газа. Таким образом, для данного участка термообработки и окраски возможна утилизация нагретого воздуха из гомогенизационной печи по следующим схемам:

- подача нагретого воздуха в качестве окислителя природного газа в гомогенизационную печь;
- нагрев воздухом моющих растворов в моечной камере;
- сушка профилей в сушильной камере;
- использование нагретого воздуха для воздушного отопления цеха.

Рассмотрим, как в случае использования каждой схемы снижается расход топлива при утилизации нагретого воздуха из гомогенизационной печи, и, соответственно, повышается энергоэффективность процесса термообработки. Экономический эффект при подаче горячего воздуха для сжигания совместно с топливом в гомогенизационной печи будет определяться как разница при сжигании с природным газом холодного и горячего воздуха. Экономия топлива при термической обработке 20000 кг алюминиевых слитков в час с нагревом их от начальной температуры 20 °С до конечной 550 °С составит 9,5 м³/ч. Экономический эффект от внедрения нагрева горячим воздухом растворов в моещей камере будет определяться сокращением расхода природного газа на нагрев воды в котельной. В результате применения данной схемы экономия топлива может составить 8,1 м³/ч. При использовании горячего воздуха для сушки профилей экономический эффект обуславливается снижением расхода газа на нагрев воздуха для сушки, так как горячий воздух можно непосредственно использовать как сушильный агент. При такой схеме утилизации воздуха экономия топлива может достигать 6 м³/ч. В результате применения горячего воздуха для отопления появляется возможность отказаться от традиционного водяного отопления, малоэффективного в производственных цехах. Экономия топлива при использовании данной схемы может достигать 5 м³/ч. Во всех схемах расход газа определялся из уравнения теплового баланса.

Как видим, при использовании любой схемы увеличивается энергоэффективность процесса термообработки за счет снижения расхода органического топлива. Необходимо лишь определить наиболее экономически эффективную схему сравнением чистого дисконтированного дохода. Кроме нахождения наиболее оптимальной схемы утилизации горячего воздуха – повышения энергоэффективности всего процесса термообработки – рассмотрим экономическую целесообразность использования камеры охлаждения в цикле термической обработки. Результаты изменения чистого дисконтированного дохода на горизонте расчета 10 лет при использовании камеры охлаждения в цикле термической обработки и использования нагретого воздуха для описанных схем его утилизации при норме дисконта $E = 0,12$ показаны на рис. 3.

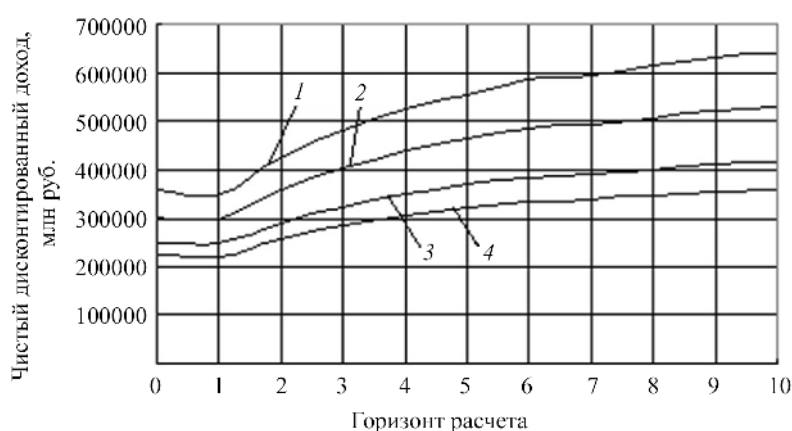


Рис. 3. Изменение чистого дисконтированного дохода по годам горизонта расчета:

1 – схема использования нагретого воздуха в гомогенизационной печи; 2 – схема использования нагретого воздуха в моечной камере; 3 – схема использования нагретого воздуха в сушильной камере; 4 – схема использования нагретого воздуха для воздушного отопления

Дисконтированный срок окупаемости $T_{ок}^д$ для схемы использования нагретого воздуха в гомогенизационной печи – 0,1 год, схемы использования нагретого воздуха в моечной камере – 0,16 года, схемы использования нагретого воздуха в сушильной камере – 0,15 года, схемы использования нагретого воздуха для воздушного отопления – 0,17 года.

Определение оптимального варианта использования нагретого воздуха основывается на максимальном уровне чистого дисконтированного дохода и минимальном сроке окупаемости. Из проанализированных схем в данной ситуации наиболее целесообразным решением является применение нагретого воздуха для подачи в горение гомогенизационной печи.

По результатам проведенного исследования установлено, что использование горячего воздуха в процессе гомогенизации алюминиевых слитков позволяет существенно снизить расход топлива на термическую обработку и повысить общую энергоэффективность данной технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будилов И.Н., Лукашук Ю.В., Лукашук С.Ю. Моделирование образования алюминиевого слитка в процессе полунепрерывного литья // Вестник УГАТУ. 2011. № 1 (41). С. 87–94.
2. Ефремов В.П. и др. Роль распределителей расплава в кристаллизаторе при полунепрерывном литье слитков алюминиевых сплавов // Технология легких сплавов. 2010. № 1. С. 44–50.
3. Вахромов Р.О. и др. Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства кованных полуфабрикатов из сплава 1933 // Фундаментальные исследования и последние достижения в области литья, деформации, термической обработки и защиты от коррозии алюминиевых сплавов: Сб. докл. конф., г. Москва, 9 окт. 2015. М.: ФГУП ВИАМ, 2015. С. 2–3.
4. Горшенин А.С. Совершенствование процесса охлаждения алюминиевых слитков воздухом на основе моделирования регулируемого конвективного теплообмена: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2013. 20 с.
5. Горшенин А.С. Математическое моделирование теплообмена при охлаждении ряда алюминиевых слитков воздухом // Вестник Самарского ун-та. 2012. № 2 (33). С. 179–182.
6. Горшенин А.С., Кривошеев В.Е. Математическая модель теплообмена в системе «охлаждающий воздух – алюминиевые слитки» в камере охлаждения конвективного типа после термической обработки // Промышленная энергетика. 2013. № 11. С. 20–22.
7. Горшенин А.С., Щелоков А.И. Исследование теплообмена при охлаждении алюминиевых слитков с постоянными режимными и конструктивными параметрами для повышения энергоэффективности // Промышленная энергетика. 2012. № 10. С. 23–25.
8. Горшенин А.С., Кривошеев В.Е. Математическое моделирование и исследование процесса термической обработки алюминиевых слитков на основе регулируемого конвективного теплообмена // Вестник Самарского ун-та. 2014. № 5-4 (47). С. 137–141.

Поступила в редколлегию 20.01.25

INCREASING OF ALUMINUM BILLETS HEAT TREATMENT PROCESS ENERGY EFFICIENCY

A.S. Gorshenin, N.P. Krasnova, and Yu.I. Rakhimova

This paper presents a mathematical model of heat exchange that occurs in the cooling system of aluminum ingots after their homogenization annealing. The developed model allowed us to study in detail the heat exchange processes in this chamber. To increase energy efficiency and reduce costs, various approaches to hot air generated during the cooling process utilization are proposed. An economic efficiency of each of the proposed methods assessment was also carried out.

Keywords: semi-continuous casting, aluminum alloys, homogenization annealing, mathematical model of heat transfer, energy efficiency, economic justification for cost reduction, recycling schemes.

Горшенин Андрей Сергеевич – канд. техн. наук (СамГТУ, Самара)

E-mail: andersonag1@yandex.ru

Краснова Наталья Петровна – ст. преподаватель (СамГТУ, Самара)

E-mail: krasnova-pt@yandex.ru

Рахимова Юлия Игоревна – канд. пед. наук (СамГТУ, Самара)

E-mail: juliyrahimova@yandex.ru

СИНТЕЗ ШЕСТИГРАННЫХ НАНОАЛМАЗОВ ПРИ КАТАЛИТИЧЕСКОМ УЧАСТИИ АТОМОВ ГЕРМАНИЯ В ГЕРМАНИЙ-АРГОНОВОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАЗМЕ

Б.А. Тимеркаев, А.А. Хуснутдинова, Б.Р. Шакиров

Изучена возможность синтеза наноалмазов в электродуговом разряде между графитовыми электродами. Проанализировано влияние атомов германия на зарождение и формирование наноалмазов. Установлено, что в аргоновом электродуговом разряде между графитовыми электродами с небольшой германий-графитовой добавкой зарождаются и формируются наноалмазы. Показано, что атомы германия играют роль зародыша алмазной структуры и служат катализаторами для формирования и роста кристаллов.

Ключевые слова: плазмохимия, германий, нанокристаллы германия, электрическая дуга, электродуговая плазма, плазмохимический синтез, наноалмазы.

Германиевые структуры превосходят по характеристикам углеродные аналоги, что привлекает значительное внимание исследовательского сообщества [1–3]. Например, в работе [1] методом сильной связи исследованы электронные, термоэлектрические и транспортные свойства германиевых нанотрубок, а также их потенциальные преимущества перед углеродными в термоэлектрических устройствах. Показано, что с ростом температуры электропроводность германиевых нанотрубок увеличивается быстрее, чем у углеродных. В работе [2] с помощью теории функционала плотности изучены структурные, механические и электронные свойства креслообразных и зигзагообразных германиевых нанотрубок. Здесь также продемонстрирована потенциальная возможность их применения в наноразмерных устройствах. Оптические свойства германиевых нанотрубок изучены в работе [3], где было показано, что приложение магнитного поля вызывает зеемановское расщепление энергетических уровней, нарушая вырождение зон. Магнитное поле влияет на количество, положение и высоту оптических пиков и, таким образом, позволяет эффективно управлять нелинейной оптической реакцией.

Что касается методов синтеза германиевых наноструктур, преимущественно используются методы электроосаждения из ионной жидкости или химического осаждения из газовой фазы в сочетании с электроосаждением металла, метод молекулярно-лучевой эпитаксии с использованием золотой поверхности. Германиевые нанотрубки могут быть получены прокатыванием германиевого листа в разных направлениях.

Для синтеза различных наноструктур в последнее время все чаще применяют электродуговые разряды [4, 5]. В работе [4] выращены нанопроволоки и другие наноструктуры оксида меди с помощью дугового разряда переменного тока, причем процесс синтеза позволял контролировать размеры наноструктур. В работе отмечена быстрота процесса синтеза. В работе [5] описана оригинальная методика синтеза германиевых наноструктур в аргоновой плазме электродугового разряда. Плазмохимический синтез германиевых нанотрубок длиной до 100 мкм и диаметром до 1 мкм осуществляется подбором силы электрического тока, давления буферного газа и межэлектродного расстояния. Отдельные нанотрубки достигают длины в несколько миллиметров. В отличие от германиевых нанотрубок, выращенных методом химического осаждения из газовой фазы, синтезированные в данной работе германиевые нанотрубки имеют четкую форму и размеры. Они отделены друг от друга и легко поддаются манипулированию. Показано, что данная методика позволяет выращивать как германиевые нанотрубки, так и германен.

Также исследуются каталитические свойства германия при синтезе углеродных наноструктур. В работах [6, 7] проведен синтез углеродных нанотрубок и наноалмазов в аргоновой электродуговой плазме, катализатором синтеза нанотрубок и наноалмазов являлись атомы германия. В экспериментах германий запрессовывался в графитовый анод и постепенно переходил в парообразное состояние в дуговом разряде. Пары германия и углерода осаждались на различных участках графитового анода. Морфо-

логия синтезированного материала соответствует углеродным нанотрубкам с диаметрами 7...20 нм, наноалмазам с размерами 7–12 нм и наноалмазам с размерами 150–350 нм. Разновидностью обычных наноалмазов и нанотрубок являются стержневидные наноалмазы с гексагональным поперечным сечением размерами 250 нм и длиной 7 мкм. В работе [8] в углеродогерманиевой плазме в аргоне осуществлен синтез нано- и микроалмазов. Испарение атомов германия и углерода осуществлялось с поверхности графитового стержня с вкраплениями германия, являющегося анодом для дугового разряда. Размеры микроалмазов составляли от 500 нм до 5 мкм.

В работе [9] описана методика синтеза микроалмазов, германиевых наночастиц и нанотрубок в аргон-германиевой дуге. Испарение атомов германия осуществлялось с поверхности графитового стержня, служившего анодом дугового разряда. Синтез микроалмазов наблюдался на графитовых подложках вблизи анода, рядом также обнаружены германиевые нанотрубки и германиевые наночастицы. Установлено, что германий способствует синтезу нано- и микроалмазов. Синтезированные алмазы имеют классическую структуру с гранями прямоугольника и четырьмя шестиугольниками, примыкающими к ребрам этого прямоугольника. Размеры микроалмазов достигают десятков микрометров. Диаметры германиевых нанотрубок составляют 50–100 нм, длина – 10 мкм.

В настоящее время для решения задач плазменного синтеза применяются различные типы газовых разрядов [5, 7, 10–18]. При этом применение дуговой плазмы при высоких давлениях актуально с точки зрения простоты и низкой стоимости конструктивного оформления плазменных установок и возможности получения нанокристаллов из различных элементов. С помощью электродуговой плазмы уже были синтезированы нано- и микроалмазы, кристаллы кремния, германиевые нанотрубки и наночастицы и др. [5, 7, 11, 15–18].

Таким образом, в электрической дуге можно осуществить быстрый синтез нанотрубок, наноалмазов и алмазов микроскопических размеров. Преимущество применения плазменных нанотехнологий в сравнении с другими способами синтеза наноструктур прежде всего обосновывается тем, что в дуговом разряде именно электрод может являться источником атомов для синтеза наноструктур. Однако существуют определенные условия: во-первых, токи разряда должны быть умеренными, чтобы не допустить капельные формы отрыва материала электрода; во-вторых, желательно, чтобы оба электрода имели один и тот же материал, поскольку в дуговом разряде испаряются и материал катода, и материал анода; в-третьих, должно быть подобрано соответствующее давление рабочего газа, при котором в разряде обеспечиваются необходимые и объемность разряда, и градиентность температуры. От этого будет зависеть морфология синтезируемых нанобъектов. Необходимо также точно знать область пространства, где возможно образование и рост тех или иных наноструктур, поэтому в зависимости от синтезируемого материала подбирают соответствующие режимы дугового разряда и область предположительной дислокации тех или иных наноструктур. Морфология наноструктур в основном определяется оптимальным сочетанием силы тока разряда, давления газа, межэлектродного расстояния, места расположения и материала подложки.

В работах [19, 20] рассматривалась роль атомов германия в зарождении и синтезе наноалмазов. Более того, германий может служить центром, структурообразующим атомом, вокруг которого начинает формироваться sp^3 -структура алмаза. Однако роль германия только этим не ограничивается. В работе [20] было показано, что германий может участвовать и в дальнейшем росте наноалмазов. В этом случае атомы германия вблизи кристалла алмаза создают особое поле, которое способствует формированию sp^3 -связей атомов углерода. Задачей настоящей работы является создание соответствующих условий для роста наноалмазов. В электродуговой аргонуглеродогерманиевой плазме уже были синтезированы два типа алмаза – в виде четырехгранных бипирамид и некоторого подобия додекаэдра. Присутствие атомов германия стимулирует образование разных видов наноалмазов. Если германий оказывает каталитическое влияние на синтез наноалмазов и с помощью плазмохимических технологий удастся синтезировать два вида наноалмазов, то возможно реализовать и другие варианты синтеза sp^3 -структур углерода. Важно найти условия, при которых это может быть реализовано.

Плазмохимический реактор для синтеза наноалмазов состоит из вакуумной камеры, систем электрического питания с возможностью изменения тока в диапазоне 10...300 А, вакуумирования, газоснабжения, а также измерительных приборов. Водоохлаждаемая цилиндрическая вакуумная камера имеет токовводы, патрубки с вентилями для газоснабжения и вакуумирования, устройства для крепления и осевого перемещения электродов. Для визуального контроля процесса синтеза наноструктур в вакуумной камере предусмотрены круглые двухслойные двери со смотровыми окнами. Для прогнозирования распределения температурных полей в плазмохимическом реакторе и создания условий, необходимых для синтеза нанокристаллов германия, были проведены предварительные численные эксперименты в рамках единой с точки зрения описания газоразрядного промежутка и электродов модели [21–23].

В качестве электродов в работе был использован графит цилиндрической формы диаметром 18 мм. В центральной части поверхности анода было проделано отверстие, в которое помещали каплевидный германий, который приблизительно на 1 мм выступал с поверхности графита. В качестве катода также был использован графит, торец которого был заострен. Электроды были установлены вертикально. Во время экспериментов можно было управлять положением обоих электродов.

Перед экспериментом вакуумная камера была заполнена аргоном до давления 55 кПа. Дугу зажигали непосредственным замыканием и размыканием контакта между электродами. Была проведена серия экспериментов с различными значениями разрядного тока (от 50 до 100 А). Дугу поддерживали порядка 10 с. При длительном горении дуги уже образовавшиеся наноструктуры на поверхности катода стали испаряться. Наиболее интересные результаты получились при токе 50 А и напряжении 20 В.

В ходе эксперимента можно было наблюдать за ростом наноструктур на поверхности катода.

Синтезированные образцы на лицевой поверхности катода были исследованы с помощью электронного микроскопа. Приведем электронно-микроскопические снимки наночастиц в системе электродов графит – германий в графитовой оправе.

На рис. 1 представлен образец, отложенный на участке катода рядом с германиевой вставкой размерами приблизительно 4 мм² (увеличение в 50 раз). Далее представлены отдельные участки данного образца.

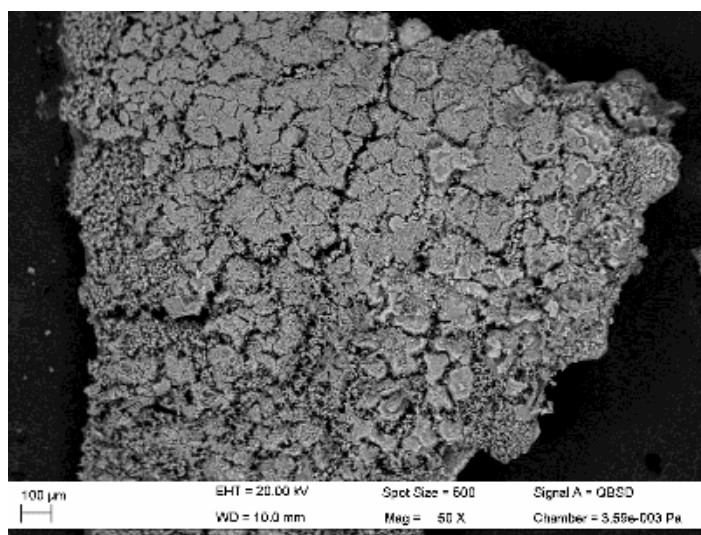


Рис. 1

При увеличении отдельного фрагмента образца в 1000 раз (рис. 2) начинает проявляться дискретность поверхности, но разобрать морфологию отдельных частиц практически еще невозможно. С левой и с правой стороны наблюдаются более крупные углеродные образования, строение которых пока не удалось идентифицировать с известными структурами.

Продemonстрируем участки (при увеличении 5000) раз с точечными размерами 300 нм (рис. 3) и 200 нм (рис. 4).

На рис. 5 указаны размеры сторон шестигранных призм, которые можно идентифицировать как наноалмазы (увеличение в 20000 раз).

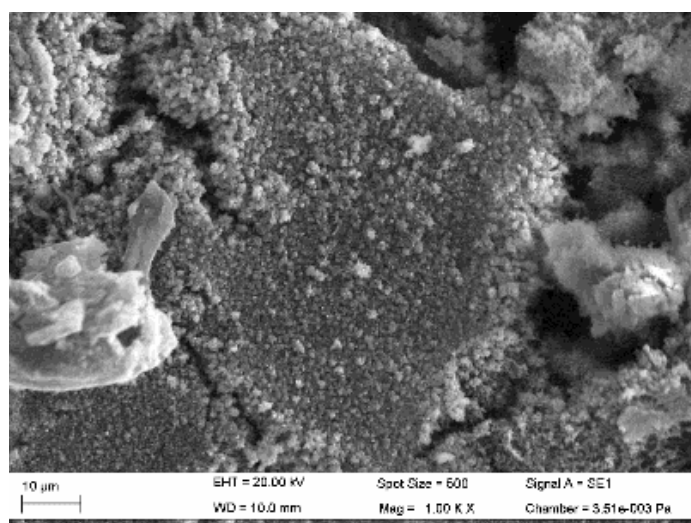


Рис. 2

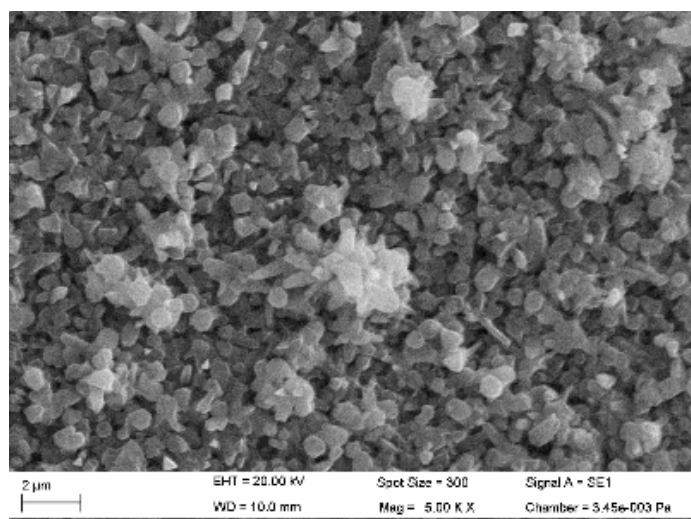


Рис. 3

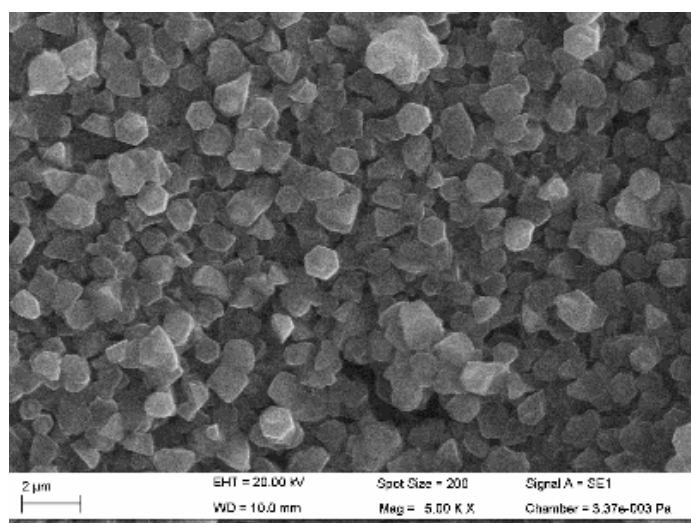


Рис. 4

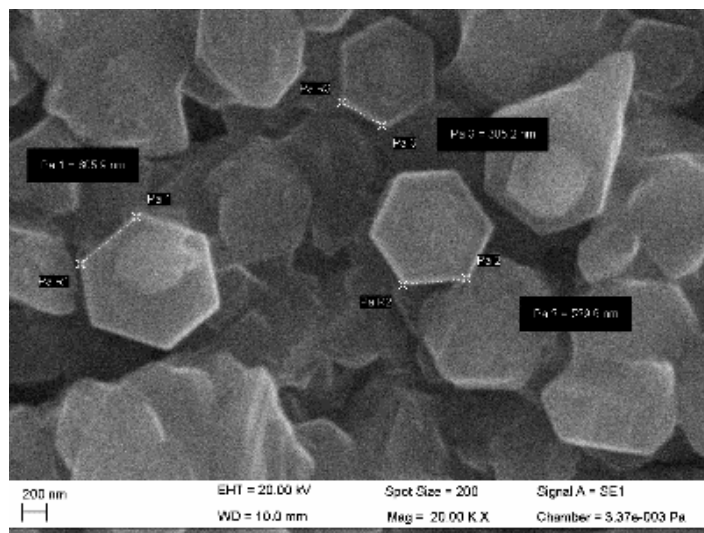


Рис. 5

Таким образом, в данном эксперименте получены наноалмазы с поперечными размерами 0,6–1 мкм. По рис. 3–5 можно установить морфологию синтезированных наноалмазов. Из рис. 3, 4 следует, что наноструктуры представляют собой шестигранные призмы. Боковые грани представляют собой прямоугольники. Некоторое подобие полученным наноалмазам было продемонстрировано в работе [18], где выращенные наноалмазы имели два вида морфологии: одни соответствовали классической правильной морфологии в виде граненого шара с шестью квадратными гранями и двенадцатью правильными шестигранниками, а другие наноалмазы также имели восемнадцать граней, но грани представляли собой прямоугольники и неправильные шестигранники. Таким образом, в работе [18] было показано, что в электродуговой плазме может быть осуществлен синтез различных видов наноалмазов при наличии германиевых катализаторов. Результаты настоящей работы подтверждают выводы работы [18]: благодаря германиевому катализатору в зависимости от условий эксперимента возможно создание нано- и микроалмазов различных видов.

Таким образом, в данной работе осуществлен плазмохимический синтез нано- и микроалмазов в виде шестигранных призм диаметрами 0,6–1 мкм и высотами 0,1–1 мкм. Морфология полученных наноструктур отличается от ранее синтезированных нано- и микроалмазов. Главная причина, из-за которой полученные наноструктуры отличаются от ранее синтезированных, – интенсивность потока атомарного углерода, которая не позволяет завершить процесс формирования наноструктур.

Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках соглашения № 075-03-2025-335 от 16.01.2025 (шифр FZSU-2023-0004) между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и КНИТУ-КАИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Somayeh Behzad. Comparative Study of Electronic, Thermoelectric, and Transport Properties in Germanene and Carbon Nanotubes // *Materials Science and Engineering: B*. 2025. Vol. 311. Article № 117826.
2. Laranjeira J.A.S., Denis P.A., Sambrano J.R. Structural, Mechanical, and Electronic Properties of Armchair and Zigzag Germanene Nanotubes // *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*. 2024. Vol. 158. Article № 115896.
3. Raad Chegel. Magnetic Field-Engineered Optical Nonlinearity in Germanene Nanotubes // *Journal of Optics*. 2024. Vol. 26. № 12. Article № 125501.
4. Bassma H. Elwakil, M. Toderas, Mostafa El-Khatib. Arc Discharge Rapid Synthesis of Engineered Copper Oxides Nano Shapes with Potent Antibacterial Activity Against Multi-Drug Resistant Bacteria // *Scientific Reports*. 2022. № 12. Article № 20209.
5. Тимеркаев Б. А. и др. Синтез германиевых нанотрубок в электродуговой плазме // *Журнал физической химии*. 2020. № 3. С. 448–452.
6. Timerkaev B.A. et al. Germanium Catalyst for Synthesis of Carbon Nanotubes and Nanodiamonds in Carbon-argon Plasma // *High Energy Chemistry*. 2024. Vol. 58. Suppl. 3. P. S455–S460.

7. Timerkaev B.A. et al. Synthesis of Nanodiamonds in Argon ARC from Carbon Vapor // High Energy Chemistry. 2024. Vol. 58. Suppl. 3. P. S446–S450.
8. Timerkaev B.A. et al. The Role of Germanium in the Plasma Chemical Synthesis of Nano and Micro-Diamonds // High Energy Chemistry. 2024. Vol. 58. Suppl. 3. P. S461–S463.
9. Timerkaev B.A. et al. Synthesis of Microdiamonds and Germanium Nanotubes in the Argon-Germanium Arc // Journal of Physics: Conference Series. 2022. № 2270. Article № 012030.
10. Kumar A. et al. Formation of Nanodiamonds at Near-Ambient Conditions Via Microplasma Dissociation of Ethanol Vapor // Nature Communications. 2013. Vol. 4. Article № 2618.
11. Тимеркаев Б.А. и др. Германиевый катализатор для плазмохимического синтеза алмазов // Химия высоких энергий. 2019. № 5. С. 390–395.
12. Chen H.N. et al. Direct Synthesis of Nanodiamonds by Femtosecond Laser Irradiation of Ethanol // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. Article № 33966.
13. Vekselman V., Raites Y., Shneider M.N. Growth of Nanoparticles in Dynamic Plasma // Physical Review E. 2019. Vol. 99. № 6. Article № 063205.
14. Лебедев Ю.А. и др. Микроволновый разряд в жидких углеводородах: исследование жидкого углеводорода после создания в нем разряда // Химия высоких энергий. 2018. № 4. С. 306–311.
15. Тимеркаев Б.А., Шакиров Б.Р., Тимеркаева Д.Б. Создание кремниевых наноструктур в электродуговом разряде // Химия высоких энергий. 2019. № 2. С. 155–160.
16. Galiev A.N. et al. Plasma Chemical Synthesis of Nanodiamonds and Diamond-like Nanofilms // High Energy Chemistry. 2024. Vol. 58. Suppl. 3. P. S313–S315.
17. Timerkaev B.A., Andreeva N.G., Drobyshch S.V. Plasmochemical Synthesis of Silicon-Carbon Nanotubes // High Energy Chemistry. 2024. Vol. 58. Suppl. 3. P. S464–S466.
18. Timerkaev B.A. et al. The Role of Germanium in the Plasma Chemical Synthesis of Nano and Micro-Diamonds // High Energy Chemistry. 2024. Vol. 58. Suppl. 3. P. S461–S463.
19. Timerkaev B.A. et al. Germanium Catalyst for Synthesis of Carbon Nanotubes and Nanodiamonds in Carbon-Argon Plasma // High Energy Chemistry. 2024. Vol. 58. Suppl. 3. P. S455–S460.
20. Palyanov Yu.N. et al. Germanium: A New Catalyst for Diamond Synthesis and a New Optically Active Impurity in Diamond // Scientific Reports. 2015. Vol. 5. Article № 14789.
21. Сайфутдинов А.И., Тимеркаев Б.А., Сайфутдинова А.А. Особенности переходных процессов в микро-разрядах постоянного тока в молекулярных газах: от тлеющего разряда к дуговому разряду с несвободным или свободным в режиме катода // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2020. № 7-8 (10). С. 443–450.
22. Saifutdinov A.I. Unified Simulation of Different Modes in Atmospheric Pressure DC Discharges in Nitrogen // Journal of Applied Physics. 2021. Vol. 129. Article № 093302.
23. Saifutdinov A., Timerkaev B. Modeling and Comparative Analysis of Atmospheric Pressure Anodic Carbon Arc Discharge in Argon and Helium—Producing Carbon Nanostructures // Nanomaterials. 2023. № 13 (13). Article № 1966.

Поступила в редколлегию 13.03.25

SYNTHESIS OF HEXAGONAL NANO-DIAMONDS WITH CATALYTIC PARTICIPATION OF GERMANIUM ATOMS IN GERMANIUM-ARGON ELECTRIC ARC PLASMA

B.A. Timerkaev, A.A. Khusnutdinova, and B.R. Shakirov

The possibility of synthesizing nanodiamonds in an electric arc discharge between graphite electrodes has been studied. The influence of germanium atoms on the nucleation and formation of nanodiamonds has been analyzed. It has been established that nanodiamonds are nucleated and formed in an argon electric arc discharge between graphite electrodes with a small germanium-graphite additive. It has been shown that germanium atoms play the role of a diamond structure nucleus and serve as catalysts for the formation and growth of crystals.

Keywords: plasma chemistry, germanium, germanium nanocrystals, electric arc, electric arc plasma, plasma chemical synthesis, nanodiamonds.

Тимеркаев Борис Ахунович – д-р физ.-мат. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: btimerkaev@gmail.com

Хуснутдинова Алсу Азатовна – магистрант (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: alsukhusnut@gmail.com

Шакиров Булат Рузалевич – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: bulatshoker2000@gmail.com

ФАЗОВОЕ РАВНОВЕСИЕ БИНАРНОЙ СМЕСИ ДИОКСИД УГЛЕРОДА + Н-ТЕТРАДЕКАН

И.Ш. Хабриев, В.Ф. Хайрутдинов, Т.Р. Ахметзянов,
И.М. Абдулагатов, И.З. Салихов, Р.Р. Кабиров

Приведены новые экспериментальные данные исследования свойств фазового равновесия газ – жидкость в бинарной системе диоксид углерода – н-тетрадекан на трех выбранных изотермах (313,15; 333,15; 353,15 К) в диапазоне давлений 3,8...19 МПа. Измерения проводились с использованием оптической ячейки, работающей при высоких температурах и давлениях. Измеренные данные фазового равновесия газ – жидкость в бинарной системе диоксид углерода – н-тетрадекан использовались для определения критических данных кривой $P_k - T_k$.

Ключевые слова: фазовое равновесие, растворимость, сверхкритический диоксид углерода, н-тетрадекан.

Асфальтосмолопарафиновые отложения представляют собой сложную углеводородную смесь, включающую асфальтены, смолы, парафины, масла, серу, металлы, растворы солей органических кислот, комплексные соединения, коллоидно-диспергированные минеральные вещества, а также воду и механические примеси. Повышение эффективности экстракционного процесса для достижения максимального выхода углеводородов и очистки устья нефтяных скважин от асфальтосмолопарафиновых отложений в значительной степени зависит и определяется изученностью характеристик фазового равновесия систем «извлекаемая компонента (парафин) – экстрагент».

Как следствие, необходимы исследования часто отсутствующих данных о фазовых равновесиях бинарных систем, включающих основные компоненты асфальтосмолопарафиновых отложений и потенциальные рабочие среды процесса сверхкритической флюидной экстракции тех же компонентов.

Знание критических свойств смесей имеет большое значение как для теоретических, так и для практических целей. Одной из основных проблем при разработке применимого качественного прогноза поведения сверхкритической жидкой фазы является отсутствие надежных экспериментальных данных о критических свойствах. По критическим свойствам смесей возможно получить дополнительную информацию о местоположении и границе двухфазной области. Термодинамические методы, основанные на принципе соответствующих состояний, требуют определения свойств компонентов и критических уровней смеси. Очевидно, что точность термодинамических свойств, прогнозируемых с помощью этих методов, зависит от точности данных о критических свойствах. Знание критических свойств также важно для прогнозирования фазового поведения смесей. Критическая точка – ключевой параметр при построении фазовых диаграмм, поскольку она является верхней границей области пар – жидкость. Расположение критических точек является границей между областями гомогенного и гетерогенного фазового поведения на фазовых диаграммах смесей. Количество данных о критических свойствах бинарной смеси CO_2 + н-тетрадекан очень ограничено. Данные о критических свойствах смесей CO_2 + н-алкан (вплоть до C_{10}) были измерены несколькими авторами [1].

Существует очень мало данных о критических свойствах смесей CO_2 + н-алканов с $n > 10$ [2–4]. Данные о критической кривой CO_2 + н-тетрадекан приведены в работах [5–8]: $T_k = 343,3$ К; $P_k = 16,5$ МПа; $x = 0,944$ – мольная доля CO_2 [7], $T_k = 344,3$ К; $P_k = 16,4$ МПа; $x = 0,924$ – мольная доля CO_2 [8]. Были получены отдельные данные для смеси CO_2 + н-тетрадекан по измеренным данным фазового равновесия жидкость – пар. Изменения формы критических кривых CO_2 + н-алкан в проекции на число атомов углерода в молекуле н-алкана были проиллюстрированы в работе [1]. Как было показано [1], с увеличением количества углерода в молекуле н-алкана форма критической линии CO_2 + н-алкан систематически меняется, с увеличением углеродного числа в н-алкане она смещается в сторону более высоких давлений. Несмотря на то что ряд гомологов CO_2 + н-алкан изучен достаточно полно, в литературе отсутствует

важная экспериментальная информация, касающаяся особенностей фазового равновесия газ – жидкость (VLE) и поведения критической кривой.

В настоящей работе представлены новые данные о VLE и критических свойствах смеси CO_2 + н-тетрадекан. Данные получены в диапазоне температур 313,15...353,15 К и давлений 3,8...19 МПа.

В настоящей работе использовались образцы CO_2 и н-тетрадекана («ТехГазСервис», Казань; ООО «РЕАХИМ», Москва). Описание образцов приведено в табл. 1. Химикаты использовались без дополнительной очистки.

Таблица 1

Химическое название	CASRN	Чистота	Поставщик
Диоксид углерода	124-38-9	Больше или равна 0,9950	«ТехГазСервис»Казань
н-тетрадекан	629-59-4	Больше или равна 0,9900	ООО «РЕАХИМ», Москва

Принципиальная схема и общий вид экспериментальной установки [9–13], предназначенной для исследования фазового равновесия жидкость – пар бинарных систем с использованием оптической ячейки высокого давления приведена на рис. 1. Здесь: 1 – баллон с диоксидом углерода; 2 – фильтр-осушитель; 3 – насос высокого давления; 4 – оптическая ячейка высокого давления; 5 – медная рубашка; 6 – термоизоляция; 7 – вентиль для отбора пробы из верхней (газовой) фазы; 8 – вентиль для отбора пробы из нижней (жидкой) фазы; 9 – пробоотборник; 10 – термостатируемая ванна; 11 – вентиль; 12 – сапфировое окно; 13 – крышка ячейки; 14 – уплотнительное кольцо (резина с полиимидным покрытием); 15 – корпус оптической ячейки.

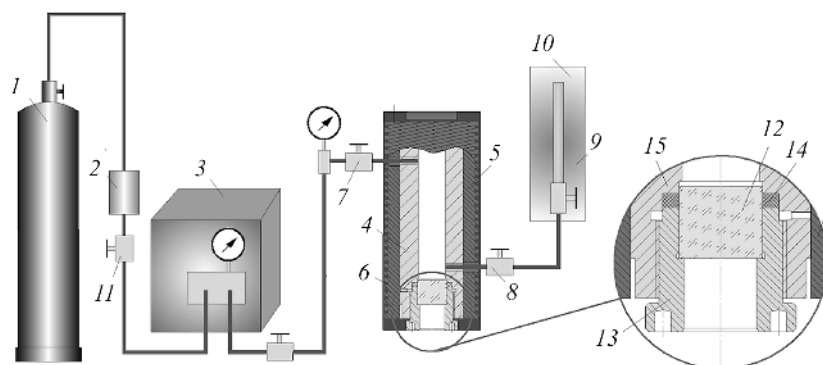


Рис. 1

Измерения проводились с использованием оптической ячейки высокого давления. Метод основан на гравиметрическом анализе проб жидкой и паровой фаз, отобранных из оптической кюветы в равновесных условиях. Экспериментальная установка состоит из следующих узлов: узел подачи компонента, блок контроля температуры, узел создания, регулирования и измерения давления, оптическая ячейка высокого давления, вакуумная система, механизм перемешивания, система отбора проб, аналитическая часть.

Основной частью установки является оптическая ячейка высокого давления (см. рис. 1). Корпус изготовлен из нержавеющей стали. Сапфировые окошки со стальными фланцами позволяют работать до 50 МПа при температурах до 473 К. Оптическая ячейка состоит из сапфировых окон, установленных между крышкой и корпусом аппарата из нержавеющей стали. На рис. 1 показаны детали установки сапфирового окна. Рабочий объем оптической ячейки – 117 см³.

Медная рубашка использовалась для плавного регулирования температуры и равномерного нагрева измерительной ячейки. Температуру ячейки измеряли с помощью хромель-алюмелевых термопар, предварительно откалиброванных эталонным платиновым термометром сопротивления (ПРТ-10). Абсолютная стандартная неопределенность измерения температуры составляет 7,5 мК. Давление в оптической ячейке высокого давления создавалось с помощью насоса TharTechnology (Supercritical-24). Для измерения давления в оптической ячейке использовали грузопоршневой манометр. Относительная стандартная неопределенность измерений давления составляет 0,05 %.

Пробоотборник, выдерживаемый в термостатируемой ванне, использовался для отбора проб из жидкой и паровой фаз. Отбор проб осуществлялся соединением пробоотборника и оптической ячейки через полуоборотный шаровой кран, что облегчает быстрый отбор проб. Во избежание возможного удаления тяжелого компонента из паровой фазы при его выпуске из пробоотборника на выпускной клапан пробоотборника была установлена ловушка для частиц (фильтр).

В ходе эксперимента одна треть оптической ячейки заполнялась н-тетрадеканом через открытое сапфировое окно. Затем всю систему вакуумировали с помощью вакуумного насоса. Далее оптическую ячейку нагревали до заданной температуры и подавали в нее насосом высокого давления диоксид углерода до достижения необходимого давления. Перед выполнением анализа состава требуется исследование фазового равновесия для определения состояния равновесия. Для достижения равновесных условий в двухфазной (жидкость + газ) системе образцы интенсивно перемешивали в течение 30–40 мин.

После достижения равновесного состояния в оптической ячейке перемешивание образца прекращали. После полного разделения фаз (не менее чем через 30–40 мин после прекращения перемешивания) проводили отбор проб каждой фазы при постоянных значениях T и P . Затем оптическую кювету устанавливали в вертикальном положении и выдерживали в течение 40 мин. Для отбора проб использовался пробоотборник относительно большого объема (4,1 см³) с целью уменьшения экспериментальной неопределенности в определении составов. Гравиметрическим методом анализировали пробы жидкой и паровой фаз, отобранные из оптической ячейки.

Фазовые составы определяли по следующей методике. Перед отбором проб пустой пробоотборник взвешивали на электронных весах Vibra с погрешностью 10^{-4} г. Образец, извлеченный в пробоотборнике, представляет собой смесь диоксида углерода в качестве растворителя и растворенное вещество. Массу разделяемого диоксида углерода в пробоотборнике определяли как разницу между полным и пустым пробоотборником. Аналогично рассчитывали массу растворенного вещества как разницу между массой вещества, оставшегося после полного выпуска паровой фазы, и пустым пробоотборником. Массовые доли растворенного вещества в жидкой или паровой фазах могут быть получены следующим образом:

$$y = \frac{\frac{m_{\text{рас.вещ}}}{M_{\text{рас.вещ}}}}{\frac{m_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}_2}} + \frac{m_{\text{рас.вещ}}}{M_{\text{рас.вещ}}}},$$

где $m_{\text{рас.вещ}}$ – масса растворенного вещества; $M_{\text{рас.вещ}}$ – молярная масса растворенного вещества; m_{CO_2} – масса диоксида углерода; M_{CO_2} – молярная масса диоксида углерода.

Процедуру разделения извлеченного образца на газообразные (диоксид углерода) и твердые или жидкие (н-тетрадекан) компоненты в зависимости от температуры разделения проводили при охлаждении пробоотборника до 294 К (при комнатной температуре). При этой температуре н-тетрадекан, предварительно растворенный в сверхкритическом CO₂, выпадает в осадок в тяжелую (конденсируемую) жидкую фазу (температура плавления н-тетрадекана $T_{\text{пл}} = 278,95$ К), а легкая (неконденсирующаяся) фаза CO₂ полностью отделяется от жидкой фазы (н-тетрадекана). Экспериментально установлено, что наиболее оптимальной температурой для разделения газовой фазы CO₂ и жидкого н-тетрадекана является температура 294 К. Во избежание возможного удаления н-тетрадекана из паровой фазы при его выпуске из пробоотборника на выпускной клапан пробоотборника была установлена ловушка для частиц [14]. Таким образом, было сделано предположение, что паровая фракция, удаляемая из экстрагированного образца, не содержит н-тетрадекан, что было дополнительно проверено хроматографическими анализами жидкой и паровой фаз. Разница значений, полученных при использовании двух методов, находится в пределах экспериментальной неопределенности. В связи с этим для настоящего метода хроматографический анализ составов образцов не требовался, в то время как масса пара определялась напрямую. Хроматографический анализ использовали в данной работе только для проверки гравиметрического

анализа, определяя наличие следов каждого компонента в разделенных образцах CO_2 и н-тетрадекана. Согласно заявляемому способу отбор проб из газовой и жидкой фаз производят отдельно. После быстрого отбора проб из любой фазы (газовой или жидкой с помощью разных клапанов) при заданных T и P значения фазового равновесного состава и давления смещаются. Следовательно, с помощью настоящего способа следующий отбор проб из другой фазы при тех же T -, P -условиях становится невозможным. Следующий отбор проб производился после энергичного перемешивания образца в течение 30–40 мин с использованием качательного механизма и достижения равновесного состояния при других экспериментальных T -, P -условиях. Через некоторое время (примерно 30–40 мин) значение давления выходит на плато, перемешивание прекращается для полного достижения равновесия между фазами. После достижения равновесия из паровой или жидкой фаз берут небольшие пробы и анализируют их состав. Для удобства анализ фаз (жидкой или газовой) проводился отдельно при разных T -, P -условиях.

Измеренные данные изотермического фазового равновесия VLE ($PTxy$) для бинарной смеси CO_2 + н-тетрадекан с использованием описанного метода для трех изотерм (313,15; 333,15; 353,15 K) представлены в табл. 2. Измерения проводились при давлении до 19 МПа. Согласно полученному результату (см. табл. 2) содержание н-тетрадекана в паровой фазе незначительное.

Таблица 2

Давление P , МПа	Мольная доля CO_2	Мольная доля н-тетрадекана
$T = 313,15$ К (жидкая фаза)		
4,30	0,4058	0,5942
5,53	0,5172	0,4828
6,89	0,6227	0,3773
8,40	0,7562	0,2438
9,79	0,8442	0,1558
10,45	0,8761	0,1239
10,53	0,9692	0,0308
$T = 313,15$ К (газовая фаза)		
3,82	0,9972	0,0028
4,98	0,9975	0,0025
6,39	0,9982	0,0018
8,05	0,9979	0,0021
9,49	0,9856	0,0144
10,51	0,9702	0,0298
10,52	0,9739	0,0261
$T = 333,15$ К (жидкая фаза)		
4,70	0,3882	0,6118
6,41	0,4950	0,5050
7,78	0,5709	0,4291
9,50	0,6670	0,3330
11,02	0,7445	0,2555
12,27	0,7911	0,2089
14,05	0,8633	0,1367
15,17	0,9443	0,0557
$T = 333,15$ К (газовая фаза)		
4,48	0,9962	0,0038
5,95	0,9967	0,0033
7,28	0,9975	0,0025
8,86	0,9981	0,0019
10,51	0,9974	0,0026
11,98	0,9939	0,0061
13,48	0,9858	0,0142
13,52	0,9854	0,0146
14,99	0,9616	0,0384
15,15	0,9552	0,0448

$T = 353,15 \text{ K}$ (жидкая фаза)		
4,59	0,3321	0,6679
5,84	0,4007	0,5993
7,22	0,4696	0,5304
8,89	0,5484	0,4516
10,38	0,6197	0,3803
11,96	0,6823	0,3177
13,27	0,7289	0,2711
14,83	0,7788	0,2212
16,21	0,8187	0,1813
18,09	0,8890	0,1110
18,71	0,9452	0,0548
$T = 353,15 \text{ K}$ (газовая фаза)		
3,91	0,9947	0,0053
5,05	0,9954	0,0046
6,45	0,9965	0,0035
8,03	0,9973	0,0027
9,67	0,9984	0,0016
11,32	0,9979	0,0021
12,86	0,9971	0,0029
14,48	0,9946	0,0054
16,22	0,9878	0,0122
17,79	0,9739	0,0261
18,01	0,9729	0,0271

На рис. 2 показаны результаты исследования фазового равновесия системы CO_2 + н-тетрадекан в проекции PTx . Эксперименты проведены на трех изотермах и при давлении до 19 МПа. На рис. 2 светлыми символами обозначена концентрация CO_2 в газовой фазе; темными – концентрация CO_2 в жидкой фазе. Пунктирные кривые – интерполированные значения.

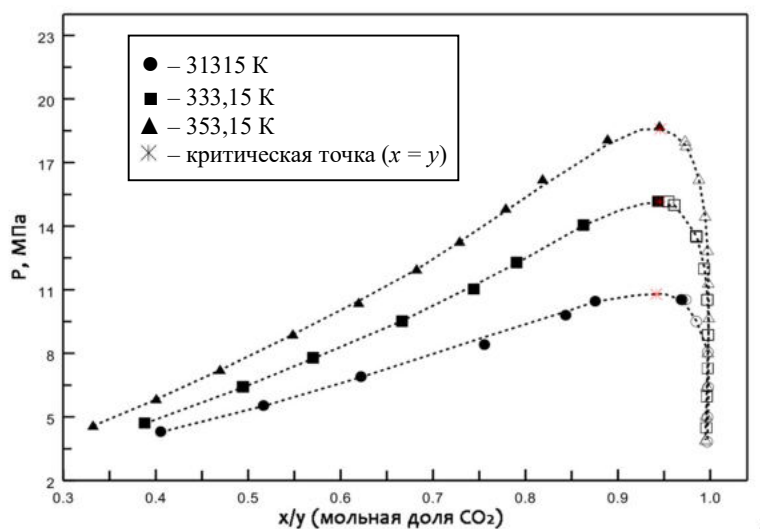


Рис. 2

На рис. 3 представлено графическое сравнение текущей изобарной концентрации жидкой фазы (фазовая диаграмма $T-x$) смеси CO_2 + н-тетрадекан в зависимости от температуры для двух выбранных давлений (4,96 и 6,00 МПа) с литературными данными [15–18].

Как видно из рис. 3, данные из настоящей работы и литературные данные VLE [15–18] хорошо согласуются (отклонения в пределах 2–3 % для концентрации). Измеренные изотермические данные VLE (PTx) (см. табл. 2) были использованы для оценки значений критических параметров смеси CO_2 + н-тетрадекан.

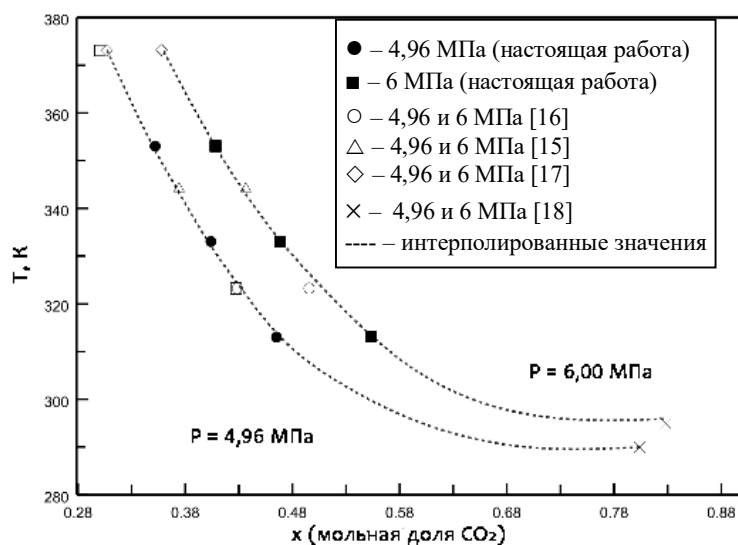


Рис. 3

На рис. 4 показано графическое сравнение настоящих измеренных изобарических данных T - x с данными [7] при высоких давлениях (11,07; 15,17 МПа).

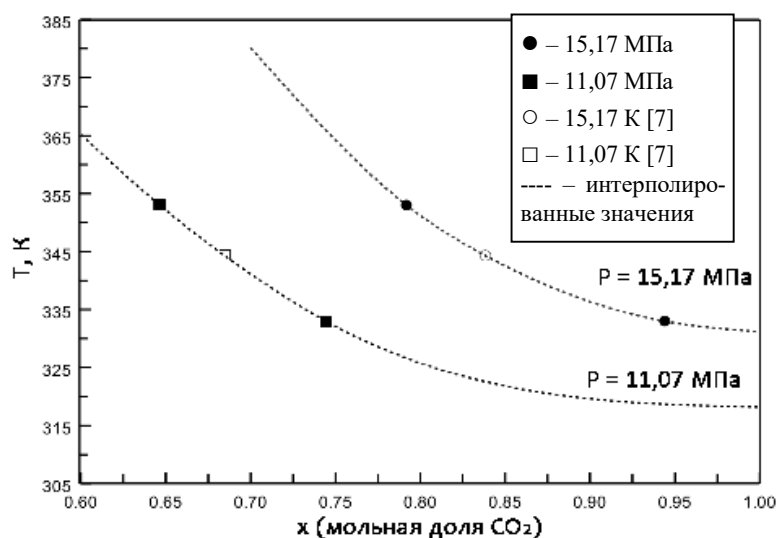


Рис. 4

Как видим (см. рис. 4), согласованность между обоими наборами данных хорошая. Совпадение интерполированных значений концентраций CO_2 в жидкости составляет около 1–2 %.

Текущие данные измерения P - x -изотерм при выбранной температуре 353,15 К, а также данные VLE представлены на рис. 5 [7]. Также демонстрируется термодинамическая согласованность обоих наборов данных.

В проекции P - x - y (при постоянной температуре (см. рис. 2)) максимальное давление на изотермической кривой VLE, при котором состав жидкой x и газовой y фаз одинаков, т. е. $x = y$, является критической точкой смеси. Другими словами, давление, при котором пересекаются жидкая (рис. 2, темные символы) и газовая ветви изотермической кривой VLE (P - x) (где жидкая и газовая фазы становятся идентичными), является критическим давлением. При превышении критического давления для каждой изотермы получаем сверхкритическое состояние смеси. Получены следующие значения критических параметров для смеси CO_2 + н-тетрадекан: $T_k = 313$ К, $P_k = 10,39 \pm 0,03$ МПа, $x = 0,975 \pm 0,002$ для н-тетрадекана; $T_k = 333$ К, $P_k = 15,16 \pm 0,01$ МПа, $x = 0,946 \pm 0,002$ для н-тетрадекана; $T_k = 353$ К, $P_k = 18,65 \pm 0,01$ МПа, $x = 0,925 \pm 0,002$ в случае н-тетрадекана. Концентрационная зависимость данных

настоящего исследования о критических параметрах T_k , P_k для смеси CO_2 + н-тетрадекан показана на рис. 6, также приведены литературные данные [6, 7].

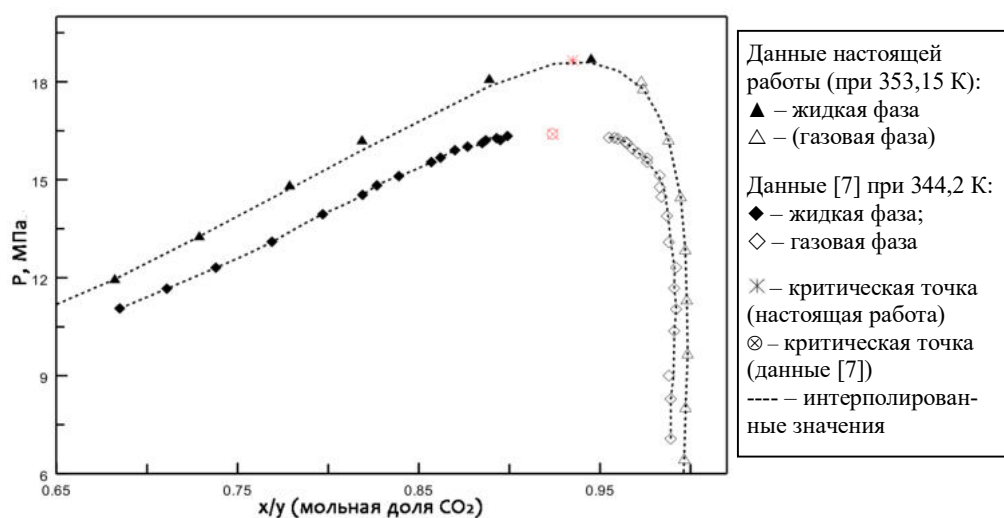


Рис. 5

Приведем P_k -проекцию (рис. 6, а) и T_k -проекцию (рис. 6, б) критических кривых бинарной смеси CO_2 + н-тетрадекан, а также соответствующие кривые давления паров для чистых компонентов [19, 22], рассчитанные по данным ЕoS [19] для CO_2 , и корреляции давления паров для н-тетрадекана [20]. На рис. 6 также приведены данные для смеси, представленные в работах [4, 6, 7].

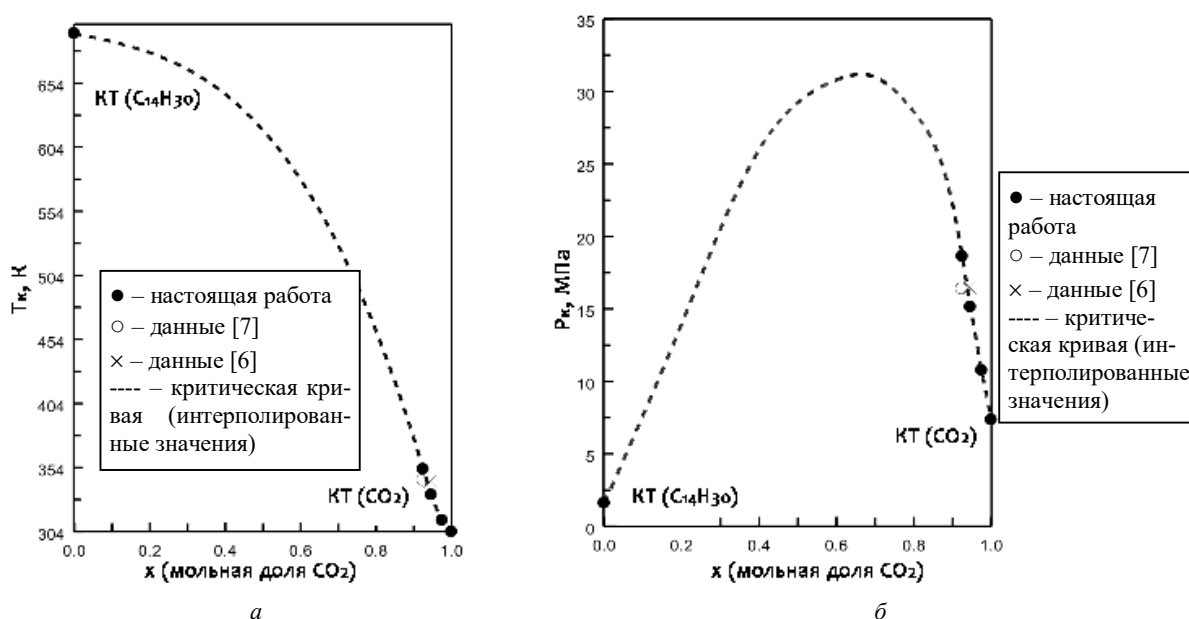


Рис. 6

Как видим (см. рис. 6), литературные данные хорошо согласуются с настоящими результатами.

На рис. 7 представлена $P_c - T_c$ -проекция критической линии бинарной смеси CO_2 + н-тетрадекан и кривые давления паров для чистых компонентов. Сплошными кривыми обозначены величины давления паров чистого CO_2 , рассчитанные по стандартному уравнению состояний (REFPROP [19]), а в случае н-тетрадекана – по корреляционному уравнению [20]. Пунктирная кривая – критическая кривая (интерполированные значения). Штрихпунктирной линией обозначена критическая изохора чистого растворителя (CO_2) [19]. Линия из точек – начальный наклон критической кривой $P_k - T_k$.

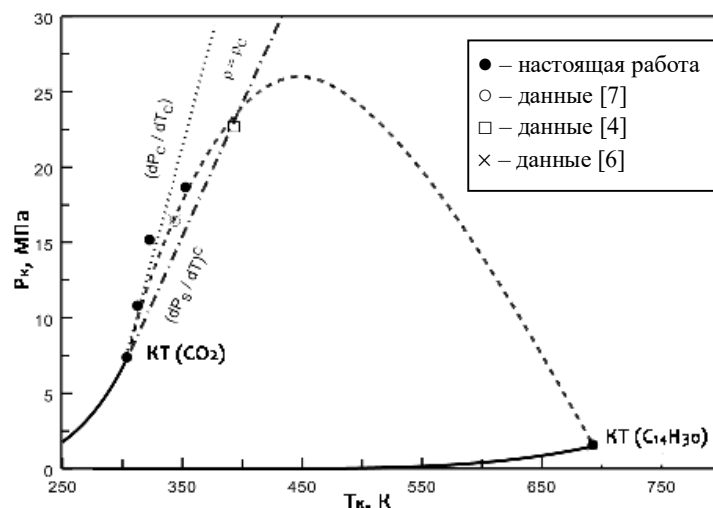


Рис. 7

В данной работе представлены новые данные измерений VLE (P - T -изотермы фазовых равновесий) для н-тетрадекана в суб- и сверхкритическом CO_2 при трех выбранных изотермах (313,15; 333,15; 353,15 К) в диапазоне давлений 3,8...19 МПа с использованием оптической ячейки высокого давления. Согласно полученному результату VLE присутствие н-тетрадекана в паровой фазе пренебрежимо мало. На основании измеренных данных VLE были определены критические параметры смеси.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-10129). <https://rscf.ru/project/22-79-10129/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abdulagatov A.I., Abdulagatov I.M., Stepanov G.V. Binary Aqueous and CO_2 Containing Mixtures and the Krichevskii Parameter. N.Y: NOVA Science Publishers, Inc., 2010. 227 p.
2. Roth M. Krichevskii Parameter of Heavy n-Alkanes in Carbon Dioxide: Comparison of the Results from Solubility Measurements and from Supercritical Fluid Chromatography // Fluid Phase Equilibria. 2003. № 212. P. 1–9.
3. Polikhronidi N.G. et al. Isochoric Heat Capacity Measurements for a CO_2 + n-Decane Mixture in the Nearcritical and Supercritical Regions // Journal of Supercritical Fluids. 2004. № 33. P. 209–222.
4. Scheidgen A. Fluid Phase ngleichgewichte Binärer und Ternärer Kohlendioxidmischungen mit Schwerflüchtigen Organischen Substanzen bis 100 MPa. Cosolvency Effect, Miscibility Windows und Löcher in der Kritischen Fläche. Bochum, 1997. 268 p.
5. Scheidgen A.L., Schneider G.M. Fluid Phase Equilibria of (Carbon Dioxide + a 1-Alkanol + an Alkane) up to 100 MPa and $T = 393$ K: Cosolvency Effect, Miscibility Windows, and Holes in the Critical Surface // The Journal of Chemical Thermodynamics. 2000. № 32. P. 1183–1201.
6. Pollack N.R. et al. Effect of an Aqueous Phase on CO_2 /Tetradecane and CO_2 /Maljamar-Crude-Oil Systems // SPE Reservoir Engineering. 1988. № 3. P. 533–541.
7. Gasem K.A.M. et al. Equilibrium Phase Compositions, Phase Densities, and Interfacial Tensions for CO_2 + Hydrocarbon Systems 5. CO_2 + n-Tetradecane // Journal of Chemical & Engineering Data. 1989. № 34. P. 191–195.
8. Wang L.S., Lang Z.X., Guo T.M. Measurement and Correlation of the Diffusion Coefficients of Carbon Dioxide in Liquid Hydrocarbons under Elevated Pressures // Fluid Phase Equilibria. 1996. № 117. P. 364–372.
9. Khairutdinov V.F. et al. Solubility of Naphthalene in Supercritical Binary Solvent Propane-Butane Mixture // Journal of Supercritical Fluids. 2020. № 156. Article № 104628.
10. Khairutdinov V.F. et al. New Design of the High-Pressure Optical Cell for VLE Measurements. Supercritical Binary Mixture (Propane/n-Butane) + Acetophenone // Journal of Chemical & Engineering Data. 2020. № 65. P. 3306–3317.
11. Khairutdinov V.F. et al. Measurements and Modeling of the VLE Properties of Hexadecane in Supercritical Binary Propane + n-Butane Solvent // Fluid Phase Equilib. 2020. № 510. Article № 112502.
12. Khabriev I.Sh. et al. VLE Properties and Critical Parameters of Ternary Mixture of CO_2 + Toluene/ Dichloromethane Involved in the SEDS Precipitation Process // Journal of Molecular Liquids. 2021. № 337. Article № 116371.
13. Khairutdinov V.F. et al. Supercritical Fluid Propane-Butane Extraction Treatment of Oil-Bearing Sands // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2017. № 51. P. 299–306.

14. Lemmon E.W., Huber M.L., McLinden M.O. NIST Standard Reference Database 23, NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties, REFPROP, Version 10.0, Standard Reference Data Program. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2018.
15. Bufkin B.L. Personal Communication. Oklahoma State University, 1985. 51 p.
16. Kariznovi M., Nourozieh H., Abedi J. Phase Composition and Saturated Liquid Properties in Binary and Ternary Systems Containing Carbon Dioxide, n-Decane, and n-Tetradecane // The Journal of Chemical Thermodynamics. 2013. № 57. P. 189–196.
17. Nourozieh H., Kariznovi M., Abedi J. Measurement and Correlation of Saturated Liquid Properties and Gas Solubility for Decane, Tetradecane and Their Binary Mixtures Saturated with Carbon Dioxide // Fluid Phase Equilibria. 2013. № 337. P. 246–254.
18. Laugier S., Richon D., Renon H. Simultaneous Determination of Vapor-Liquid Equilibria and Volumetric Properties of Ternary Systems with a New Experimental Apparatus // Fluid Phase Equilibria. 1990. № 54. P. 19–34.
19. Skripka V.G. et al. Liquid-Vapor Phase Equilibrium at Low Temperatures in Binary Systems Formed by Components of Natural Gas // GAS Industry of Russia. 1970. № 15. P. 35–60.
20. Anselme M.J., Gude M., Teja A.S. The Critical Temperatures and Densities of the n-Alkanes from Pentane to Octadecane // Fluid Phase Equilibria. 1990. № 57. P. 317–326.
21. Cui J., Wu J., Bi Sh. Liquid Viscosity, Interfacial Tension, Thermal Diffusivity and Mutual Diffusivity of n-Tetradecane with Dissolved Carbon Dioxide // Fluid Phase Equilibria. 2021. № 534. Article № 112951.
22. Polishuk I. Standardized Critical Point-Based Numerical Solution of Statistical Association Fluid Theory Parameters: The Perturbed Chain-Statistical Association Fluid Theory Equation of State Revisited // Industrial & Engineering Chemistry. 2014. Res. 53. P. 14127–14141.

Поступила в редколлегию 28.12.24

PHASE EQUILIBRIUM OF A BINARY MIXTURE OF CARBON DIOXIDE + N-TETRADECANE

**I.Sh. Khabriev, V.F. Khairutdinov, T.R. Akhmetzyanov,
I.M. Abdulagatov, I.Z. Salikhov, and R.R. Kabirov**

This paper presents new experimental data on the properties of gas-liquid phase equilibrium in the binary system carbon dioxide – n-tetradecane on three selected isotherms 313.15 K, 333.15 K and 353.15 K in the pressure range from (3.8 to 19.0) MPa. The measurements were carried out using an optical cell operating at high temperatures and pressures. The measured data of gas-liquid phase equilibrium in the binary system carbon dioxide – n-tetradecane were used to determine the critical data of the P_K – T_K curve.

Keywords: phase equilibrium, solubility, supercritical carbon dioxide, n-tetradecane.

Хабриев Ильнар Шамилевич – канд. техн. наук (КНИТУ, Казань)
E-mail: termi0@yandex.ru

Хайрутдинов Венер Фаилевич – д-р техн. наук (КНИТУ, Казань)
E-mail: baranova@omsu.ru

Ахметзянов Талгат Рафинатович – канд. техн. наук (КНИТУ, Казань)
E-mail: ahmetzyanov1992@bk.ru

Абдулагатов Ильмутдин Магомедович – д-р техн. наук (Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал ОИВТ РАН, Махачкала, Республика Дагестан)
E-mail: ilmutdina@gmail.com

Салихов Ильфат Зильбиревич – аспирант (КНИТУ, Казань)
E-mail: ilfat@tnhi.ru

Кабиров Руслан Рафикович – аспирант (КНИТУ, Казань)
E-mail: Rus.kabirov1708@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИХ УГЛЕРОДНЫХ ПЕН

Э.Р. Галимов, Э.Э. Шарафутдинова, Н.Я. Галимова

Разработана технология получения теплоизолирующих углеродных пен с использованием неграфитирующегося материала в виде фенолоформальдегидной смолы и фенольных микросфер. Проведено исследование физико-механических свойств пен от содержания полимерного связующего в исходной смеси. Определено оптимальное соотношение выбранных компонентов, обеспечивающее необходимые физико-механические характеристики пен.

Ключевые слова: углеродные пены, фенолоформальдегидные смолы, микросферы, технология получения, физико-механические свойства.

В последние десятилетия разрабатываются сверхлегкие материалы в виде теплопроводных и теплоизолирующих углеродных пен с комплексом уникальных свойств (высокие удельные прочностные характеристики, регулируемый в широком диапазоне коэффициент теплопроводности, электропроводность, высокая тепло- и термостойкость, устойчивость к воздействию агрессивных сред). Благодаря таким свойствам возможно их применение для изготовления изделий и конструкций, работающих в сложных, в том числе экстремальных условиях [1].

Существует много разнообразных способов получения углеродных пен (карбонизация наполненных микросферами полимеров, вспенивание органических веществ с высоким выходом углеродистого остатка, вспенивание углеродсодержащих веществ в присутствии порообразователей, темплатная карбонизация полимеров, прессование терморасширенного графита, самосборка углеродных наночастиц и др.).

Одним из эффективных способов получения теплоизолирующих пен является способ, основанный на применении в качестве исходных материалов неграфитирующихся соединений в виде термореактивных смол и полых микросфер с углеродными, полимерными, керамическими и стеклянными оболочками. При высокотемпературной обработке полимерных смол образуется углерод турбостратной, т. е. разориентированной слоистой структуры с малым размером кристаллитов, характеризующийся низким коэффициентом теплопроводности.

В данной работе для получения теплоизолирующих углеродных пен использовали резольную фенолоформальдегидную смолу (ФФС) марки СФ-012, содержание которой в композициях меняли в диапазоне 15...67 %, и полые фенольные микросферы, полученные термической обработкой распыленных растворов ФФС, содержащих 50 % воды и 6-9 мас. ч. фенола.

Подготовка компонентов, композиций и образцов для испытаний проводилась в следующей последовательности [2]. В трехгорлую колбу объемом 500 мл с установленной в ней механической мешалкой помещали навески порошкообразной смолы с микросферами в соотношении 25:25 г и затем при перемешивании к смеси добавляли 250 мл ацетона. Смесь кипятили на масляной бане при перемешивании магнитной мешалкой в течение 90 мин, после чего содержимое колбы охлаждали и переносили в круглодонную колбу. Полученную смесь упаривали на ротационном испарителе до полного удаления ацетона и высушивали под вакуумом при непрерывном перемешивании на ротационном испарителе. Образовавшийся гранулят извлекали из колбы и диспергировали до размера частиц менее 250 мкм. После этого проводили формирование «зеленой» пены холодным прессованием порошка в глухой матрице при давлении 12 МПа в течение 3 мин, полученную смесь отверждали в сушильном шкафу при 150 °С в течение 180 мин. Формованную заготовку извлекали из шкафа, помещали в муфельную печь и проводили карбо-

низацию в стальном контейнере с закрытой крышкой при 900 °С в течение 120 мин. Затем карбонизованный образец извлекали, помещали в печь пироуплотнения, которую герметизировали и продували аргоном. Образцы нагревали и выдерживали в печи при 1100 °С в течение 20-30 ч. После пироуплотнения полученные пены подвергали механической обработке до получения образцов заданных размеров для проведения испытаний.

Кажущуюся плотность пен определяли по стандартной методике. Предел прочности и модуль упругости при сжатии определяли на статической машине Zwick/Roell Z250 [2].

На рис. 1 представлены зависимости кажущейся плотности образцов пен после обжига и пироуплотнения от содержания в смеси фенолоформальдегидной смолы.

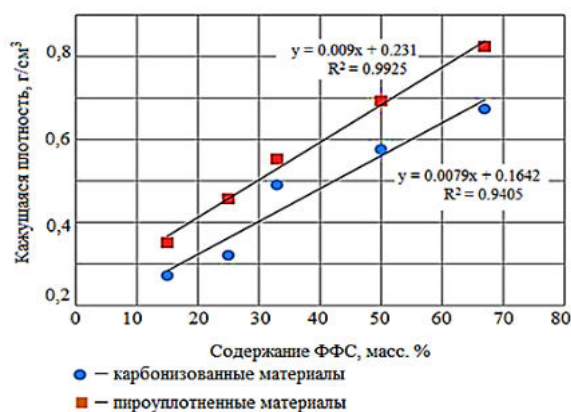


Рис. 1

Как видим (см. рис. 1), повышение содержания полимерного связующего приводит к возрастанию плотности карбонизованного материала, причем зависимость имеет линейный характер, что позволяет в широком диапазоне регулировать плотность получаемых пен.

Результаты измерения упругопрочностных свойств пен приведены на рис. 2.

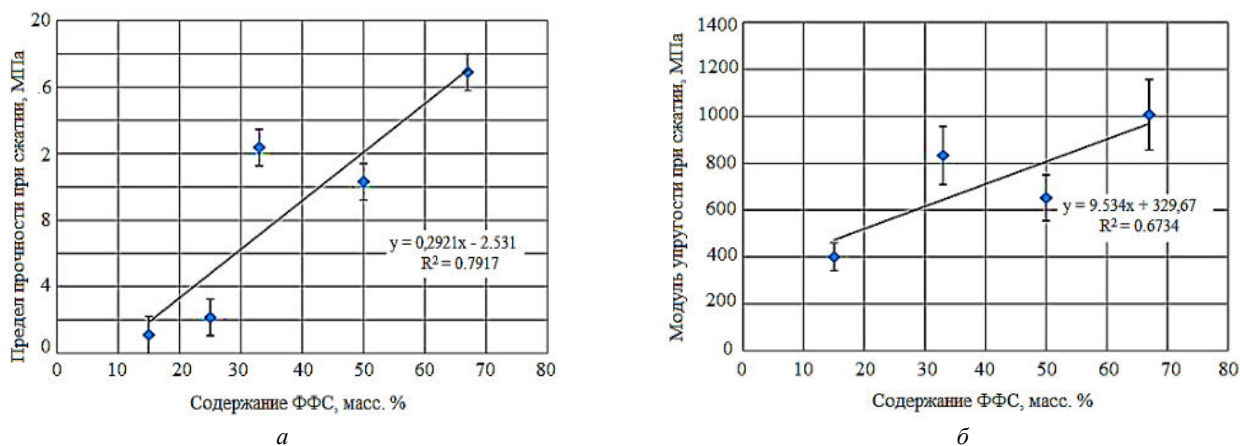


Рис. 2

Как видим, по мере увеличения содержания ФФС наблюдается монотонное повышение значений прочности (рис. 2, а) и модуля упругости при сжатии (рис. 2, б) углеродных пен. Высокий уровень и подобный характер изменения физико-механических свойств пен обусловлен особенностями их пористой структуры, формирующейся в процессе карбонизации и последующего пироуплотнения «зеленой» пены. В сформированной структуре пен возможно наличие наноразмерных мезо- и микропор, в связи с чем может заметно измениться уровень их упругопрочностных свойств [3]. В исследованных образцах пен были обнаружены преимущественно мезопоры, обеспечивающие сравнительно высокие значения пределов прочности и модуля упругости при сжатии. Разработанные пены могут быть использованы в качестве конструкционных и теплоизолирующих материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колокольцев С.Н. Углеродные материалы. Свойства, технологии, применения. Долгопрудный: Интеллект, 2012. 296 с.
2. Галимов Э.Р. и др. Синтактические углеродные пены: получение, структура, свойства, применение. Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2022. 324 с.
3. Galimov E.R., Sharafutdinova E.E., Galimova N.Ya. Technologies for Producing Syntactic Carbon Foams with Specified Operational Properties // Proc. of the MATEC Web of Conferences. Vol. 298. 2019. Article № 00023.

Поступила в редколлегию 18.03.25

STUDY OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES HEAT-INSULATING CARBON FOAMS

E.R. Galimov, E.E. Sharafutdinova, and N.Ya. Galimova

The technology of producing heat-insulating carbon foams using non-graphitising material in the form of phenol-formaldehyde resin and phenolic microspheres has been developed. The study of the physical and mechanical properties of foams has been undertaken, with particular reference to the content of polymer binder in the initial mixture. The optimum ratio of the selected components providing the necessary physical and mechanical characteristics of foams has been determined.

Keywords: carbon foams, phenol-formaldehyde resins, microspheres, production technology, physical and mechanical properties.

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

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

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

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ ПЕН НА ОСНОВЕ ПЕКА И ЛЕТУЧЕГО ПОРООБРАЗОВАТЕЛЯ

Э.Р. Галимов, Э.Э. Шарафутдинова, Н.Я. Галимова

Разработана технология получения углеродных пен методом карбонизации каменно-угольного пека с добавлением летучего порообразователя и структурирующей добавки. Показано влияние содержания и гранулометрического состава порообразователя, а также температуры термической обработки на изменение физико-механических характеристик пен.

Ключевые слова: углеродные пены, каменноугольный пек, летучий порообразователь, технология получения, гранулометрический состав, термическая обработка, физико-механические свойства.

В последние десятилетия проводятся исследования сверхлегких материалов в виде углеродных пен с уникальными свойствами (высокие удельные прочностные характеристики, регулируемый в широком диапазоне коэффициент теплопроводности, электропроводность, высокая тепло- и термостойкость, устойчивость к воздействию различных агрессивных сред и др.) [1]. Известны разнообразные способы получения углеродных пен открыто-пористой структуры с различными физико-механическими, теплофизическими и другими функциональными свойствами. Наибольшее распространение в производственной практике получили такие способы, как карбонизация наполненных полыми микросферами полимеров, темплатная карбонизация органических веществ и синтетических полимеров, вспенивание углеродсодержащих веществ в виде пеков и полимерных связующих в среде порообразователей [2]. В данной работе предлагается технология получения углеродных пен с высокими теплопроводными свойствами с помощью высокотемпературной обработки каменноугольного пека в присутствии летучего компонента (поваренной соли) и добавок природного графита. При реализации технологии варьировали температуру термообработки, давление формования, содержание и гранулометрический состав соли.

Технология формования пен включала следующие стадии. Вначале проводили подготовку и смешивание исходных компонентов. В качестве основного компонента использовали каменноугольный пек (температура размягчения – 120 °С, выход мезофазы – 35 мас. %, размер частиц менее 2,5 мм), в который добавляли порообразователь – натрий хлорид с фракцией 100–500 мкм. Смешивание компонентов проводили методом совместного помола в шаровой мельнице в течение 5–7 мин, после чего извлекали полученный порошкообразный материал. Затем проводили горячее формование образцов прессованием порошковой композиции в глухой матрице при 60 °С в течение 3 мин. Для проведения карбонизации образцы полученной «зеленой» пены заворачивали в бумагу, помещали в стальной контейнер, засыпали слоем графитированного боя, а затем слоем каменноугольного пека, контейнер накрывали крышкой и помещали в муфельную печь. Образцы в контейнере нагревали до 900 °С в течение 120 мин, после этого проводили охлаждение до 50 °С в течение 12 ч. Далее полученные образцы помещали в графитовые тигли, которые устанавливали в электровакуумную печь, откачивали внутреннее пространство печи до остаточного давления 133,3 Па. Печь нагревали до 2100 °С, выдерживали в течение 2 ч и затем охлаждали. Для проведения процесса графитации образцы пен помещали в графитовые тигли, насыпали засыпку (измельченный брак производства искусственного графита). Тигли помещали в печь графитации, нагревали до 2700 °С и выдерживали в течение 60 мин. На следующем этапе образцы графитированной пены загружали в камеру печи пироуплотнения, которую герметизировали, продували аргоном и выдерживали при 1100 °С, давлении метана 1333 Па в течение 50–60 ч. После пироуплотнения образцы пены обрабатывались с использованием стандартных инструментов механической обработки при низких скоростях подачи инструмента [1].

Характерной особенностью материалов пенистой структуры является зависимость их физико-механических свойств от объемного веса (кажущейся плотности), которую определяли с использованием

высушенных при 120 °С образцов размерами 10×10×10 мм по стандартной методике. Физико-механические свойства пен определяли на испытательной машине Zwick/Roell Z250. Предел прочности при сжатии определяли с использованием образцов с размерами 20×10×10 мм. Образец устанавливали на нижней плите испытательной машины, на которую помещали измерительный инструмент для определения деформации образца. Образец равномерно нагружали со скоростью 10 мм/мин до разрушения или пока его высота не уменьшится до 90 % ее первоначального значения. Твердость по Виккерсу определяли по стандартной методике с использованием образцов пен размерами 10×10×10 мм при нагрузке 980 Н в течение 10–15 с [2].

Приведем результаты экспериментальных исследований.

Изменение кажущейся плотности пен с использованием узкой и широкой фракции легучего порообразователя от температуры термообработки иллюстрирует рис. 1.

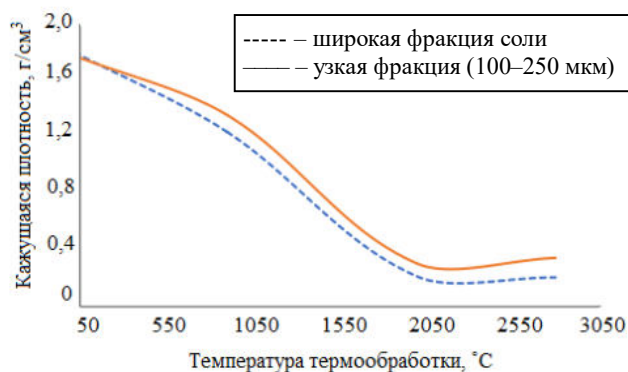


Рис. 1

Следует отметить сопоставимые значения кажущейся плотности пен в области сравнительно невысоких температур (до 400–500 °С). Видно, что происходит некоторое снижение плотности пен за счет потери массы пека, однако жесткий солевой каркас, не подверженный при этих температурах заметным деформациям, остается неизменным, и усадки не происходит. По мере дальнейшего повышения температуры происходит удаление соли и резкая потеря массы, что сопровождается существенным снижением кажущейся плотности. В процессе графитации при температурах выше 2050 °С происходит некоторое повышение плотности за счет усадки пористого материала, что соответствует теоретическим данным о поведении графитов в области повышенных температур [1].

На рис. 2 показано изменение прочности при сжатии пен от температуры термообработки.

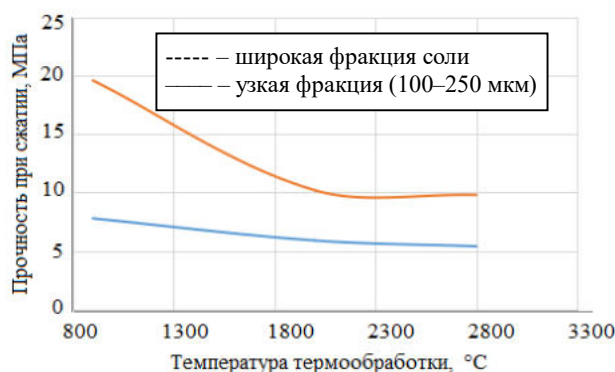


Рис. 2

Как видим (см рис. 2), при использовании узкой фракции порообразователя наблюдается более резкое снижение прочности.

Характер изменения твердости по Виккерсу для заготовок в процессе проведения термообработки (рис. 3) соответствует существующим теоретическим представлениям, твердость кокса заметно выше,

чем твердость графита. Следовательно, проведение высокотемпературной графитации предпочтительно для пен, получаемых с летучим порообразователем, поскольку при этом достигается требуемый уровень плотности, несколько повышается прочность и снижается твердость, что облегчает механическую обработку образцов получаемых пен.

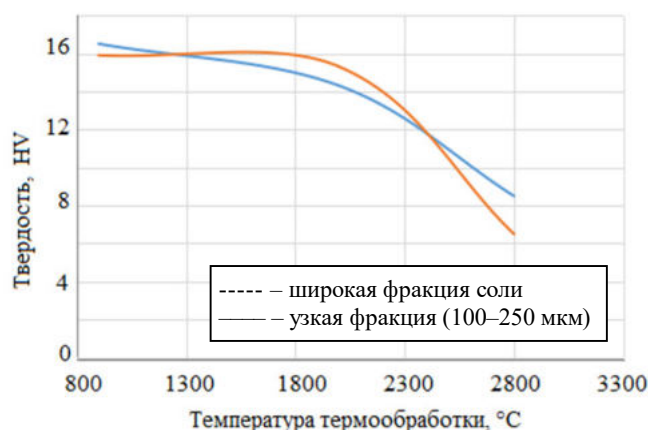


Рис. 3

Таким образом, пены, полученные с использованием летучего порообразователя, имеют прочность на уровне 10 МПа и менее, что обусловлено особенностями их структуры, в том числе повышенной мелкой пористостью и высокой степенью графитации, причем образцы пен, полученные с использованием узкой фракции порообразователя, отличаются более высоким уровнем эксплуатационных свойств по сравнению с широкой фракцией, что связано с большей равномерностью усадки и графитационных перестроек. Установлено, что свойства пен существенно зависят от режимных параметров технологического процесса, природы, соотношения и дисперсности используемых компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колокольцев С.Н. Углеродные материалы. Свойства, технологии, применения. Долгопрудный: Интеллект, 2012. 296 с.
2. Галимов Э.Р. и др. Синтактические углеродные пены: получение, структура, свойства, применение. Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2022. 324 с.

Поступила в редколлегию 20.03.25

PRODUCTION TECHNOLOGY AND PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON FOAMS BASED ON PITCH AND VOLATILE PORE-FORMING AGENT

E.R. Galimov, E.E. Sharafutdinova, and N.Ya. Galimova

The technology of carbon foams production by carbonisation of coal ash with addition of volatile powder formulator and structuring additive is developed. The influence of content and granulometric composition of the pore-forming agent, as well as the temperature of heat treatment on the change of physical and mechanical characteristics of foams is shown.

Keywords: carbon foams, coal pitch, volatile pore-forming agent, production technology, particle size distribution, heat treatment, physical and mechanical properties.

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

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

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

МЕТОДИКА МОДЕРНИЗАЦИИ ПРИВОДА ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ ТОКАРНОГО СТАНКА

В.Б. Есов, А.В. Каляшина, Д.Л. Решетников

Приведена методика модернизации привода главного движения токарного станка. Проведены расчеты, показавшие значительное увеличение крутильной жесткости модернизированного привода главного движения. По результатам расчета мощности резания с учетом тангенциальной составляющей силы резания был выбран асинхронный электродвигатель с фланцем и на лапах для обеспечения сборки с соединительным адаптером. Выполнено устранение разгрузочного узла из состава шпиндельного узла, в результате чего появляется возможность использования уже существующих резьбовых отверстий передней бабки для закрепления переходного фланца двигателя.

Ключевые слова: токарный станок, привод главного движения, модернизация, сила резания.

Модернизация имеющихся на предприятиях станков представляет собой альтернативу приобретению нового дорогостоящего оборудования, особенно в условиях, когда от минимальных финансовых вложений ожидаются значительные результаты. При отсутствии у предприятия финансовых средств на закупку нового дорогостоящего оборудования модернизация имеющегося станочного парка становится практически единственной эффективной мерой. Процесс модернизации металлорежущего оборудования способствует устранению морального устаревания, расширяет технологические возможности и повышает общий технический уровень, что, в свою очередь, позволяет восстановить конкурентоспособность оборудования и продлить срок его эксплуатации [1].

Станок ТПК-125ВМ предназначен для патронной и центровой обработки высокоточных деталей из различных материалов, позволяет вести обработку с микронной точностью, что делает его практически незаменимым при изготовлении ответственных деталей. Однако, по современным меркам, станок имеет весьма ограниченные возможности, в связи с чем отсутствует конкуренция с современными multifunctionальными металлообрабатывающими центрами. В частности, морально устарел привод главного движения: отсутствует возможность нарезания резьбы, наличие ременной клиновой передачи негативно сказывается на жесткости и быстродействии привода. При высокоскоростной обработке наблюдается возникновение колебаний ремня вследствие увеличения центробежной силы, что оказывает пагубное влияние на качество обрабатываемых поверхностей. На основе текущей компоновки невозможно организовать токарно-фрезерный комплекс.

В ходе исследования проведен сравнительный анализ характеристик токарных станков Schaublin 302, Willemin-Macodel 203s и ТПК-125ВМ. Проанализировав полученные данные, можно сделать вывод о необходимости модернизации станка ТПК-125ВМ, так как, во-первых, заводской электродвигатель главного движения имеет недостаточную мощность, что влияет на производительность станка в целом и на возможность проведения высокоскоростного точения; во-вторых, станок ТПК-125ВМ не отвечает современным требованиям в области металлообработки [2]. Отличным решением модернизации станка является установка револьверной головки с наличием приводного инструмента или проектирование конструкции для установки фрезерного шпинделя небольшой мощности на вспомогательные направляющие станка. Результатом такой модернизации является полноценный токарно-фрезерный комплекс. Однако реализация данных решений затруднена, поскольку для осуществления фрезерных работ необходима жесткость системы «привод главного движения – шпиндельный узел» и точность позиционирования шпиндельного узла. На данный момент такие требования не могут быть выполнены ввиду того, что в состав привода главного движения входит ременная передача с клиновым ремнем. Такая система подвержена проскальзыванию, отличается большой податливостью и отсутствием возможности точного позиционирования шпиндельного узла, также отсутствует возможность торможения и блокирования шпинделя.

Следует отметить, что модернизация станка ТПК-125ВМ является комплексным мероприятием. Усовершенствование только привода главного движения не приведет к желаемым результатам, однако является серьезным шагом на пути к созданию современного обрабатывающего комплекса. Дело в том что, кроме привода главного движения, морально устарели приводы подач и суппорт станка, система ЧПУ. Следовательно, можно сделать вывод о том, что станку ТПК-125ВМ требуется комплексная модернизация [2, 3].

Объект исследования – привод главного движения токарного станка с ЧПУ ТПК-125ВМ.

Способ модернизации – переход на схему прямого привода, который является оптимальным решением, так как позволит обеспечить синхронизацию электродвигателя со шпинделем. Суть данного метода заключается в установке электродвигателя соосно со шпиндельным узлом станка без каких-либо передач. Для реализации схемы прямого привода необходимо [2] провести расчет силы резания и мощности резания, выбрать электродвигатель и соединительную муфту, провести расчет крутильной жесткости привода главного движения как один из критериев для оценки эффективности разработанной конструкции

На начальном этапе конструкторской работы необходимо определить значения возникающей силы резания в процессе обработки деталей на станке ТПК-125ВМ. От этих значений впоследствии будет зависеть требуемая мощность электродвигателя, материал соединительного адаптера, типоразмер соединительной муфты.

На практике для проведения различных проектных расчетов используют не равнодействующую силу резания R , а ее составляющие – тангенциальную P_z , радиальную P_y и осевую P_x , которые действуют по трем взаимно перпендикулярным направлениям. Тангенциальная составляющая силы резания P_z используется для определения крутящего момента на шпинделе, вычисления полезной мощности резания, а также для механического расчета привода главного движения, поэтому проведен расчет именно этой составляющей силы резания [3]:

$$P_z = C_p t^x S^y,$$

где C_p – коэффициент, соответствующий определенному сочетанию сплав – покрытие; t – глубина резания, мм; S – подача на оборот, мм/об; x, y – показатели степени при варьируемом параметре глубине резания и подаче.

Значения варьируемых коэффициентов C_p, x, y при обработке стали 45 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Инструментальный материал	C_p	x	y
T15K6 (ромбическая форма СМП)	220	1,06	0,91
T15K6 + TiN	200	1,0	0,81
T15K6 + TiC	171	1,09	0,77
MC 2210	178	1,13	0,74
T15K6 (шестигранная форма СМП)	156	1,05	0,58
KHТ16	147	1,13	0,5

Станок ТПК-125ВМ предназначен преимущественно для чистового точения, для которого характерны следующие режимы резания [4, 5]: $t = 0,05 \div 1$ мм ; $S = 0,05 \div 0,4$ мм/об .

Применение станка для чернового точения на жестких режимах не рекомендуется из-за высокой вероятности снижения срока службы подшипников и потери показателей точности.

Результаты расчета тангенциальной составляющей силы резания выполнены с помощью математического пакета MathCAD для различных инструментальных материалов по методике [5] и представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, максимальное значение тангенциальной составляющей силы резания при чистовых режимах точения составляет 95,56 Н.

Таблица 2

Инструментальный материал	Обрабатываемый материал	P_z , Н
T15K6 (ромбическая форма СМП)	Сталь 45	95,56
T15K6 + TiN	Сталь 45	95,21
T15K6 + TiC	Сталь 45	84,45
MC 2210	Сталь 45	90,35
T15K6 (шестигранная форма СМП)	Сталь 45	91,69
КНТ16	Сталь 45	92,97

Мощность резания определили по формуле

$$P = P_z V / (60 \cdot 1000),$$

где V – скорость резания, м/мин.

Мощность резания с учетом тангенциальной составляющей силы резания (примерно 100 Н) и максимальным значением скорости резания составляет приблизительно 3,375 кВт.

Мощность электродвигателя с учетом КПД 0,8...0,9 составила примерно 4 кВт. Оптимальным решением, подкрепленным результатами расчетов, является выбор асинхронного электродвигателя типа АИР100L4 в требуемом исполнении IM2081 – с фланцем и на лапах для обеспечения сборки с разрабатываемым соединительным адаптером.

Конструкция прямого привода главного движения представляет собой электропривод с бесступенчатым регулированием: отсутствует какой-либо механический способ изменения частоты вращения шпинделя. Ввиду этого изменение частоты оборотов электродвигателя, а следовательно, и шпинделя, производится с помощью частотного регулирования, при котором изменением частоты напряжения f , Гц, регулируют частоту вращения вала электродвигателя n , об/мин.

Зависимость выходных параметров электродвигателя удовлетворяет предъявляемым требованиям в рамках разрабатываемой конструкции привода главного движения станка ТПК-125ВМ. При обработке деталей малых диаметров (0,5...40 мм) необходимы повышенные обороты шпинделя, но не требуется высокий крутящий момент. В свою очередь, при обработке деталей больших диаметров (до 125 мм) уже не требуются высокие частоты вращения, но необходим постоянный высокий крутящий момент.

Для реализации схемы прямого привода необходимо спроектировать конфигурации соединительных адаптеров. Для этой цели рассмотрены несколько вариантов:

- использование четырех соединительных адаптеров – соединительных стержней;
- использование сварного фланца;
- использование уже существующих резьбовых отверстий передней бабки для закрепления переходного фланца.

Использование сварного фланца более предпочтительно, так как при такой конструкции обеспечивается соосность вала электродвигателя с валом разгрузочного узла за счет установки электродвигателя во фланец по центрирующему пояску и центрированию фланца по цилиндрической поверхности крышки разгрузочного узла. Кроме этого, при использовании соединительных стержней достаточно велика вероятность того, что величина несовпадения осей вала электродвигателя и вала разгрузочного узла будет выше допустимой. Это крайне негативно скажется на точности обработки, а также ресурсе муфты и подшипников электродвигателя.

Реализация прямого привода и с помощью соединительных стержней, и с помощью сварного фланца имеет два общих недостатка. Во-первых, при модернизации привода с помощью спроектированных деталей необходима механическая обработка передней бабки станка для создания в ней отверстий под крепежные элементы. Так как необходимо получить данные отверстия с достаточно большой точностью расположения и параллельностью осей, требуется демонтировать переднюю бабку и обработать ее на расточном станке. Во-вторых, в обоих конструкторских решениях в состав сборки входит разгрузоч-

ный узел, устраняющий нагрузку от натяжения ремня. Следовательно, после перехода на схему прямого привода отсутствует необходимость в использовании разгрузочного узла, а его наличие лишь увеличивает нагрузку на переходные адаптеры из-за консольного закрепления электродвигателя. Более того, использование такой компоновки приводит к тому, что в состав привода главного движения включается еще одна муфта, что является нерациональным решением ввиду увеличения податливости кинематической цепи.

В сложившейся ситуации верным решением является устранение разгрузочного узла из состава шпиндельного узла, в результате чего появляется возможность использовать уже существующие резьбовые отверстия передней бабки для закрепления переходного фланца. Применение такого фланца обосновано тем, что его центрирование относительно передней бабки осуществляется по точно обработанной посадочной поверхности, которая прежде использовалась для установки разгрузочного узла [6, 7]. Кроме того, нагрузка от консольно закрепленного электродвигателя становится существенно ниже в связи с минимизацией длины узла.

Для соединения вала электродвигателя с входным валом шпиндельного узла необходимо использовать муфту. Оптимальным решением является использование кулачковой соединительной муфты МТВ160 типа «карданный вал», которая способна компенсировать осевые, угловые и радиальные смещения валов. Муфты такого типа отличаются повышенной радиальной и угловой крутильной и изгибной жесткостью [8], что и требуется для модернизируемого узла. При применении таких муфт непосредственно в приводе шпинделя, где присутствуют большие крутящие моменты, возникает сначала незначительное скручивание (в предварительно сжатом состоянии), и, таким образом, достигается демпфирование. Пиковые и ударные нагрузки снижаются, соответственно, диапазон возникновения резонанса смещается в некритическую зону вращения [9].

Одним из критериев для оценки эффективности разработанной конструкции прямого привода главного движения является показатель крутильной жесткости привода. Именно этот показатель играет решающую роль в обеспечении прецизионной механической обработки. Без повышения крутильной жесткости привода применение спроектированного узла не имеет смысла: не будет обеспечена точность углового позиционирования шпиндельного вала, а значит, и точность при проведении фрезерных операций. Следовательно, для обоснованной оценки эффективности предложенного конструкторского решения следует провести расчет крутильной жесткости привода главного движения до и после модернизации. Вычисления были проведены с помощью математического пакета MathCAD на основе методик [3, 7, 9, 10]. Результаты расчетов жесткости и податливости привода главного движения приведены на рис. 1.



Рис. 1. Гистограмма значений крутильной жесткости привода главного движения

По полученным результатам, после модернизации крутильная жесткость привода главного движения возрастает в 41,4 раза. Данный результат свидетельствует о значительном повышении крутильной жесткости при использовании разработанного конструкторского решения, что доказывает его эффективность с точки зрения повышения жесткости.

Кроме этого, в ходе расчетов было выявлено, что низкая крутильная жесткость привода в исходной конфигурации вызвана наличием ременной передачи, имеющей самую малую жесткость в составе кинематической цепи, что негативно сказывается на жесткости всего привода. Следовательно, устранение ременной передачи – верное и обоснованное решение, позволяющее обеспечить значительное повышение жесткости при модернизации привода главного движения.

Процесс проектирования и сборка узла осуществлялась в среде САПР Autodesk Inventor 2021. Первоначально по существующим, а также по восстановленным по результатам обратного проектирования чертежам деталей и узлов станка созданы эскизы в среде САПР. Затем по полученным эскизам разработаны твердотельные модели соответствующих деталей. Результаты процесса проектирования представлены на рис. 2, где показано, что к валу электродвигателя подключен энкодер, с помощью которого будет осуществляться контроль за положением и частотой вращения вала электродвигателя и, соответственно, шпинделя.

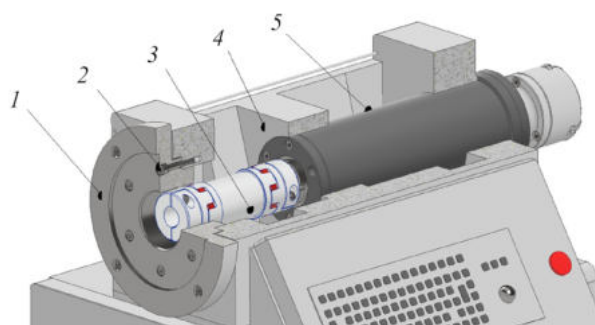


Рис. 2. Объемное изображение модернизированного привода главного движения, внутренняя часть передней бабки:
1 – фланец переходный; 2 – винт; 3 – муфта кулачковая; 4 – бабка передняя; 5 – шпиндельный узел

В процессе исследования проведен ряд конструкторских мероприятий, в результате которых спроектирована модернизированная конструкция привода главного движения станка ТПК-125ВМ. Результаты расчетов крутильной жесткости привода главного движения показали, что модернизированная конструкция привода имеет жесткость в 42 раза выше, чем исходная. Такие показатели доказывают эффективность разработанной конструкции для модернизации станка. Также по результатам прочностного исследования было выявлено, что минимальное значение коэффициента запаса по текучести является допустимым и подтверждает работоспособность разработанной конструкции прямого привода главного движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Платонов В.В., Майзель И.Г. Модернизация металлообрабатывающих станков с числовым программным управлением // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. № 2. С. 285–295.
2. Есов В.Б., Каляшина А.В. Модернизация привода главного движения токарного станка // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2024. № 3. С. 48–52.
3. Соколова И.Д., Беккель Л.С., Панкрашин А.М. Модернизация привода главного движения универсального консольно-фрезерного станка // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2017. № 2 (12). С. 49–55.
4. Никифоров И.А., Есов В.Б. Оценка перспектив модернизации токарного станка с ЧПУ 16K20Ф3 // Будущее машиностроения России: Сб. докл. 8-й Всерос. конф. молодых ученых и специалистов, г. Москва, 23–26 сент. 2015. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. С. 480–483.
5. Николаев В.А. и др. Модернизация коробки скоростей фрезерного станка с целью повышения его надежности и производительности // Механика XXI века. 2024. № 23. С. 250–254.
6. Беглецова В.Э., Баранов И.Д., Добряков В.А. Модернизация системы управления токарным станком 16K20Ф3 // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: Сб. науч. тр. Саратов: СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2022. С. 9–13.
7. Федонин О.Н., Петрешин Д.И., Агеенко А.В. Алгоритм диагностирования состояния токарных станков с ЧПУ // Вестник Брянского государственного технического университета. 2014. № 2 (42). С. 75–79.

8. *Орипов Б.А., Кочетков Д.В.* Сравнительный анализ конструкций приводов главного движения токарного станка // *Материалы и технологии XXI века: Сб. ст. 18-й Междунар. науч.-техн. конф., г. Пенза, 28–29 марта 2022. Пенза: Приволжский Дом знаний, 2022. С. 47–52.*
9. *Есов В.Б., Лисовик П.В., Решетников Д.Л.* Модернизация приводов главного движения и движения подачи токарного станка с ЧПУ ТПК-125ВМ // *Инновационные технологии реновации в машиностроении: Сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., посвященной 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 4–5 фев. 2019. М.: МГОУ, 2019. С. 269–272.*
10. *Ряховский О.А., Леликова О.П.* Атлас конструкций узлов и деталей машин. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 400 с.

Поступила в редколлегию 18.03.25

MODERNIZATION OF THE MAIN MOTION DRIVE OF A LATHE

V.B. Esov, A.V. Kalyashina, and D.L. Reshetnikov

The paper presents a methodology for upgrading the main drive of a lathe. The calculations showed that the torsional rigidity of the upgraded main drive has increased significantly. Based on the results of calculating the cutting power, taking into account the tangential component of the cutting force, an asynchronous electric motor with a flange and on feet was selected to ensure assembly with a coupling adapter. The unloading unit was also eliminated from the spindle unit, as a result of which it becomes possible to use the existing threaded holes of the headstock to secure the adapter flange of the motor.

Keywords: lathe, main drive, modernization, durability.

Есов Валерий Балахметович – канд. техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)

E-mail: esov@bmstu.ru

Каляшина Анна Викторовна – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: anna_vik@mail.ru

Решетников Денис Леонидович – магистр (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)

E-mail: bigboard97@gmail.com

КОМБИНИРОВАННАЯ РЕГЕНЕРАТИВНАЯ ГАЗОТУРБИННАЯ СИЛОВАЯ УСТАНОВКА С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ВОЗДУХА МЕЖДУ КОМПРЕССОРАМИ НИЗКОГО И ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

А.С. Лиманский, К.В. Каховский, В.В. Анкудимов

Представлен комбинированный термодинамический цикл регенеративных газотурбинных силовых установок с промежуточным охлаждением воздуха между компрессорами низкого и высокого давления. Рассмотрен способ практической реализации данного цикла на примере двигателя АЛ-31СТ и приведены особенности методики расчета. В качестве промежуточного теплоносителя используется вода, что позволяет удовлетворить нужды конечного потребителя в горячем водоснабжении. Показано, что реализация регенеративного цикла с промежуточным охлаждением воздуха позволяет повысить у газотурбинной силовой установки исходные кпд на 7...9 % абсолютных, а мощность в 1,3–1,4 раза. Также представлены новые коэффициенты для оценки эффективности газотурбинных силовых установок – коэффициент технико-экономической эффективности и относительный коэффициент технико-экономической эффективности.

Ключевые слова: комбинированная регенеративная газотурбинная силовая установка, промежуточное охлаждение воздуха, регенеративный теплообменный аппарат, регенерация, тепловая эффективность, коэффициент технико-экономической эффективности, относительный коэффициент технико-экономической эффективности.

В настоящее время к перспективным авиационным и стационарным газотурбинным двигателям и установкам предъявляются требования по значительному повышению тепловой эффективности, снижению удельного расхода топлива и выбросов вредных веществ. Газотурбинные циклы имеют более низкие значения кпд по сравнению с циклами других тепловых двигателей, в частности парогазотурбинных и дизельных. Например, газотурбинные установки (ГТУ) последних поколений при достижении кпд порядка 40 % имеют тепловые потери, мощность которых в 1,5 раза и более превышает номинальную мощность двигателя. Исходя из динамики кпд газотурбинных двигателей (ГТД) за последние 30 лет, можно заметить, что его прирост не превышает 10 %, т. е. в среднем 0,33 % в год, а прирост кпд ГТУ заметно ниже, чем у летных образцов двигателей, и его прирост за данный промежуток времени составляет 5 %, т. е. в среднем 0,17 % в год.

Для выбора оптимального пути дальнейшего совершенствования рабочего процесса ГТУ целесообразно рассмотреть известные направления увеличения тепловой эффективности [1–6]:

- повышение параметров простого термодинамического цикла (температуры газа перед турбиной и степени повышения давления в компрессоре);
- создание многоагрегатных ГТУ комбинированных термодинамических схем с умеренными и повышенными температурами газа;
- применение с целью увеличения термодинамической эффективности комбинации простого цикла и регенерации теплоты, т. е. возврата части уходящей теплоты ГТУ в собственный цикл.

Повышение температуры газа перед турбиной требует значительных финансовых и временных затрат при проектировании, затрудняет обеспечение приемлемого эксплуатационного ресурса и надежности, поэтому не менее перспективна реализация комбинированных термодинамических схем в ГТД и ГТУ [7]. Также заметно снижает тепловые потери и, соответственно, повышает кпд реализация регенеративного цикла, причем научный интерес к исследованию ГТД [8–14] и ГТУ [4–6, 15–21] с регенерацией теплоты является мировой тенденцией. Регенерация части уходящей теплоты для современных ГТУ составляет порядка 30...40 % от номинальной мощности и осуществляется при помощи специально спроектированного регенеративного теплообменного аппарата типа воздух – газ [8–14, 22]. Развитие данного направления сдерживалось из-за сложности создания эффективных, малогабаритных и надежных реге-

неративных теплообменных аппаратов, однако в настоящее время ведутся интенсивные работы по повышению эффективности и улучшению весогабаритных характеристик, достигнута степень регенерации 0,8...0,9, и минимизированы гидравлические потери [8–14, 16, 20, 22–26]. Также разрабатываются проекты утилизационных комплексов, позволяющих использовать уходящую теплоту ГТУ посредством теплообменника, расположенного в выхлопной шахте, как для элементарного нагрева воды [21], так и для подключения через газодинамическую связь дополнительного утилизационного турбокомпрессора, работающего по газотурбинному циклу [4, 15, 18, 19] и питающего через вал потребитель энергии, причем данные проекты не требуют внесения изменений в конструкцию базового газогенератора модифицируемой ГТУ.

В газотурбостроении, особенно в промышленном и энергетическом секторе, наблюдается тенденция, заключающаяся как в использовании готовых узлов при проектировании ГТД и ГТУ, например турбокомпрессоров, применяемых для турбонаддува двигателей внутреннего сгорания [27–29], так и в улучшении тепловых схем ГТУ применением комбинирования готовых узлов базового газогенератора, т. е. с максимальным использованием серийно выпускаемых промышленностью деталей [4–6, 19]. Указанный подход не требует больших проектных и производственных затрат, и его использование может быть целесообразным при создании линейки двигателей с повышенными кпд и мощностями.

Согласно имеющейся статистике в составе газоперекачивающих агрегатов газотранспортной системы широко используются конвертированные двигатели авиационного типа. Например, парк конвертированных ГТУ в структуре компании «Газпром» составляет около 90 %. Как известно, ГТУ АЛ-31СТ имеет кпд 36 %, при этом последняя редакция научно-технической политики «Газпрома» предполагает повышение кпд эксплуатируемых ГТУ в составе газоперекачивающих агрегатов до 40 % абсолютных и более.

Преимущественным показателем экономической эффективности ГТУ является кпд

$$\eta_e = \frac{3600}{C_e H_u \eta_{КС}}, \quad (1)$$

где C_e – удельный расход топлива, кг/(кВт·ч); H_u – теплотворная способность топлива, кДж/кг; $\eta_{КС}$ – полнота сгорания топлива в камере сгорания.

В свою очередь,

$$C_e = \frac{g_T}{N_{\text{еуд}}}, \quad (2)$$

где g_T – относительный расход топлива; $N_{\text{еуд}}$ – удельная мощность, кДж/кг.

Относительный расход топлива зависит как от температуры газа и воздуха, так и от вида топлива. Удельная мощность ГТУ зависит от многих факторов – температуры газа, степени повышения давления компрессора, кпд основных узлов и потерь давления в трактах. Параметром η_e оперируют при устойчивых (одинаковых) показателях удельной мощности (удельной работы цикла). Однако при применении усложненных циклов с целью улучшения основных параметров следует обязательно учитывать и $N_{\text{еуд}}$, поскольку результирующий расход воздуха зависит не только от η_e , но и от $N_{\text{еуд}}$. Так, при одинаковой заданной мощности и при различной $N_{\text{еуд}}$ результирующим будет расход рабочего тела (воздуха), кг/с,

$$G_B = \frac{N_e}{N_{\text{еуд}}} \quad (3)$$

и расход топлива, кг/с,

$$G_T = G_B g_T. \quad (4)$$

Для современных ГТУ при температурах газа перед турбиной порядка 1300...1600 К наблюдается заметный разброс указанных параметров ($\eta_e = 0,32 \div 0,42$; $N_{\text{евд}} = 240 \div 340$ кВт·с/кг), а также их сочетания. В связи с этим предлагается применять комплекс, названный коэффициентом технико-экономической эффективности, кВт·с/кг. Данный комплекс включает кпд и удельную мощность, где кпд определяет экономичность, а удельная мощность – расход рабочего тела (воздуха) двигателя при заданной мощности, причем расход рабочего тела, в свою очередь, характеризует габариты двигателя:

$$K_{\text{ТЭ}} = \eta_e N_{\text{евд}}. \quad (5)$$

С изменением температуры газа изменяется и коэффициент технико-экономической эффективности. Так, в среднем у современных двигателей простого цикла для 1300 К он составляет $K_{\text{ТЭ}} = 74 \div 85$ кВт·с/кг; для 1400 К $K_{\text{ТЭ}} = 90 \div 105$ кВт·с/кг; для 1500 К $K_{\text{ТЭ}} = 100 \div 120$ кВт·с/кг; для 1600 К $K_{\text{ТЭ}} = 120 \div 145$ кВт·с/кг.

Для сравнительного анализа эффективности циклов различных двигателей удобно использовать относительный коэффициент технико-экономической эффективности, представляющий собой отношение коэффициента технико-экономической эффективности проектного двигателя к коэффициенту технико-экономической эффективности исходного двигателя:

$$\bar{K}_{\text{ТЭ}} = \frac{K_{\text{ТЭ}}}{K_{\text{ТЭ0}}} = \frac{\eta_e}{\eta_{e0}} \frac{N_{\text{евд}}}{N_{\text{евд0}}} = \bar{\eta}_e \bar{N}_{\text{евд}}, \quad (6)$$

где $K_{\text{ТЭ0}} = \eta_{e0} N_{\text{евд0}}$ – коэффициент технико-экономической эффективности исходного двигателя, с которым сравнивается оцениваемый двигатель.

Термодинамические основы реконструирования ГТУ с реализацией регенеративного цикла с промежуточным охлаждением

Включение в цикл ГТУ регенератора существенно улучшает ее экономичность, однако низкая оптимальная степень повышения давления компрессора и гидравлические потери в регенераторе заметно уменьшают удельную мощность – работу цикла. В свою очередь, для увеличения удельной мощности целесообразно усложнять цикл ГТУ, например, вводя охлаждение воздуха в процесс сжатия, используя промежуточный охладитель, устанавливая его между компрессорами низкого и высокого давления. С повышением числа охладителей процесс сжатия может быть приближен к изотермическому (так называемый процесс «карнонизации»). В результате промежуточного охлаждения температура процесса сжатия оказывается более низкой, чем в простом цикле, а теплота, подведенная в камере сгорания, возрастает, даже с учетом подогрева воздуха в регенеративном теплообменном аппарате. Несмотря на это, кпд ГТУ возрастает за счет преобладающего увеличения удельной мощности вследствие уменьшения работы сжатия компрессора высокого давления [30]. Применение сочетания регенерации теплоты и промежуточного охлаждения значительно повышает кпд ГТУ за счет уменьшения подводимой $q_{\text{КС}}$ и отводимой $q_{\text{от}}$ теплоты.

Цикл регенеративной ГТУ с промежуточным охлаждением в T – S -диаграмме представлен на рис. 1. Здесь: 1-2 – сжатие в компрессоре высокого давления; 2-3 – $q_{\text{рег}}$ – регенеративная теплота; 3-4 – $q_{\text{КС}}$ – теплота, подведенная в камеру сгорания; 4-5 – расширение газа в турбинах высокого и низкого давления; 5-6 – $q_{\text{рег}}$ – регенеративная теплота (отвод теплоты в регенеративном теплообменном аппарате); 6-7 – $q_{\text{отв}}$ – отведенная теплота; 7-8 – сжатие в компрессоре низкого давления; 8-1 – $q_{\text{охл}}$ – теплота охлаждения.

Из теории регенеративных ГТД и ГТУ известно, что для них характерны пониженные степени повышения давления компрессоров порядка 5...8. Для создания регенеративной ГТУ с промежуточным охлаждением воздуха между компрессорами низкого и высокого давления целесообразно реконструировать существующие высокотемпературные ГТУ с достаточно высокой суммарной степенью повышения давления компрессора, например, АЛ-31СТ с суммарной степенью повышения давления компрессора

$\pi_{\kappa\Sigma}^* = 17,5$. В таком случае сохраняется каскад как низкого, так и высокого давления, причем степень повышения давления компрессора высокого давления приближается к оптимальной величине для регенеративного цикла $\pi_{\kappaВД}^* = 6$.

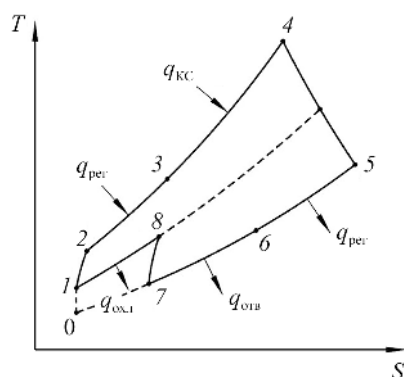


Рис. 1

Принципиальная схема регенеративной ГТУ с промежуточным охлаждением воздуха между компрессорами низкого и высокого давления представлена на рис. 2. Здесь: КНД – компрессор низкого давления; ОВ – охладитель воздуха; КВД – компрессор высокого давления; РТА – регенеративный теплообменный аппарат; КС – камера сгорания; ТВД – турбина высокого давления; ТНД – турбина низкого давления; ТС – турбина силовая.

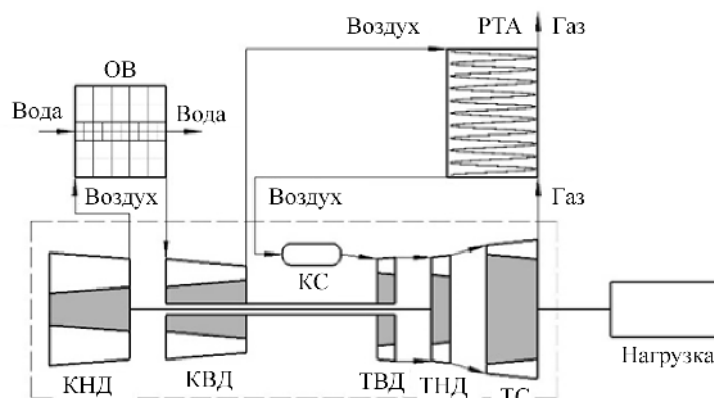


Рис. 2

Термогазодинамический расчет реконструированной регенеративной ГТУ с промежуточным охлаждением на базе АЛ-31СТ с исходным кпд $\eta_e = 36\%$, удельной мощностью $N_{\text{уд}} = 251,2 \text{ кВт} \cdot \text{с/кг}$ и итоговой мощностью $N_e = 16 \text{ МВт}$ проводился при двух значениях температуры газа после камеры сгорания ($T_{\text{г}}^* = 1400 \text{ К}$ и $T_{\text{г}}^* = 1500 \text{ К}$) со следующими выбранными исходными данными: суммарная степень повышения давления компрессора $\pi_{\kappa\Sigma}^* = 8,9$; расход воздуха через компрессор $G_{\text{в}} = 63,7 \text{ кг/с}$; степень регенерации в теплообменных аппаратах $\sigma = 0,85$; кпд турбины компрессора $\eta_{\text{ТК}} = 0,88$; кпд турбины силовой $\eta_{\text{ТС}} = 0,93$. Коэффициенты сохранения давления: в камере сгорания $\sigma_{\text{КС}} = 0,96$, в газопереходнике между турбиной компрессора и турбиной силовой $\sigma_{\text{ГП}} = 0,97$, воздуха в регенеративном теплообменном аппарате $\sigma_{\text{в РТА}} = 0,95$ и в охладителе воздуха $\sigma_{\text{в ОВ}} = 0,97$, в воздушных магистралях $\sigma_{\text{в маг}} = 0,94$. Суммарные потери давления по газу в регенеративном теплообменном аппарате и коммуникациях $\Delta P_{\text{г}\Sigma} = 12 \text{ кПа}$.

По итогам расчетов регенеративной ГТУ с промежуточным охлаждением для варианта с $T_{\text{г}}^* = 1500 \text{ К}$ и температурой промежуточного охлаждения воздуха между компрессорами низкого и вы-

сокого давления $\Delta T_{\text{в.ов}}^* = 100 \text{ К}$ получены следующие результаты: кпд компрессоров низкого давления $\eta_{\text{кнд}} = 0,884$ и высокого давления $\eta_{\text{квд}} = 0,873$; температура воздуха после компрессора низкого давления $T_{\text{кнд}}^* = 407 \text{ К}$; температура воздуха после компрессора высокого давления $T_{\text{квд}}^* = 532 \text{ К}$; температура воздуха после регенеративного теплообменного аппарата $T_{\text{в.гвт}}^* = 847 \text{ К}$, т. е. происходит подогрев воздуха в регенеративном теплообменном аппарате на 315 К . Степень повышения давления компрессоров низкого $\pi_{\text{кнд}}^* = 2,9$ и высокого давления $\pi_{\text{квд}}^* = 6$; степень понижения давления турбины силовой $\pi_{\text{тс}}^* = 3,62$.

Таким образом, получены следующие основные параметры эффективности для реконструированного АЛ-31СТ при $T_{\text{г}}^* = 1500 \text{ К}$ и $\Delta T_{\text{в.ов}}^* = 100 \text{ К}$: эффективный кпд $\eta_e = 45,8 \%$, т. е. достигнутый прирост эффективного кпд по сравнению с исходным (36%) составляет $\Delta \eta_e = 9,8 \%$; удельная мощность $N_{\text{еуд}}^{\text{рег}} = 357 \text{ кВт} \cdot \text{с/кг}$; итоговая мощность:

$$N_e = G_{\text{в}} N_{\text{еуд}}. \quad (7)$$

В расчетах $N_e = 22,7 \text{ МВт}$.

Расход топлива реконструированного АЛ-31СТ на номинальном режиме при $T_{\text{г}}^* = 1500 \text{ К}$ и $\Delta T_{\text{в.ов}}^* = 100 \text{ К}$, кг/с, уменьшается по сравнению с исходным и составит

$$G_{\text{т}}^{\text{рег}} = G_{\text{т}} \frac{N_{\text{еуд}}}{N_{\text{еуд}}^{\text{рег}}}, \quad (8)$$

где $G_{\text{т}} = 0,902 \text{ кг/с}$ – расход топлива исходного АЛ-31СТ на номинальном режиме.

В расчетах $G_{\text{т}}^{\text{рег}} = 0,7 \text{ кг/с}$.

Коэффициент технико-экономической эффективности при $T_{\text{г}}^* = 1500 \text{ К}$ и $\Delta T_{\text{в.ов}}^* = 100 \text{ К}$ составил $K_{\text{тэ}} = 164,2 \text{ кВт} \cdot \text{с/кг}$, что благодаря реализации регенеративного цикла с промежуточным охлаждением значительно превышает приведенные усредненные диапазоны для современных двигателей простого цикла. Следовательно, относительный коэффициент технико-экономической эффективности составляет $\bar{K}_{\text{тэ}} = 1,79$.

Коэффициент регенерации [6]:

$$K_{\text{рег}} = \frac{q_{\text{рег}}}{q_{\text{кс}}} 100 \%, \quad (9)$$

где $q_{\text{рег}} = 762,5 \text{ кДж/кг}$. В расчетах при $\Delta T_{\text{в.ов}}^* = 100 \text{ К}$ для $T_{\text{г}}^* = 1400 \text{ К}$ коэффициент регенерации составил $K_{\text{рег}} = 24 \%$, для $T_{\text{г}}^* = 1500 \text{ К}$ $K_{\text{рег}} = 25,5 \%$.

Особенности процесса реконструкции ГТУ с реализацией регенеративного цикла с промежуточным охлаждением

Основная критика реконструирования ГТУ с организацией регенеративного цикла или с реализацией различных комбинированных циклов с регенерацией обычно направлена на необходимость внесения многочисленных изменений в конструкцию исходной ГТУ [5, 6]: удаление каскада высокого давления базового газогенератора с целью обеспечения оптимальной степени повышения давления компрессора для осуществления регенеративного цикла; добавление дополнительных ступеней после и/или перед компрессором, турбиной; изменение высоты проточной части компрессора и турбины; перепрофилирование лопаток; в случае реализации цикла с перерасширением газа в турбине – оснащение комбинированной ГТУ вакуумирующим компрессором и др. Известные схемы с оснащением ГТУ дополнительным утилизационным турбокомпрессором могут считаться достаточно сложными и громоздкими [4, 15, 18, 19], что усложняет их эксплуатацию.

Выгодно отличается от рассмотренных случаев реконструирование ГТУ с организацией комбинации регенеративного цикла и цикла с промежуточным охлаждением воздуха между компрессорами низкого и высокого давления, так как обеспечивается максимально осуществимое сохранение узлов и деталей базового газогенератора модифицируемой ГТУ. Таким образом, сохраняются каскады низкого и высокого давления, а количество изменений в конструкции модифицируемой ГТУ значительно сокращается. Тем не менее для обеспечения совместной работы компрессора и турбины при реконструировании ГТУ для организации регенеративного цикла с промежуточным охлаждением по-прежнему могут потребоваться некоторые дополнительные изменения в конструкции отдельных узлов и деталей, например компрессора и турбины (добавление ступеней, изменение высоты проточной части, перепрофилирование лопаток и др.), которые требуют дальнейшего детального рассмотрения.

В конструкции регенеративной ГТУ с промежуточным охлаждением роль имеющегося в цикле регенеративного теплообменного аппарата выполняет газоздушный теплообменник, а роль охладителя воздуха – водовоздушный теплообменник.

На рис. 3 представлен эскиз комбинированной регенеративной ГТУ с промежуточным охлаждением воздуха между компрессорами низкого и высокого давления на базе АЛ-31СТ.

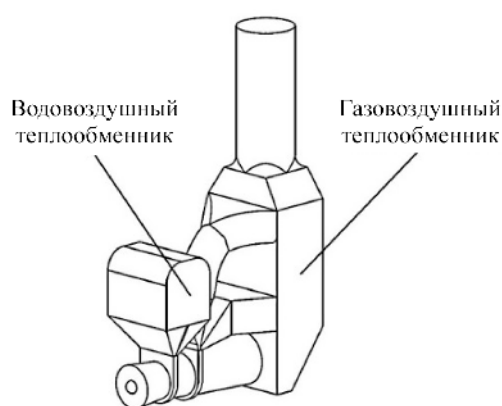


Рис. 3

Газовоздушный теплообменник устанавливается в выхлопном тракте (непосредственно в шахте). Подвод и отвод воздуха к газозвоздушному теплообменнику осуществляется в верхней и нижней частях шахты при помощи специальных трубопроводов с диаметром 1,2 м. Схема течения теплоносителей (воздуха и газа) в теплообменной матрице газозвоздушного теплообменника предлагается противоточная как наиболее эффективная. Отбор воздуха в газозвоздушный теплообменник осуществляется за компрессором высокого давления при помощи осерадиального диффузора, а возвращение нагретого воздуха в газогенератор осуществляется перед камерой сгорания с помощью радиально-осевого диффузора.

Особо важную роль в цикле ГТУ с промежуточным охлаждением выполняет водовоздушный теплообменник. Отбор воздуха в водовоздушный теплообменник осуществляется за компрессором низкого давления также при помощи осерадиального диффузора, а возвращение нагретого воздуха в газогенератор осуществляется перед компрессором высокого давления с помощью радиально-осевого диффузора. Применение в водовоздушном теплообменнике в качестве промежуточного теплоносителя воды обуславливается ее высокой теплоемкостью и постоянством круглогодичного использования, что в конечном счете позволяет обеспечивать горячее водоснабжение потребителей в нормированном диапазоне температур 60...75 °С. Схема течения теплоносителей (воздуха и воды) в теплообменной матрице водовоздушного теплообменника также предлагается противоточная, как наиболее эффективная.

Указанные отбор воздуха в теплообменники и подвод воздуха обратно в газогенератор технически осуществимы благодаря наличию свободного осевого пространства как между каскадами компрессора, так и между компрессором и камерой сгорания АЛ-31СТ.

Расчет расхода воды в водовоздушном теплообменнике осуществляется согласно зависимости

$$G_{\text{вод}} = \frac{\eta_{\text{НВ}} c_{\text{рв}} G_{\text{в}}}{\theta c_{\text{рвод}}} \quad (10)$$

Здесь: $\eta_{\text{НВ}}$ – КПД нагревателя воды, в расчетах $\eta_{\text{НВ}} = 0,8$; $\theta = \frac{T''_{\text{вод}} - T'_{\text{вод}}}{T_{\text{в}} - T'_{\text{вод}}}$ – степень нагрева воды, где $T''_{\text{вод}}$,

$T'_{\text{вод}}$ – температура воды на выходе и входе, $T_{\text{в}}$ – температура воздуха после компрессора низкого давления на входе в нагреватель воды, в расчетах $\theta = 0,388$; $c_{\text{рв}} = 1,03$ кДж/(кг·К), $G_{\text{в}} = 63,7$ кг/с – теплоемкость и расход воздуха после компрессора низкого давления; $c_{\text{рвод}} = 4,2$ кДж/(кг·К) – теплоемкость воды.

В итоге для варианта регенеративной ГТУ с промежуточным охлаждением при $T_{\text{г}}^* = 1500$ К и $\Delta T_{\text{вВВТ}}^* = 100$ К получена величина вырабатываемой горячей воды $G_{\text{вод}} = 32,21$ кг/с, или 115 т/ч.

Указанный расход воды может обеспечить типовой водогрейный котел с номинальной теплопроизводительностью 5 МВт.

В таблице приведены полученные в расчетах основные параметры комбинированной регенеративной ГТУ с промежуточным охлаждением на базе АЛ-31СТ для двух значений температуры газа после камеры сгорания и при трех различных температурах промежуточного охлаждения воздуха.

Наименование	Температура газа за камерой сгорания, К					
	1400			1500		
	Температура промежуточного охлаждения воздуха, К					
	100	70	60	100	70	60
Полученный кпд, %	43,7	41,7	40,5	45,8	44,1	43,3
Прирост кпд, %	7,7	5,7	4,5	9,8	8,1	7,3
Полученная удельная мощность, кВт·с/кг	324	298	289	357	335	327
Полученная итоговая мощность, МВт	20,6	19	18,4	22,7	21,3	20,8
Прирост итоговой мощности, МВт	4,6	3	2,4	6,7	5,3	4,8
Высота водовоздушного теплообменника, м	2	1,6	1,4	2	1,6	1,4
Высота газовоздушного теплообменника, м	5,3					

В заключение приведем следующие выводы по итогам работы.

Представленный комбинированный термодинамический цикл ГТУ с регенерацией и промежуточным охлаждением воздуха между компрессорами низкого и высокого давления позволяет благодаря сочетанию регенерации теплоты и промежуточного охлаждения значительно повысить КПД ГТУ за счет уменьшения подводимой и отводимой теплоты, что подтверждают проведенные расчеты. Таким образом, для ГТУ АЛ-31СТ с исходным КПД 36 % при температуре газа за камерой сгорания 1500 К, температуре промежуточного охлаждения воздуха между каскадами компрессора 100 К и степени регенерации 0,85 рост КПД в модифицированном варианте по сравнению с базовым составил 9,8 %, или итоговые 45,8 %, а достигнутая мощность по сравнению с исходной в 16 МВт составила 22,7 МВт.

Технически реализация в комбинированном цикле промежуточного охлаждения осуществляется добавлением в базовый газогенератор ГТУ между компрессорами низкого и высокого давления осерадиального диффузора, отводящего воздух в водовоздушный теплообменник, и радиально-осевого диффузора, возвращающего охлажденный воздух обратно в газогенератор. Реализация в комбинированном цикле регенерации теплоты осуществляется добавлением в базовый газогенератор ГТУ между компрессором высокого давления и камерой сгорания осерадиального диффузора, отводящего воздух в газоздушный теплообменник, и радиально-осевого диффузора, возвращающего нагретый воздух в газогенератор. Таким образом, сохраняются каскады низкого и высокого давления, следовательно, объем изменений в конструкции модифицируемой ГТУ значительно сокращается. Тем не менее для обеспечения совместной работы компрессора и турбины после реконструкции ГТУ по-прежнему могут потребоваться

некоторые дополнительные изменения в конструкции отдельных узлов и деталей, например, компрессора и турбины (добавление ступеней, изменение высоты проточной части, перепрофилирование лопаток и др.), которые требуют дальнейшего детального рассмотрения.

Использование в качестве теплоносителя воды позволяет удовлетворить нужды конечного потребителя в горячем водоснабжении, в противном случае возможно использование теплоносителя в замкнутом контуре, что приведет к существенному снижению кпд. В рассматриваемой регенеративной ГТУ с промежуточным охлаждением расход воды составил 115 т/ч при нормированном диапазоне температур 60...75 °С.

Представленный вариант реконструкции ГТУ с реализацией регенеративного цикла с промежуточным охлаждением позволяет модифицировать эксплуатируемые двигатели и, по сравнению с другими способами реконструкции, максимально использовать имеющиеся серийные узлы и детали, так как подразумевает наименьшие изменения в конструкции по сравнению с вариантами реконструирования ГТУ с простой организацией регенеративного цикла или с реализацией различных комбинированных циклов с регенерацией. Таким образом, хотя и требуются изменения в конструкции модифицируемых узлов, но в значительно меньшем масштабе по сравнению с проектированием нового двигателя, следовательно, значительно сокращаются проектировочные и производственные затраты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Елисеев Ю.С. и др.* Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 640 с.
2. *Александров А.А.* Термодинамические основы циклов энергетических установок. М.: МЭИ, 2006. 158 с.
3. *Евгеньев С.С. и др.* Повышение экономичности эксплуатации ГТУ с двигателями типа НК // Компрессорная техника и пневматика. 2011. № 4. С. 29–33.
4. *Лиманский А.С., Такмовцев В.В., Джораев С.Б.* Выбор и расчетный анализ характеристик утилизационной турбокомпрессорной установки при работе совместно с приводным ГТД // Тр. Академ-энерго. 2016. № 4. С. 108–119.
5. *Анкудимов В.В., Гадельшин Т.Э., Злобина М.А.* Реконструкция реального двухроторного газотурбинного двигателя для реализации регенеративного цикла // 25-е Туполевские чтения (школа молодых ученых): Сб. докл.: в 6 т. Казань: Изд-во ИП Сагеева А.Р., 2021. Т. 2. С. 154–157.
6. *Лиманский А.С., Каховский К.В., Анкудимов В.В.* Усовершенствованный термодинамический цикл газотурбинных силовых установок с регенерацией и перерасширением газа в турбине // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2023. № 4. С. 67–76.
7. *Перельштейн Б.Х.* Новые энергетические системы. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2008. 244 с.
8. *Kim M. et al.* Numerical Study on the Cross-Corrugated Primary Surface Heat Exchanger Having Asymmetric Cross-Sectional Profiles for Advanced Intercooled-Cycle Aero Engines // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. Vol. 66. P. 139–153.
9. *Xiao G. et al.* Recuperators for Micro Gas Turbines: A Review // Applied Energy. 2017. Vol. 197. P. 83–99.
10. *Ремчуков С.С., Данилов М.А., Чистов К.А.* Автоматизированное проектирование и расчет пластинчатого теплообменника для малоразмерного газотурбинного двигателя // Вестник МАИ. 2018. № 3. С. 116–123.
11. *Zhang C., Gümmer V.* The Potential of Helicopter Turboshift Engines Incorporating Highly Effective Recuperators under Various Flight Conditions // Aerospace Science and Technology. 2019. Vol. 88. P. 84–94.
12. *Осипов И.В., Ремчуков С.С.* Малоразмерный газотурбинный двигатель со свободной турбиной и теплообменником системы регенерации тепла в классе мощности 200 л. с. // Вестник МАИ. 2019. № 2. С. 81–90.
13. *Омар Х.Х.О., Кузьмичев В.С., Ткаченко А.Ю.* Повышение эффективности авиационных двухконтурных турбореактивных двигателей за счет применения рекуператора // Вестник МАИ. 2020. № 4. С. 133–146.
14. *Дадоян Р.Г. и др.* Формирование облика рекуператора для малоразмерного ГТД с регенерацией тепла // Вестник УГАТУ. 2021. № 1 (91). С. 22–32.
15. *Матвиенко В.Т., Очеретяный В.А.* Работа комбинированных ГТУ с воздушными утилизирующими турбинными двигателями на переменных режимах // Авиационно-космическая техника и технология. 2011. № 10. С. 82–85.

16. *Шилин А.А.* Повышение эффективности конверсионного газотурбинного двигателя семейства НК // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2013. № 1. С. 40–45.
17. *Лиманский А.С., Бобылев Л.В., Войтович М.А., Шинкарев А.С.* Утилизационная энерготурбоустановка с использованием сверхкритического углекислого газа // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2013. № 2-2. С. 37–41.
18. *Лиманский А.С., Такмовцев В.В., Джораев С.Б.* Энергосберегающая утилизационная турбокомпрессорная установка // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли: Сб. докл.: в 2 т. Казань: АН РТ, 2016. Т. 1. С. 366–371.
19. *Лиманский А.С. и др.* Комбинированная газотурбинная установка с внешним регенеративным энергетическим блоком // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. 2018. № 3. С. 77–82.
20. *Кузьмичев В.С., Омар Х.Х., Ткаченко А.Ю.* Способ повышения эффективности газотурбинных двигателей для наземного применения за счет регенерации тепла // Вестник МАИ. 2018. № 4. С. 133–141.
21. *Анкудимов В.В., Гадельшин Т.Э., Злобина Т.Э.* Использование уходящей тепловой энергии турбовальных ГТД на испытательных станциях // 25-е Туполевские чтения (школа молодых ученых): Сб. докл.: в 6 т. Казань: Изд-во ИП Сагеева А.Р., 2021. Т. 2. С. 158–162.
22. *Мионов А.А. и др.* Повышение эффективности авиационных теплообменных аппаратов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2020. № 1. С. 134–140.
23. *Иванов В.Л. и др.* Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 592 с.
24. *Xie G.N., Sundén B., Wang Q.W.* Optimization of Compact Heat Exchangers by a Genetic Algorithm // Applied Thermal Engineering. 2008. Vol. 28. № 8-9. P. 895–906.
25. *Светлаков А.Л. и др.* Развитие методик расчета и проектирования теплообменных аппаратов авиационного назначения // Авиационные двигатели. 2019. № 4 (5). С. 37–44.
26. *Ремчуков С.С., Осипов И.В., Лебединский Р.Н. и др.* Расчетно-экспериментальные исследования модуля пластинчатого теплообменника малоразмерного газотурбинного двигателя с регенерацией тепла // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 3. С. 105–111.
27. *Анкудимов В.В., Сейид Д.С.С.* Малоразмерный газотурбинный двигатель для легкого беспилотного летательного аппарата // 24-е Туполевские чтения (школа молодых ученых): Сб. докл.: в 6 т. Казань: Изд-во ИП Сагеева А.Р., 2019. Т. 2. С. 170–174.
28. *Сыченков В.А. и др.* Разработка малоразмерного газотурбинного двигателя для беспилотного летательного аппарата // Вестник РГАТА имени П.А. Соловьева. 2019. № 3 (50). С. 23–31.
29. *Сыченков В.А. и др.* Малоразмерный газотурбинный двигатель для беспилотного летательного аппарата // Изв. вузов. Авиационная техника. 2019. № 4. С. 115–123.
30. *Ольховский Г.Г.* Энергические газотурбинные установки. М.: Энергоатомиздат, 1985. 304 с.

Поступила в редколлегию 19.02.25

COMBINED REGENERATIVE GAS TURBINE POWER PLANT WITH INTERMEDIATE AIR COOLING BETWEEN LOW- AND HIGH-PRESSURE COMPRESSORS

A.S. Limanskii, K.V. Kakhovskii, and V.V. Ankudimov

The article presents a combined thermodynamic cycle of regenerative gas turbine power plants with intermediate cooling of air between low- and high-pressure compressors. The method of practical application of this cycle is also considered using the AL-31ST engine as an example, and the features of the calculation methodology are presented. Water is used as an intermediate heat carrier, which allows consumers to be supplied with hot water. Additionally, the work proved that the implementation of a regenerative cycle with intermediate air cooling makes it possible to increase the initial efficiency of gas turbine power plants by 7...9% absolute, and power by 1,3–1,4 times. New coefficients for assessing the efficiency of gas turbine power plants are also presented: the coefficient of technical and economic efficiency and the relative coefficient of technical and economic efficiency.

Keywords: combined regenerative gas turbine power plant, intermediate air cooling, regenerative heat exchanger, regeneration, thermal efficiency, technical and economic efficiency coefficient, relative technical and economic efficiency coefficient.

Лиманский Адольф Степанович – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: alimanskii@yandex.ru

Каховский Константин Васильевич – канд. техн. наук («ОКБ им. А. Люльки»
филиал ПАО «ОДК-УМПО», Москва)
E-mail: konstantin.kahovskiy@okb.umpo.ru

Анкудимов Владимир Вячеславович – инженер (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: vladimir.ankudimov@inbox.ru

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОЩНОСТИ РЕЗАНИЯ ЛАЗЕРНОГО РАСКРОЯ МЕТАЛЛА НА ОБРАЗОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ЗОН

Л.Н. Шафигуллин, Ф.Ф. Насыбуллин, Р.М. Хисамутдинов

Исследуется влияние мощности лазерного резания материала толщиной 4...9,5 мм на возникновение зон с закалочными структурами. Указаны причины возникновения закалочных структур. Предложено решение по уменьшению размера закалочных структур за счет применения интеллектуальных алгоритмов раскроя металла с оптимальными параметрами лазерного кроя.

Ключевые слова: лазерный раскрой, оптимальные параметры мощности резания, толщина резания, зоны термического влияния, микротвердость, интеллектуальная поддержка.

Широкое внедрение лазерных станков для раскроя металла, применяемых при изготовлении деталей из листового сортамента, обусловлено высокой скоростью выполнения операций раскроя, что обеспечивает удовлетворение потребностей различных отраслей в сжатые сроки, особенно в условиях массового производства. Однако во время операции из-за термического воздействия на кромках деталей образуются зоны с закалочными структурами. Закалочные структуры, образуемые на кромках лазерного реза, являются источниками внутренних напряжений и микротрещин, приводящих к разрушению деталей в последующей эксплуатации.

В лазерных станках параметры резания – мощность и скорость резания – задаются на основе эмпирических данных. Выбор параметров резания лазерного станка зависит от материала и толщины листового сортамента, при этом для листов большей толщины требуется более высокая мощность резания. Однако на практике для тонколистовых деталей с целью увеличения производительности операции раскрой осуществляют при высоких мощностях и скорости резания. Вследствие этого вблизи поверхности реза регистрируются повышенные значения микротвердости. Установлено, что высокие значения микротвердости характерны для области, близкой к поверхности реза. При резке происходит высокоскоростной нагрев и охлаждение металла в поверхностных слоях реза, из-за чего формируется зона газолазерного термического влияния [1]. Это приводит к тому, что на кромках лазерного реза возникают внутренние напряжения и микротрещины, в итоге разрушающие детали при последующей эксплуатации. Уменьшение образования зон с закалочными структурами возможно за счет применения интеллектуальных алгоритмов раскроя металла с оптимальными параметрами лазерного кроя.

Целью настоящей работы является выявление зависимостей между мощностью резания лазерного раскроя листового металла и глубиной закалочных структур.

Проведено исследование двенадцати деталей из высокопрочных сталей, применяемых для изготовления несущих силовых элементов грузового автомобиля, с толщиной стенок 4...9,5 мм после лазерного раскроя при различной мощности резания.

Результаты исследований представлены в таблице.

В качестве измерительного и испытательного оборудования для оценки параметров окружающей среды использовали термогигрометр ИВА-6А-Д, для измерения твердости на предварительно зачищенных поверхностях деталей по методу Бринелля (ГОСТ 9012-59) шариком диаметром 5 мм при нагрузке 7357,5 Н – твердомер ТБ 5004, для определения микротвердости структур металла деталей по методу Виккерса (ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007) при нагрузке 981 Н – микротвердомер Дуримет, для оценки микроструктуры деталей – оптический микроскоп МЕИИ МТ7530 с анализатором изображений «Комплекс программно-аппаратного анализа микроструктуры поверхности твердых тел Thixomet».

Номер детали	Толщина листа, мм	Материал	Твердость, НВ	Мощности резания, Вт	Глубина закалочного слоя, мм	Микроструктура
1	4	S700MCE	270	2160	0,090÷0,230	Феррито-бейнитная
2			271	2400	0,093÷0,280	
3			269	2640	0,093÷0,290	
4	6	S550MCE	207	2700	0,12÷0,44	Феррито-перлитная, перлит сорбитообразный
5			213	3000	0,18÷0,48	
6			212	3300	0,12÷0,51	
7	8	S550MCE	213	3150	0,12÷0,52	
8			215	3500	0,11÷0,45	
9			214	3850	0,12÷0,59	
10	9,5	Magstrong W900	320	3600	0,20÷0,42	Отпущенный малоуглеродистый мартенсит
11				4000	0,18÷0,49	
12				4400	0,18÷0,52	

На рис. 1 демонстрируется внешний вид детали № 1, на рис. 2 – внешний вид поверхностей фрагментов детали № 1 после лазерной резки (увеличение в 5 раз).

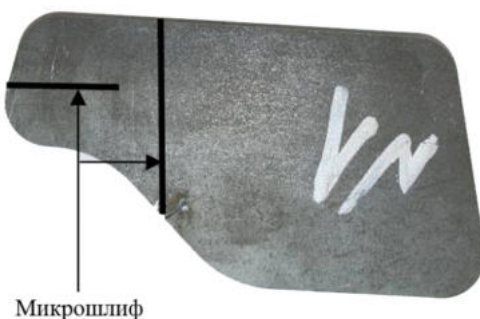


Рис. 1



Рис. 2

Исследование микроструктуры деталей проводилось на продольных и поперечных микрошлифах в соответствии с рис. 1. В соответствии с методом Ш4, установленным ГОСТ 1778-70, который предназначен для оценки влияния неметаллических включений на качество металла, загрязненность металла деталей № 1–12 неметаллическими включениями характеризовалась по точечным оксидам уровнем 1а балла, а по сульфидам – менее 1а балла.

Закалочные структуры вблизи кромки детали № 1 в сечении продольного микрошлифа с дорожками (с увеличением в 200 раз) представлены на рис. 3.

Как видим (см. рис. 3), минимальные и максимальные значения глубины закалочного слоя для детали № 1 варьируется в значениях от 0,090 мм для продольного (рис. 3, а) и 0,230 мм для поперечного (рис. 3, б) положения микрошлифа.

Для уменьшения толщины закалочного слоя после лазерной резки необходимо применение интеллектуальных алгоритмов раскроя металла с оптимальными параметрами мощности резания (рис. 4).

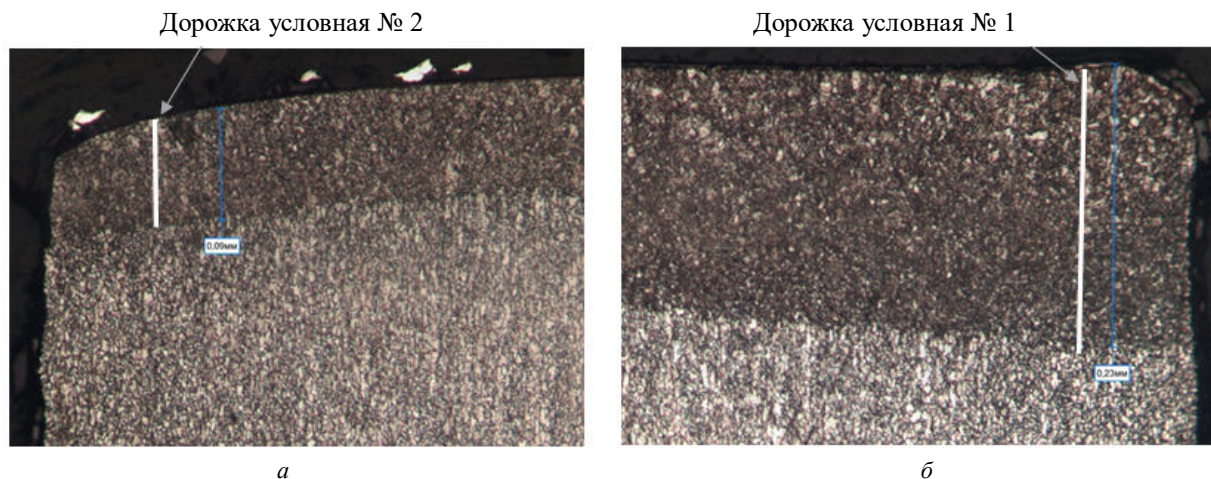


Рис. 3

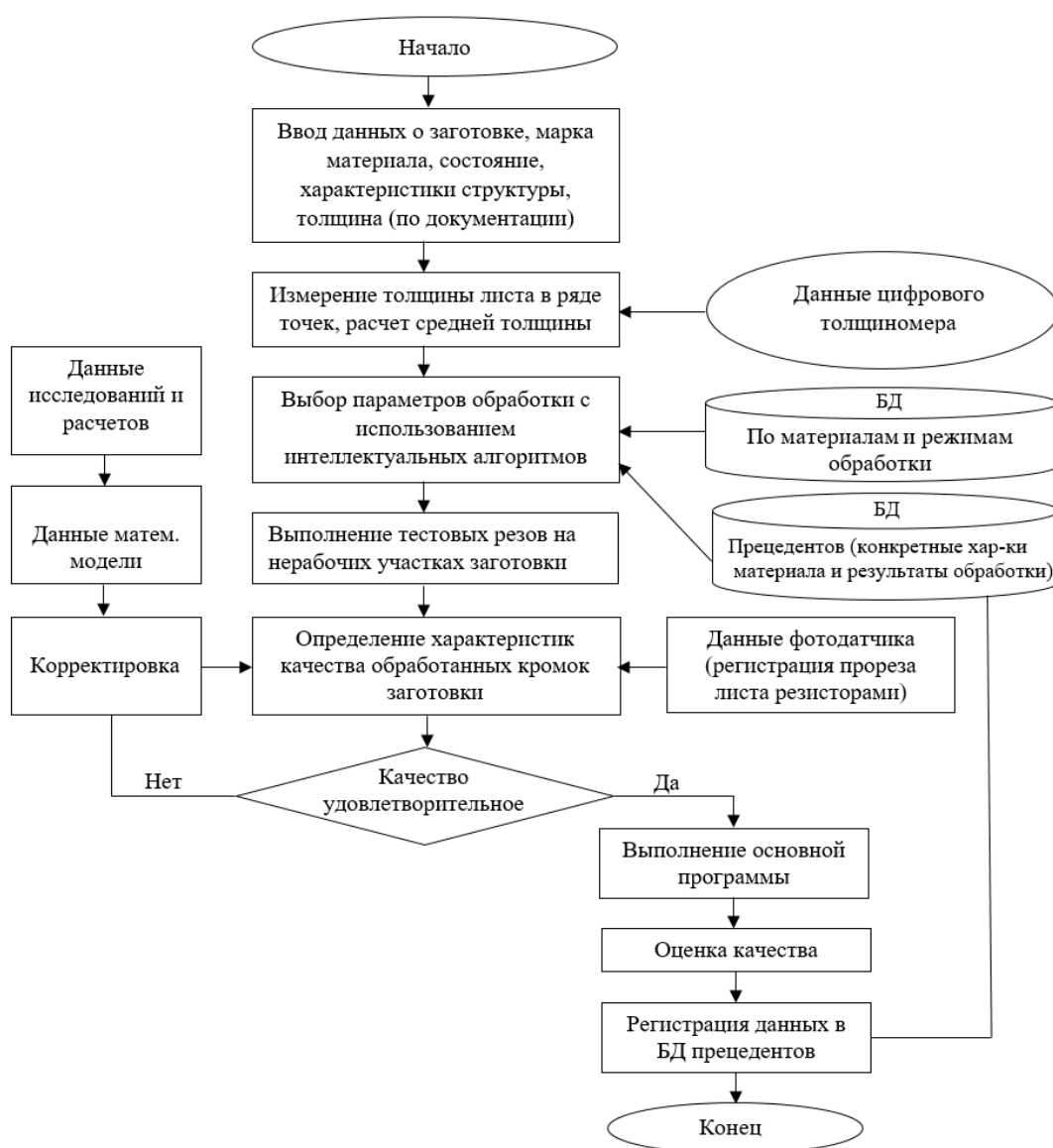


Рис. 4

В алгоритме работы лазерного станка с системой интеллектуальной поддержки определения параметров резания в качестве входных данных используется материал заготовки, толщина листа, данные

предыдущих резов и другие важные данные, позволяющие применить процесс раскроя металла с оптимальными параметрами мощности резания для минимизации зоны термического влияния [2].

Таким образом, с увеличением мощности резания для разных толщин металла толщина закалочных зон увеличивается. При неоптимальной настройке параметров резания лазерного станка существует большая вероятность возникновения избыточного термического влияния на кромки деталей, следствием чего являются микротрещины и разрушение деталей в эксплуатации.

Изменение твердости вызывает возникновение напряжений в зоне термического влияния, что может способствовать образованию микротрещин [3].

Применение алгоритмов работы лазерного станка с системой интеллектуальной поддержки определения параметров резания позволяет значительно снизить глубину закалочных зон и в конечном итоге повысить качество получаемых деталей.

Работа выполнена за счет 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 № 49/2024-ПД от 16.12.2024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минаев И.В. и др. Особенности строения зоны газолазерного термического влияния конструкционных легированных сталей марок 09Г2с и 20Х13 // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2022. № 10. С. 499–506.
2. Насыбуллин Ф.Ф. и др. Лазерный станок раскроя металла с интеллектуальной поддержкой определения оптимальных параметров мощности резания // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2023. № 4. С. 95–98.
3. Левашова Е.Л., Яковицкая М.В. Оптимизация режимов лазерной резки с целью уменьшения зоны термического влияния // Неделя науки СПбПУ: Материалы науч. конф. с междунар. участием, г. Санкт-Петербург, 13–19 нояб. 2017. СПб.: СПбПУ, 2017. Ч. 2. С. 241–243.

Поступила в редколлегию 21.03.25

INFLUENCE OF THE CUTTING POWER PARAMETERS OF LASER METAL CUTTING ON THE FORMATION OF THERMAL ZONES

L.N. Shafigullin, F.F. Nasybullin, and R.M. Khisamutdinov

The article presents the influence of laser cutting power for material thicknesses from 4 to 9.5 mm on the appearance of zones with hardening structures. The reasons for the occurrence of hardening structures are indicated. A solution has been proposed to reduce the size of hardening structures through the use of intelligent metal cutting algorithms with optimal laser cutting parameters.

Keywords: laser cutting, optimal cutting power parameters, cutting thickness, heat-affected zones, microhardness, intelligent support.

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

Насыбуллин Файль Фаритович – главный специалист (ПАО «КамАЗ», Набережные Челны)
E-mail: Fail-nf@mail.ru

Хисамутдинов Равиль Миргалимович – д-р техн. наук (Набережночелнинский филиал КФУ, Набережные Челны)
E-mail: sunniwind43@gmail.com

БАЗОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

В.Г. Анцев, Е.Г. Семенова, А.А. Русина

Рассмотрены возможности использования аэрогеофизических приборов в составе полезной нагрузки беспилотных летательных аппаратов. Сформулированы факторы, способствующие росту эффективности геофизических исследований при использовании средств авиационной робототехники. Рассмотрена специфика и аппаратные ограничения использования различных методов геофизических исследований при использовании беспилотных авиационных систем. Выполнена оценка состояния и перспектив совершенствования геофизических приборов, используемых в составе средств авиационной робототехники. Обоснован выбор программных средств обработки аэрогеофизических исследований.

Ключевые слова: геофизические исследования, аэрогеофизические приборы, авиационная робототехника, аэромагнитометрия, грави- и электроразведка, интерпретация результатов аэрогеофизических съемок, программные средства.

Совершенствование аэрогеофизических технологий в течение последнего десятилетия обусловлено существенным увеличением объемов их применения при проведении поисковых и разведочных работ по различным видам полезных ископаемых как на территории России, так и за ее пределами [1]. Главные факторы, обусловившие резкий рост эффективности аэрогеофизических работ, следующие [2, 3]:

- внедрение последних достижений электроники, высокоточной механики, лазерной и микропроцессорной техники в геофизическом приборостроении, что обеспечило возможность цифровой регистрации и обработки сигналов и позволило существенно увеличить помехозащищенность, чувствительность и разрешающую способность измерительных каналов [4];

- развитие спутниковых навигационных систем GPS и ГЛОНАСС, используемых для привязки результатов измерений, что увеличило точность плановой и высотной привязки результатов измерений [5];

- расширение комплекса аэрогеофизических методов с включением в него таких технологий, как аэрогравиметрия, новые модификации электромагнитной съемки, тепловая инфракрасная, газовая и аэрозольная съемки, а также разработка и внедрение принципиально новых систем обработки и интерпретации геофизических данных, базирующихся на использовании современной высокопроизводительной вычислительной техники.

В результате технологического прорыва аэрогеофизические методы исследования достигли уровня, позволяющего им успешно конкурировать с наземными аналогами по точности и пространственному разрешению, существенно превосходя их по производительности, экономической эффективности и другим параметрам, в том числе благодаря традиционным преимуществам аэрогеофизических методов исследований. К ним относятся высокая производительность, обеспечивающая оперативное охватывание обширных и труднодоступных территорий, в том числе со слаборазвитой инфраструктурой; объемность получаемых данных, обусловленная возможностью проведения съемок на различных высотных уровнях и интеграции аэрогеофизических и наземных результатов [6, 7]; возможность комплексирования методов при несущественном увеличении себестоимости (не более 10–15 % на каждый дополнительный канал), а также низкое техногенное воздействие на окружающую среду в процессе выполнения работ.

Целью исследования является оценка состояния и перспектив совершенствования геофизической приборной продукции, используемой в составе средств авиационной робототехники.

К настоящему времени накоплен значительный опыт проведения аэрогеофизических работ с помощью средств авиаробототехники [8]. Требования, предъявляемые к средствам авиаробототехники, существенно различаются в зависимости от применяемых технологий и условий съемки. Крайне трудно

подобрать носитель, оптимально удовлетворяющий требованиям различных аппаратурно-методических комплексов.

При традиционной аэросъемке большое внимание уделяется комплексности работ, что связано с высокой стоимостью услуг авиации. При использовании средств авиаробототехники это требование не столь критично. Традиционная аэрофотосъемка требует значительного внимания к организации комплекса мероприятий вследствие высоких затрат на авиационные услуги. Применение средств авиаробототехники снижает значимость данного требования. Предполагается, что при широком применении средств авиаробототехники значительно уменьшится влияние стоимости ее эксплуатации на стоимость проведения аэрогеофизических исследований [9]. В связи с этим варианты последовательного применения разного вида съемок при наземных геофизических исследованиях могут быть вполне конкурентоспособными.

Главные характеристики средств авиаробототехники – грузоподъемность, пределы изменения скорости и высоты полета, продолжительность автономного полета, максимальное удаление от пункта управления, электромагнитные помехи, создаваемые для измерительных каналов, и некоторые другие.

Рассмотрим специфические требования к средствам авиаробототехники, которые возникают при использовании геофизических и геохимических технологий.

1. Магниторазведка.

Является одним из самых нетребовательных к характеристикам носителя видов геофизической съемки. Вес и габариты современных магнитометрических датчиков позволяют устанавливать их на самые легкие средства авиаробототехники любого типа, с грузоподъемностью в несколько килограммов даже при использовании многодатчиковых (градиентометрических) схем измерений [10].

Частота опроса у квантовых датчиков не менее 10 отсчетов в секунду, что при скорости 100 км/ч соответствует 2,8 м пройденного пути, т. е. существенно меньше, чем шаг измерений при детальных наземных съемках масштабов 1:10 000 – 1:5000 (5–10 м). Высота полета также не слишком принципиальна для магнитной съемки и может составлять 5–200 м. На качество выполнения аэрогеофизических съемок, в том числе и аэромагнитометрии, существенно влияет внедрение спутниковых навигационных систем. Современные навигационные системы основаны на использовании приемников совмещенного созвездия GPS и ГЛОНАСС. Это позволяет добиться точности определения координат точек наблюдений в реальном времени в 10–20 м, а с использованием дифференциальной коррекции навигационных данных в режиме постобработки менее 1 м, что позволяет свести к минимуму искажения формы измеряемых аномалий, обусловленные ошибками в определении координат. Единственное специфическое требование заключается в необходимости удаления (с помощью штанг или трос-кабеля) датчиков от носителя как источника магнитных помех при выполнении прецизионных съемок, где принципиальным является картирование магнитных аномалий амплитудой 0,1...5 нТл [11]. В качестве носителя при выполнении аэромагнитометрической съемки с жестким креплением датчиков к фюзеляжу применимы все типы средств авиаробототехники. В этом случае, как правило, необходимо применение программно-математических методов компенсации магнитных помех носителя.

2. Гравитразведка.

Все современные российские и зарубежные аэрогравиметрические комплексы, используемые в настоящее время, имеют значительные массогабаритные характеристики (свыше 100 кг) и непригодны к установке на средства авиаробототехники легкого типа [12].

Вопрос о снижении массы аппаратурных комплексов актуален в связи с необходимостью перехода при проведении аэроработ на более легкие носители (как пилотируемые, так и беспилотные) для повышения экономической эффективности съемок [13, 14].

В настоящее время для создания малогабаритных аэрогравиметров и гравитационных градиентометров предлагается технология инерционной и/или спутниковой навигации INS/GNSS (ИНС/СНС). Данная технология уже тестируется в полевых условиях с использованием средств авиаробототехники с грузоподъемностью около 10 кг [15, 16]. Носитель для гравитационного комплекса должен выполнять съемки на небольшой скорости, иметь при полете минимальное рысканье по курсу и высоте.

3. Электроразведка.

В отличие от магниторазведки и гравиразведки, электроразведочный метод реализуется в виде множества модификаций, различающихся способами возбуждения и регистрации электромагнитного поля, а также измеряемыми параметрами [17]. Как правило, аппаратные комплексы, используемые в электроразведке, характеризуются значительными размерами и массой, снижение которых приводит к резкому уменьшению регистрируемого сигнала и глубинности исследований.

В настоящее время активно ведется разработка электроразведочных комплексов, ориентированная на использование средств авиаробототехники. Наиболее перспективны технологии, использующие в качестве источника естественные электромагнитные поля [17].

Низкочастотные методы измерения естественных электромагнитных полей находятся в стадии разработки. Перенос этих технологий на беспилотные воздушные суда осложняется значительным весом приемных устройств и необходимостью существенного удаления их от носителя, являющегося источником электромагнитных помех.

Наиболее перспективно применение при нефте- и газовых работах комбинированных методов, при которых источник возбуждения (линейный кабель или петля) расположен на поверхности земли, а приемное устройство – на средстве авиаробототехники [17]. При такой схеме измерений достигается необходимая глубина исследований при существенном повышении производительности съемки. Очевидно, что при реализации такой схемы измерений носитель должен иметь маневренность, возможность работать на небольшой высоте с низкой скоростью и с использованием подвесных устройств.

4. Гамма-спектрометрия.

Современные аэрогамма-спектрометры – это громоздкие и тяжелые аппаратные комплексы. Значительная масса и габариты аппаратуры обусловлены в первую очередь большим объемом и весом детекторов-сцинтилляторов (обычно около 50 л, не менее 200 кг), регистрирующих спектр излучения природных и техногенных радионуклидов [18].

Наиболее распространенными детекторами в настоящее время являются сцинтилляционные кристаллы NaI(Tl), реже CsI(Tl). Известны также различные типы органических и неорганических сцинтилляторов, а также полупроводниковые детекторы. Перспективны для применения в малогабаритных спектрометрах полупроводниковые детекторы из особо чистого германия и CdZnTe-детекторы, а также неорганические кристаллы BGO (ортогерманата висмута $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) [18].

Для технологии гамма-спектрометрической съемки с беспилотного воздушного судна принципиально важно выполнение работ на малой высоте и с низкой скоростью.

5. Геохимическая съемка.

Современные трассовые газоанализаторы и анализаторы аэрозолей имеют небольшие габариты и могут быть размещены на легких средствах авиаробототехники. Так как ореолы рассеяния в атмосферном воздухе элементов индикаторов залежей углеводородов имеют очень низкую контрастность, то измерения следует проводить на предельно малых высотах и при низкой скорости носителя.

Перспективен также метод дистанционного оптического газового анализа с помощью лидара для регистрации предельно малых концентраций тяжелых углеводородов. Имеющиеся опытные образцы подобной аппаратуры, опробованные на пилотируемых носителях, имеют вес около 60 кг.

6. Геоморфологические исследования.

Имеющаяся на рынке аппаратура для пассивных видов геоморфологических исследований не предъявляет жестких специфических требований к средствам авиаробототехники. Аппаратура достаточно компактна и может применяться на скоростных носителях и на разных высотах. В последнее время для съемки местности активно применяют лидары, которые также имеют небольшие массогабаритные характеристики и могут использоваться с любыми типами носителей [19].

Указанные специфические особенности программно-аппаратных комплексов определяют выбор типа и параметров средств авиаробототехники при реализации аэрогеофизических технологий.

Для интерпретации материалов аэрогеофизических съемок на основании анализа практического опыта обработки космической, геолого-геофизической и геохимической информации используются ори-

гинальные алгоритмы и пакеты программных средств, из которых достаточно широко применяется пакет программ СИГМА-3Д [20], включающий шесть модулей:

- ROMGAS (оценка морфологии субгоризонтальных границ раздела);
- REIST (автоматизированное моделирование гравитационного и магнитного полей);
- DVOP (вычисление объемного распределения эффективных параметров (плотности и намагниченности));
- CLASS 2 (интерактивная классификация двупараметровых пространственно распределенных данных);
- OPRES (распознавание аномалий заданной формы, в том числе комплексных);
- QUA SI (количественная интерпретация магнитных аномалий методом подбора квазиэквивалентного решения).

Пакет программ используется при интерпретации комплексных геофизических данных для решения следующих геологических задач, решаемых при поисковых работах на углеводородное сырье:

- структурно-вещественное картирование и изучение внутреннего строения метаморфического фундамента платформ;
- разделение аномальных полей от пород фундамента и осадочного чехла;
- обнаружение следов миграции углеводородов по изменениям петрофизических характеристик вмещающих осадочных пород;
- обнаружение и картирование нефтегазоперспективных структур на основе мультипольного подхода.

Базовым направлением совершенствования технологий геофизических исследований с помощью средств авиаробототехники является уменьшение значений массогабаритных характеристик используемой приборной продукции, что позволит последовательно снижать требования, предъявляемые к авианосителям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лаптев В.В. Российский геофизический рынок // Геофизический вестник. 2016. № 4. С. 4–8.
2. Никитин А.А. Детерминированность и вероятность в обработке и интерпретации геофизических данных // Геофизика. 2004. № 3. С. 10–16.
3. Бычков С.Г., Симонов А.А. Эволюция программно-алгоритмического обеспечения обработки и интерпретации гравиметрических материалов // Горное эхо. 2007. № 2 (28). С. 38–42.
4. Кирсанов В.Н., Филимонов В.В. Современные аэрогеофизические комплексы и перспективы их развития // Разведка и охрана недр. 2003. № 4. С. 20–23.
5. Ессин С., Костюк А. Выбор параметров аэрофотосъемки для картографирования с БПЛА // Земельный вестник Московской области. 2012. № 7. С. 14–19.
6. Костюк А.С. Расчет параметров и оценка качества аэрофотосъемки с БПЛА [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-parametrov-i-otsenka-kachestva-aerofotosemki-s-bpla/viewer> (дата обращения: 14.12.2024).
7. Асламов Ю.В. и др. Методические рекомендации по проведению комплексных аэрогеофизических съемок [Электронный ресурс]. URL: https://karpinskyinstitute.ru/ru/about/nrs/gphs/met_rec-aero.pdf (дата обращения: 14.12.2024).
8. Паришин А.В., Цирель В.С., Ржевская А.К. Методические рекомендации по выполнению маловысотной аэромагнитной съемки с применением БПЛА. М.: Изд-во ВИМС, 2018. 32 с.
9. Коротков В.В. и др. Съемки с использованием беспилотных летательных аппаратов – новый этап развития отечественной аэрогеофизики // Российский геофизический журнал. 2021. № 53–54. С. 122–125.
10. Цирель В.С. Аэромагнитная градиентометрия. Достоинства и недостатки // Материалы международной школы-семинара по проблемам палеомагнетизма и магнетизма горных пород. Казань: Казан. ун-т, 2013. С. 231–236.
11. Аверкиев В.В. и др. Компенсация магнитных помех авиационных носителей // Разведка и охрана недр. 2001. № 9. С. 52–58.
12. Серкеров С.А. Гравиразведка и магниторазведка. М.: Недра, 2006. 437 с.
13. Бровар Б.В., Гусев Н.А., Юркина М.И. О развитии гравиметрических работ в интересах геодезии // Геодезия и картография. 2005. № 6. С. 9–16

14. Бержицкий В.Н. и др. Инерциально-гравиметрический комплекс МАГ-1 (GT-1A). Опыт разработки и результаты летных испытаний // Гироскопия и навигация. 2002. № 3 (38). С. 104–116.
15. Голован А.А., Вязьмин В.С. Методика проведения аэрогравиметрических съемок и обработки первичных данных бескарданного аэрогравиметра // Гироскопия и навигация. 2023. № 1 (120). С. 58–75.
16. Афонин А.А. и др. О возможности построения бесплатформенного управляющего навигационно-гравиметрического комплекса беспилотного летательного аппарата // Тр. МАИ [Электронный журнал]. 2013. № 66. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=40812> (дата обращения: 14.12.2024).
17. Приходько А.Ю. Аэроэлектроразведка: возможности, состояние и перспективы // Разведка и охрана недр. 2005. № 12. С. 73–79.
18. Кирсанов В.Н., Филимонов В.В. Современные аэрогеофизические комплексы и перспективы их развития // Разведка и охрана недр. 2003. № 4. С. 20–23.
19. Нугманов И.И., Нугманова Е.В., Чернова И.Ю. Основы морфометрического метода поиска неотектонических структур. Казань: Казан. ун-т, 2016. 53 с.
20. Трофимов Д.М., Евдокименков В.Н., Шуваева М.К. Современные методы и алгоритмы обработки и анализа комплекса космической, геолого-геофизической и геохимической информации. М.: Физматлит, 2012. 320 с.

Поступила в редколлегию 14.01.25

BASIC DIRECTIONS OF AEROGEOPHYSICAL DEVICES DEVELOPMENT

V.G. Antsev, E.G. Semenova, and A.A. Rusina

The possibilities of use aerogeophysical devices as part of UAV payload are considered. The factors contributing to increase efficiency of geophysical research with use of aviation robotics are formulated. Specifics and hardware limitations for various geophysical research methods with use of unmanned aviation systems are considered. Estimation of the state and prospectives for improvement of geophysical devices being the part of aviation robotics is made. The kind of software for aerogeophysical research processing is justified.

Keywords: geophysical research, aerogeophysical devices, aviation robotics, aeromagnitometry, gravity- and electrical reconnaissance, interpretation of aerogeophysical photography, software.

Анцев Василий Георгиевич – директор (АО «НПП “Радар ммс”», Санкт-Петербург)
E-mail: ancev_vg@rddar-mms.com

Семенова Елена Георгиевна – д-р техн. наук (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург)
E-mail: egsemenova@mail.ru

Русина Алена Андреевна – начальник Центра (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург)
E-mail: rusina_aa@voenmeh.ru

РИСКИ МОДЕРНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В.М. Балашов, А.А. Русина

Рассматриваются вопросы информационного обеспечения систем подготовки операторов беспилотных транспортных средств как совокупности технических и программных средств. Проводится оценка взаимосвязи рисков неэффективности средств информационного обеспечения от интеграции в их состав электронного контента и потребительского качества указанных средств. Предлагается рекурсивная модель оценки рисков, учитывающая итеративность анализа рисков и их изменений.

Ключевые слова: риски, итеративная оценка рисков, риск-менеджмент, беспилотные транспортные средства.

Создание и эксплуатация беспилотных транспортных средств является в настоящее время базовым трендом развития во многих отраслях народного хозяйства. Стремительное освоение автономных технологий и беспилотных транспортных систем стало фактически революционным для российских производственных предприятий и научных организаций. Все это обусловлено широкими возможностями получения разнородной мониторинговой информации, получаемой от комплекса полезной нагрузки, размещаемой на борту беспилотного транспортного средства [1].

Состав полезной нагрузки определяется конкретными задачами, поставленными перед оператором беспилотных транспортных средств, включает оборудование и приборные средства управления, навигации и энергообеспечения носителя. Для выполнения целевых задач беспилотное транспортное средство оснащается телекоммуникационными каналами информационного обмена, вычислительными средствами предварительной обработки информации от собственных датчиков, целым комплексом приборной аппаратуры.

В качестве примера приведем основные методы геофизических и геохимических методов исследования в составе беспилотного комплекса: оптическая локация, радиолокация, магниторазведка, гравиразведка, электроразведка, гамма-спектрометрия, геохимическая съемка, геоморфологические исследования. Существуют объективные требования по размещению такой приборной аппаратуры на борт беспилотного воздушного судна, минимизирующие взаимные электромагнитные, магнитные механические и иные помехи, в том числе и за счет режимов бланкирования информационных и коммуникационных каналов.

Широкий и неоднородный состав приборной, оптической, энергетической, приемопередающей аппаратуры дополняется и соответствующим разнородным информационно-методическим обеспечением, включающим геоинформационное описание исследуемых поверхностей, соответствующие базы данных, интерактивные электронные технические руководства как по самому беспилотному транспортному средству, так и по входящей в его состав приборной нагрузке, порядок эксплуатации и ремонта, алгоритмы и программные средства нормализации и обработки измерительной информации.

Фактически беспилотное транспортное средство с установленной на нем приборной нагрузкой следует рассматривать в конструктивно-информационном смысле как единый комплекс, предназначенный для решения конкретной народнохозяйственной задачи, а единый процесс подготовки операторов беспилотных транспортных средств должен быть распространен как на сам беспилотный носитель, так и на комплекты используемой приборной продукции.

Комплексы информационно-методического обеспечения подготовки операторов беспилотных транспортных средств представляют собой сложный класс средств поддержки специалистов по применению средств транспортной робототехники и приборной продукции. Затруднен технологический процесс разработки и создания конкретных средств указанного обеспечения, соответствующая технологическая система проектирования и программирования, а также комплексирование их составных частей с ап-

паратной платформой, специализированными базами данных и т. д. Известны примеры различных технологий разработки информационного обеспечения для систем подготовки операторов беспилотных транспортных средств, к которому относятся структурированные массивы специализированных данных с гетерогенной формой представления [2–4]. Именно из-за гетерогенности форм представления таких данных (т. е. использования различных форм представления информации – текстовой, аудио-, видео-, мультимедиа- и пр., различных форматов электронного доступа и хранения данных, различных способов структурирования и подачи информации и т. д.) возникают риски для процесса создания информационно-методического обеспечения указанного вида подготовки. Такие риски характеризуются итеративно-многократным характером процесса выявления, снижения и локализации при разработке функционала описанного вида обеспечения подготовки операторов беспилотных транспортных средств с требуемым уровнем качества. В терминологии работ [5–7] все указанные виды и подвиды рисков разработки средств рассматриваемого информационного обеспечения предусматривают возможность их оценки и локализации в рамках спиральной модели разработки, в отличие от более простых видов такого обеспечения, когда могут реализовываться более традиционные, последовательно-каскадные модели создания соответствующих средств подготовки.

Интегральный процесс оценки и учета рисков при создании средств информационного обеспечения подготовки операторов беспилотных транспортных средств, реализующий спиральную модель разработки, включает соответствующие инструменты (методы, метрики, методики, модели и пр.) такой оценки. Однако, в отличие от классических средств и методов риск-менеджмента, указанные инструменты ориентированы не на получение заключения о достигнутом уровне рисков недостижения целей создания, в том числе от некорректного внедрения материалов электронного контента, а на получение локального заключения о текущей тенденции в изменениях уровня такого риска при логическом переходе к следующей рекурсивной итерации (шагу, этапу и т. п.) процесса разработки; на выявление отдельных аномалий в качестве создаваемого программно-информационного изделия, определяющих указанные риски.

Суть взаимосвязи рисков неэффективности средств информационного обеспечения подготовки операторов беспилотных транспортных средств от интеграции в их состав электронного контента и потребительского качества указанных средств показано на рис. 1.

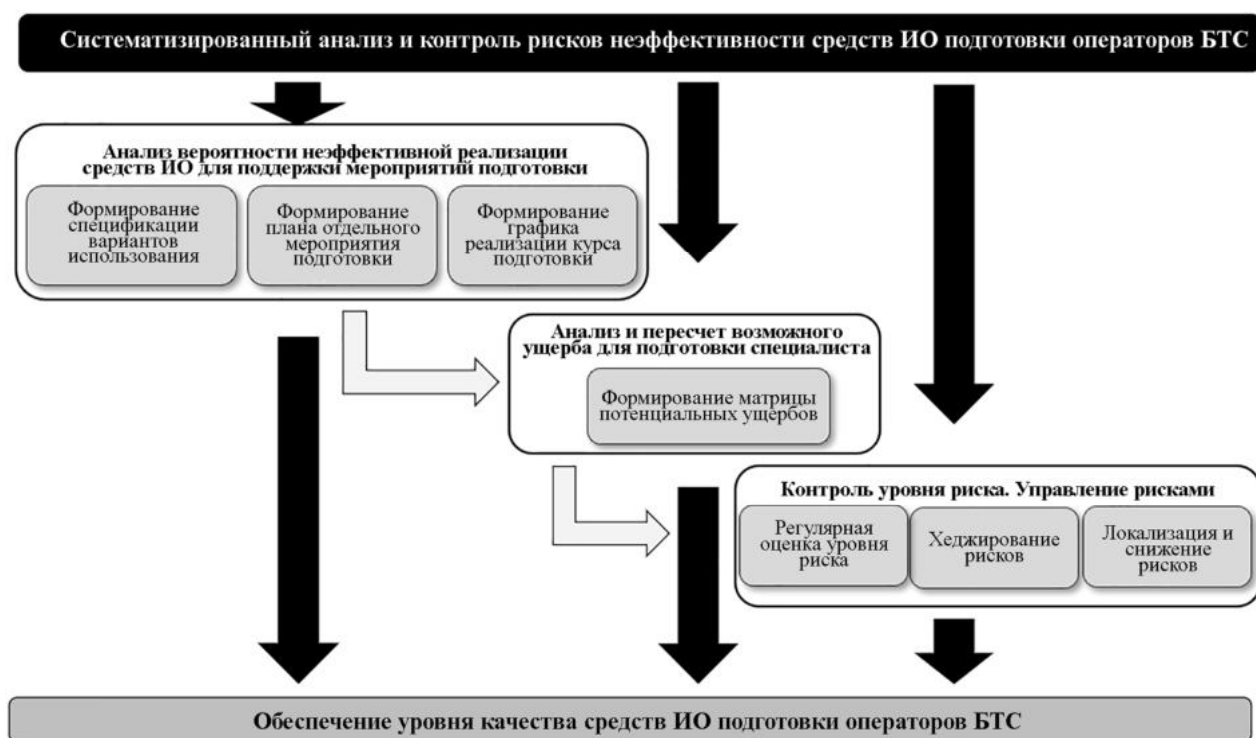


Рис. 1

Указанную ориентированную направленность будем называть итеративной, т. е. направленной на итеративно-рекурсивный характер самой технологии разработки и формирования требуемого качества средств информационно-методического обеспечения подготовки операторов беспилотных транспортных средств, когда каждая очередная оценка текущего уровня рисков выражается через свое предыдущее значение. Именно в учете итеративности анализа рисков и их изменений заключается конструктивная суть предлагаемой модели оценки рисков интеграции учебного электронного контента в информационное обеспечение систем подготовки беспилотных транспортных средств.

Наглядно суть рекурсивной итеративности предлагаемой модели оценки, как инструментария хеджирования рисков интеграции учебного электронного контента в информационное обеспечение систем подготовки операторов беспилотных транспортных средств, отражена на схеме реализации технологического процесса разработки средств указанного обеспечения (рис. 2).

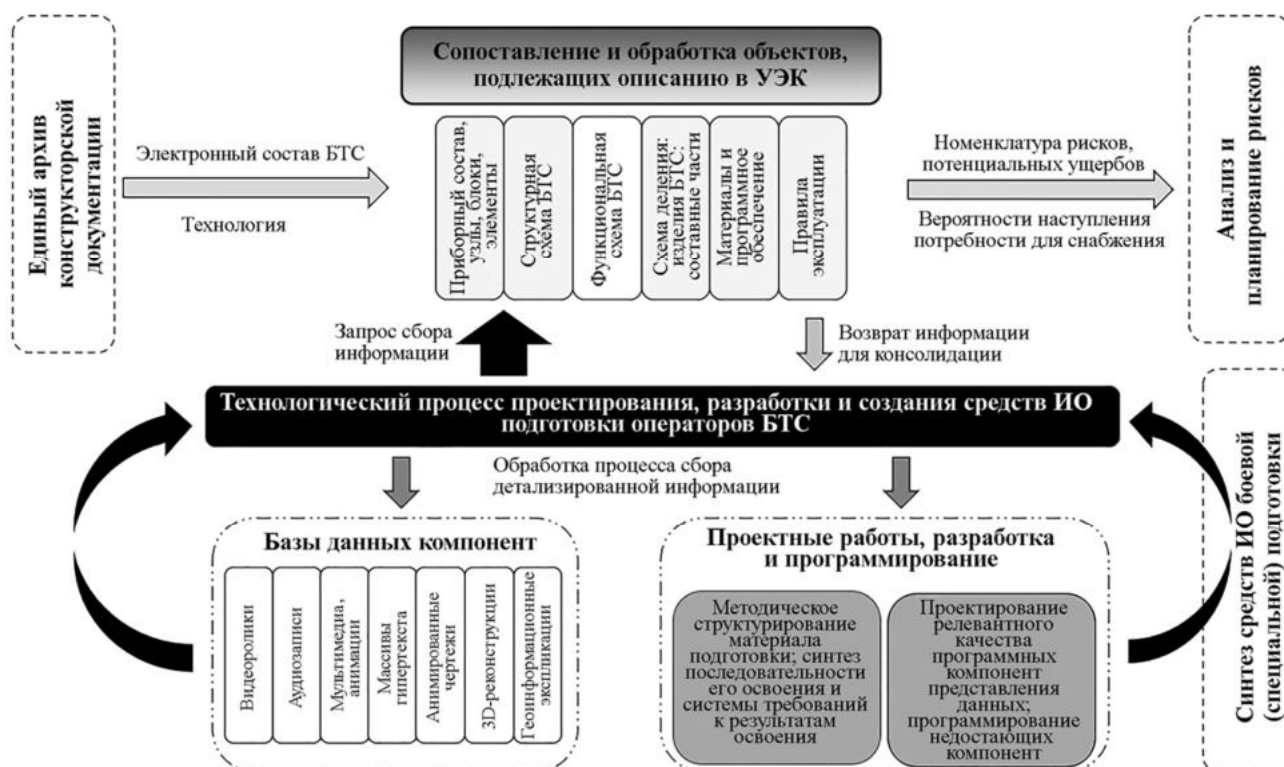


Рис. 2

Основным смысловым элементом реализации процесса разработки, определяющим возможности как по последовательному выявлению, так и по локализации рисков низкой эффективности, является логический блок проведения проектных работ, разработки и программирования при синтезе средств информационного обеспечения подготовки операторов беспилотных транспортных средств. Суть подпроцессов и логических взаимосвязей в данном логическом блоке, определяющая возникновение и локализацию рисков неэффективности, уточнена на рис. 3. При этом система разработки средств информационного обеспечения систем подготовки операторов беспилотных транспортных средств в данном исследовании рассматривается как структурированная совокупность технических и программных средств разработки программного кода и информационного контента для указанных систем, дополнительной технологической оснастки, разработчиков (инженеров-программистов, программистов-кодировщиков, программистов-системных архитекторов, исполнителей и пр.), управленческого персонала, методик реализации базовых процессов разработки и формирования массивов программного обеспечения и функциональных связей между ними, нацеленных на исполнение в заранее регламентированных условиях промышленной разработки технологических работ, способов и приемов программирования.



Рис. 3

Современные методологические инструменты оценки рисков разработки средств информационно-методического обеспечения подготовки операторов беспилотных транспортных средств ориентированы не на использование классических методов и метрик риск-менеджмента [8–10], а на динамичное применение итеративных (т. е. рекурсивно-инкрементальных, пошаговых) методик, моделей в рамках доминирующей спиральной модели разработки программно-информационных средств [5–7]. Совокупность частных требований, проектных приемов и решений, предусматриваемых в покомпонентной архитектуре средств информационного обеспечения систем подготовки операторов беспилотных транспортных средств, при проектировании и создании указанных систем должна обеспечивать эффективное и предметно-обусловленное формирование навыков управления, технического обслуживания объектов транспортной робототехники, входящих в различные разнородные роботизированные группировки. Приблизительно-рамочный характер риск-анализа в таком варианте оценки компенсируется многократностью (итеративностью) проведения процедур оценки указанных рисков над одними и теми же компонентами кода соответствующего средства подготовки операторов беспилотных транспортных средств в процессе их проектирования, разработки, валидации и верификации.

Таким образом, по результатам исследования можно сделать вывод о том, что модель оценки рисков интеграции учебного электронного контента в информационное обеспечение систем подготовки операторов беспилотных транспортных средств с приборной нагрузкой должна разрабатываться как модель итеративной оценки, а значит, с ориентацией на ее использование в базовой технологии разработки средств указанного обеспечения, основанной на спиральной схеме разработки программно-информационного обеспечения систем тренажерной подготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротков В.В. и др. Съемки с использованием беспилотных летательных аппаратов – новый этап развития отечественной аэрогеофизики // Российский геофизический журнал. 2021. № 53–54. С. 122–125.
2. Баркалая Г.О., Милованов В.Г., Свиринов С.К. Принципы формирования системы единых критериев эффективности // Методы определения состава и оценки боевой эффективности ВМФ: Науч.-техн. сб. М.: МО СССР, 1991. № 50. С. 9–19.

3. Печников А.Н. Теоретические основы психолого-педагогического проектирования автоматизированных обучающих систем. Петродворец: ВВМУРЭ им. А.С. Попова, 1995. 322 с.
4. Подколызин А.Я., Петрова И.И. Основы организационного поведения. Курс лекций для студентов по специальности «Управление персоналом». СПб.: Изд-во ЦСИ, 2010. 130 с.
5. Губинский А.И. Надежность и качество функционирования эргатических систем. Л.: Наука, 1982. 222 с.
6. ДеМарко Т., Листер Т. Вальсируя с медведями. Управление рисками в проектах по разработке программного обеспечения. М.: Изд. дом ДН, 2005. 196 с.
7. ДеМарко Т. Deadline. Роман об управлении проектами. М.: Манн-Иванов-Фербер, 2016. 352 с.
8. Дюваль П.М., Матиас С., Гловер Э. Непрерывная интеграция. Улучшение качества программного обеспечения и снижение риска. СПб.: Символ, 2016. 240 с.
9. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31000-2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство. М.: Стандартинформ, 2020. 26 с.
10. ГОСТ Р 51 901.2-2005. Менеджмент риска. Системы менеджмента надежности. М.: Стандартинформ, 2005. 74 с.

Поступила в редколлегию 14.01.25

RISKS OF MODERNISATION OF INFORMATION SUPPORT FOR UNMANNED VEHICLE OPERATORS TRAINING

V.M. Balashov and A.A. Rusina

Article considers the issues of information support for training systems for unmanned vehicle operators as a set of hardware and software. The interrelation between the risks of inefficiency of information support means from the integration of electronic content into their composition and consumer quality of these means are assessed. A recursive risk assessment model is proposed that takes into account the iterative nature of risk analysis and their changes.

Keywords: risks, iterative risk assessment, risk management, unmanned aviation vehicles.

Балашов Виктор Михайлович – д-р техн. наук (АО «НПП “Радар ммс”», Санкт-Петербург)
E-mail: balashov_vm@radar-mms.com

Русина Алена Андреевна – начальник Центра (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург)
E-mail: rusina_aa@voenmeh.ru

МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ КАНАЛОВ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА

Е.С. Ефремова, Б.И. Мифтахов, В.В. Солдаткин, В.М. Солдаткин

Отмечены перспективность и особенности построения, рассмотрены аналитические модели системы измерения воздушных параметров движения летательного аппарата на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока. Построена структурная схема, предложена методика и получены аналитические модели операторных чувствительностей измерительных каналов рассматриваемой системы измерения воздушных параметров движения летательного аппарата. На примере канала измерения истинной воздушной скорости получены аналитические модели для определения собственных и вынужденных динамических погрешностей канала при типовых детерминированных и случайных изменениях входного сигнала с наложенной стационарной помехой. Отмечено, что полученные результаты позволяют решать задачи анализа и синтеза измерительных каналов системы по критериям динамической точности с использованием оптимального линейного фильтра Винера.

Ключевые слова: летательный аппарат; движение; воздушные параметры; система измерения; ультразвуковой, набегающий поток; динамические погрешности; каналы; модели.

При пилотировании, автоматическом управлении и обеспечении безопасности движения самолетов и других летательных аппаратов (ЛА) различного класса и назначения в пределах атмосферы необходима информация о воздушных параметрах движения относительно окружающей среды [1–3]. Значительное число автономных приемников и датчиков параметров набегающего воздушного потока, распределенных по фюзеляжу и связанных пневмопроводами и электрическими кабелями с бортовым вычислителем традиционной системы измерения воздушных параметров движения, широко используемой на самолетах, усложняет конструкцию, увеличивает массу и стоимость, из-за чего ограничивается ее применение на малоразмерных пилотируемых, беспилотных и дистанционно пилотируемых ЛА. Это определяет перспективность разработки рассматриваемой в работах [4, 5] системы измерения воздушных параметров движения ЛА на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего потока с одним интегрированным неподвижным приемником набегающего потока и встроенным вычислителем.

Согласно функциональной схеме [6] система измерения воздушных параметров движения ЛА на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего потока включает измерительный канал параметров вектора истинной воздушной скорости и измерительный канал высотно-скоростных параметров.

Канал измерения параметров вектора истинной воздушной скорости включает совмещенные пары ультразвуковых излучателей-приемников И1–П1, И2–П2 и И1'–П1', И2'–П2', оси распространения ультразвуковых колебаний которых расположены в плоскости измерения угла скольжения под углом $\Theta_0 = 45^\circ$ к оси, параллельной продольной оси ЛА. Другие пары И3–П3, И4–П4 и И3'–П3', И4'–П4' установлены в плоскости изменения угла атаки, и их оси распространения ультразвуковых колебаний расположены под углом $\varphi_0 = 45^\circ$ к оси, параллельной продольной оси ЛА в плоскости изменения угла атаки.

Как показано [6], работа ультразвуковых каналов измерения скорости и углов направления вектора скорости набегающего воздушного потока основана на регистрации интервалов времени распространения ультразвуковых колебаний от пьезоэлектрических излучателей до соответствующих пьезоэлектрических приемников по направлению набегающего потока и против потока и преобразовании интервалов времени в частоты формирования выходных колебаний на выходах приемников. При этом измерение информативных частот на выходах приемников и их разностей и определение истинной воздушной ско-

рости V_b , аэродинамических углов скольжения β и атаки α осуществляется непосредственно в вычислителе, формирующем выходные сигналы системы, в соответствии с аналитическими моделями вида

$$V_b = \frac{L}{2} \sqrt{\Delta f_1^2 + \Delta f_2^2}; \quad (1)$$

$$\beta = \arctg \frac{\Delta f_1 - \Delta f_2}{\Delta f_1 + \Delta f_2}; \quad (2)$$

$$\alpha = \arctg \frac{\Delta f_3 - \Delta f_4}{\Delta f_3 + \Delta f_4}, \quad (3)$$

где L – расстояние между излучателями и приемниками ультразвуковых измерительных каналов; $\Delta f_1 = f_1 - f'_1$; $\Delta f_2 = f_2 - f'_2$; $\Delta f_3 = f_3 - f'_3$; $\Delta f_4 = f_4 - f'_4$ – разности частот f_1, f_2, f_3, f_4 выходных сигналов приемников, регистрирующих ультразвуковые колебания измерительных каналов, распространяющихся по направлению набегающего потока, и частот f'_1, f'_2, f'_3, f'_4 выходных сигналов приемников, регистрирующих ультразвуковые колебания, распространяющиеся против направления потока.

На выходе вычислителя формируются цифровые выходные сигналы $N_{V_b}, N_\beta, N_\alpha$ измерительного канала вектора истинной воздушной скорости системы.

Для получения информации о высотнo-скоростных параметрах движения ЛА на обтекаемой набегающим воздушным потоком плите интегрированного приемника потока расположено отверстие для восприятия статического давления P_H набегающего воздушного потока на текущей барометрической высоте полета H . Для снижения возможных пульсаций воспринимаемого давления P_H отверстие для восприятия статического давления соединено с термоизолированной от окружающей среды глухой камерой, в которой установлен чувствительный элемент датчика температуры торможения T_T (ДТТ) набегающего воздушного потока. Полость глухой камеры с давлением P_H соединена со входом датчика абсолютного давления (ДАД). По измеренной в ультразвуковом измерительном канале истинной воздушной скорости V_b , выходным сигналам датчика абсолютного давления и датчика температуры торможения, подаваемым на вход вычислителя, на его выходе по аналитическим моделям в соответствии с ГОСТом [7] определяются высотнo-скоростные параметры движения ЛА.

Абсолютная (барометрическая) высота H в диапазоне $-2000 \dots 11000$ м определяется по выражению [8]

$$H = \frac{T_0}{\tau} \left[1 - \left(\frac{P_H}{P_0} \right)^{R\tau} \right]; \quad (4)$$

вертикальная воздушная скорость V_y определяется по производной абсолютной (барометрической) высоты следующим образом:

$$V_y = \frac{dH}{dt} \approx \frac{H(t_i) - H(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} = \frac{1}{4\Delta t} [H(t_i) - H(t_i - 2\Delta t) + H(t_i - \Delta t) - H(t_i - 3\Delta t)]; \quad (5)$$

приборная скорость определяется по выражению [9]

$$V_{пр} = \sqrt{\frac{P_H T_0}{P_0 T_H}} V_b; \quad (6)$$

число Маха определяется по аналитической модели [9]

$$M = \frac{V_b}{\sqrt{kgRT_H}}; \quad (7)$$

температура наружного воздуха на текущей абсолютной (барометрической) высоте определяется по выражению [8]

$$T_H = \frac{T_T}{1 + 0,2\xi M^2}; \quad (8)$$

плотность воздуха на текущей абсолютной (барометрической) высоте определяется по аналитической модели [10]

$$\rho_H = \rho_0 \frac{P_H T_0}{P_0 T_H}. \quad (9)$$

Здесь: $T_0 = 288,15$ К, $P_0 = 101325$ Па, $\rho_0 = 1,225$ кг/м³ – абсолютная температура, статическое давление и массовая плотность воздуха на абсолютной (барометрической) высоте $H = 0$ стандартной атмосферы по ГОСТу [7]; $\tau = 0,0065$ К/м, $R = 29,27125$ м/К – температурный градиент и газовая постоянная воздуха; Δt , t_i – интервал времени, через который вычисляется абсолютная (барометрическая) высота и момент времени текущего i -го отсчета; $k = 1,4$, $g = 9,80665$ м/с² – показатель адиабаты для воздуха и ускорение силы тяжести; $\xi = 0,98 \div 1,02$ – коэффициент торможения воздуха скользящей поверхности приемной плиты.

Полученные аналитические модели позволили получить аналитические модели методических и инструментальных погрешностей измерительных каналов системы измерения воздушных параметров движения ЛА на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего потока [5, 11], которые являются основой для построения аналитических моделей динамических погрешностей измерительных каналов системы.

Исследование динамических характеристик и погрешностей измерительных каналов приборов и систем проводится с использованием операторных чувствительностей входящих функциональных элементов [12].

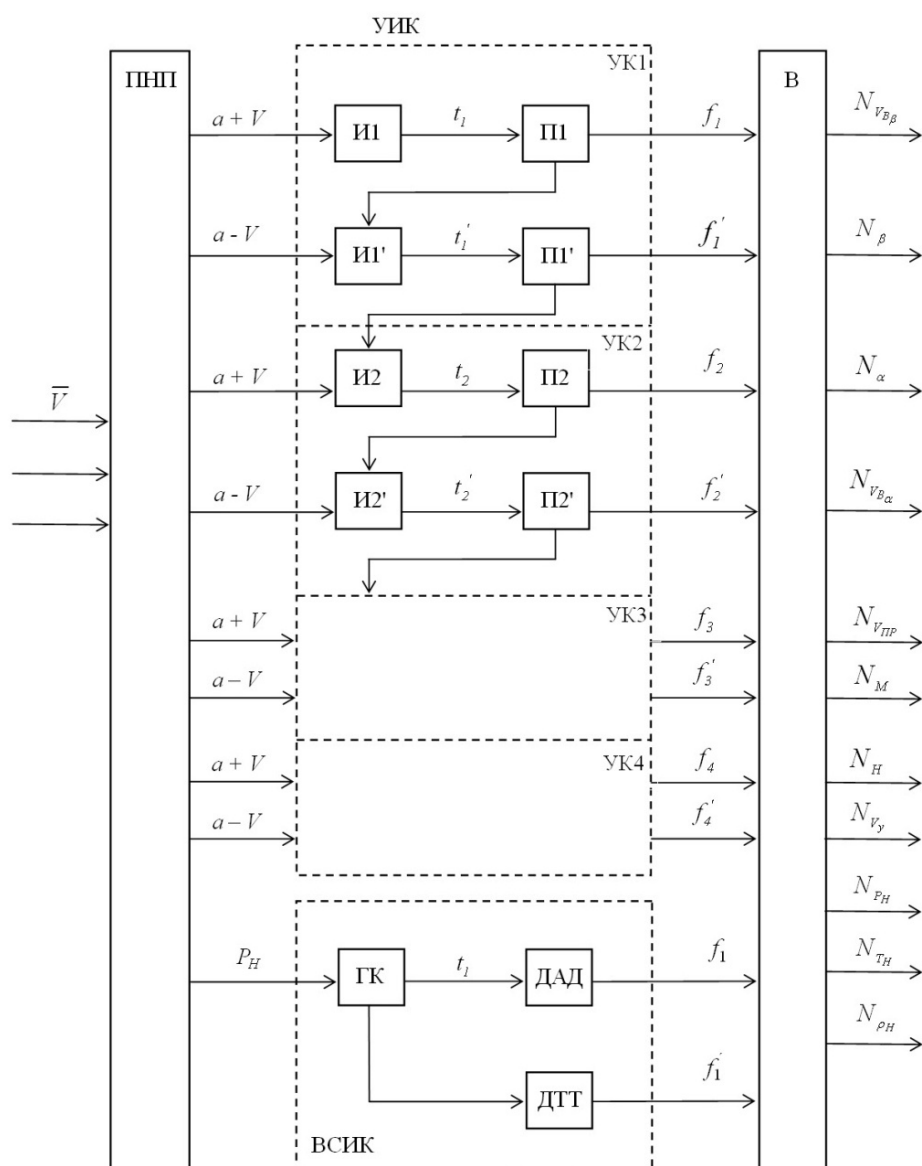
Для определения операторных чувствительностей измерительных каналов рассматриваемой системы измерения воздушных параметров движения ЛА разработана структурная схема системы (рисунок), определяющая цепи преобразования входных информативных сигналов измерительных каналов в выходные параметры рассматриваемой системы, с учетом операторных чувствительностей функциональных элементов, определяющих их динамические характеристики.

Величина (модуль) V и углы направления вектора \vec{V} скорости набегающего воздушного потока воспринимаются интегрированным неподвижным приемником набегающего потока (ПНП), параметры которого контролируются двумя измерительными каналами – ультразвуковым измерительным каналом (УИК), измеряющим истинную воздушную скорость $V_{\text{в}}$ и аэродинамические углы скольжения β и атаки α . В высотно-скоростном измерительном канале (ВСИК) с использованием информации по истинной воздушной скорости $V_{\text{в}}$ обеспечивается измерение приборной скорости $V_{\text{пр}}$ и числа Маха, а также абсолютной (барометрической) высоты H , вертикальной скорости V_y , статического давления P_H , температуры наружного воздуха T_H и плотности воздуха ρ_H на текущей барометрической высоте полета H .

Ультразвуковой измерительный канал включает два ультразвуковых канала – УК1 и УК2.

Канал УК1 включает два совмещенных ультразвуковых излучателя – приемника И1–П1 и И1'–П1', регистрирующих скорость распространения ультразвуковых колебаний по направлению набегающего потока, равную $a + V$, и против потока – $a - V$, где a – скорость распространения ультразвука в воздухе. При этом оси распространения ультразвуковых излучателей И1 и И1' до приемников П1 и П1' находятся в плоскости изменения угла скольжения. По частотам f_1 , f_1' выходных ультразвуковых колебаний на выходах приемников П1 и П1', обрабатываемых вычислителем (В), по аналитической модели (1) определяется и формируется цифровой сигнал $N_{V_{\text{в}}}$ по истинной воздушной скорости $V_{\text{в}}$. Анало-

гично в канале УК2 по частотам f_2, f_2' на выходах приемников П2 и П2' в вычислителе по аналитической модели (2) определяется и формируется выходной цифровой сигнал N_β по углу скольжения.



Аналогично в ультразвуковых каналах УК3 и УК4 с одинаковыми структурами и близкими моделями информативных сигналов f_3, f_3', f_4, f_4' . При их обработке по аналитическим моделям (3) определяются угол атаки α и истинная воздушная скорость V_v в плоскости изменения угла атаки.

Высотно-скоростной измерительный канал обеспечивает восприятие статического давления P_H набегающего воздушного потока. Для снижения пульсаций статического давления отверстие для восприятия статического давления давление P_H связано с термоизолированной глухой камерой (ГК), в которой расположен проводниковый терморезистор для регистрации температуры торможения T_t набегающего потока. Глухая камера со сглаженным давлением $P_{ГК} = P_H$ соединена со входом датчика абсолютного давления, выходной электрический сигнал U_{P_H} которого подключен ко входу вычислителя. Сопротивление R_{T_t} проводникового терморезистора включено в измерительную схему датчика температуры торможения (ДТТ), выходной сигнал U_{T_t} которого также подается на вход вычислителя. Вычислитель по аналитическим моделям (4), (5), (8), (9) определяет и формирует цифровые выходные сигналы N_{P_H} ,

N_{T_H} , N_{ρ_H} , H , V_y по статическому давлению P_H , температуре воздуха T_H , плотности воздуха ρ_H на текущей абсолютной (барометрической) высоте, а также по барометрической высоте H и вертикальной скорости V_y .

По измеренной в ультразвуковом измерительном канале истинной воздушной скорости V_B , температуре наружного воздуха T_H и плотности ρ_H в вычислителе по аналитическим моделям (6), (7) определяются и формируются цифровые выходные сигналы $N_{V_{пр}}$ и N_M по приборной скорости $V_{пр}$ и числу Маха.

Как видно из рисунка, информативные сигналы ультразвукового измерительного канала в виде суммы $a + V$ и разности $a - V$ скорости a распространения скорости звука в воздухе и скорости V набегающего на приемник набегающего потока в ультразвуковых каналах УК1, УК2, УК3, УК4 преобразуются в частоты f_1, f_2, f_3, f_4 на выходах приемников П1, П2, П3, П4 ультразвуковых колебаний, регистрируемых по направлению набегающего потока, а на выходах приемников П1', П2', П3', П4' регистрируются частоты f'_1, f'_2, f'_3, f'_4 ультразвуковых колебаний, распространяющихся против направления потока. При этом динамические свойства ультразвуковых каналов УК1, УК2, УК3, УК4 определяются операторной чувствительностью динамического звена чистого запаздывания вида

$$W_{y_{K_i}} = e^{-\tau_1 p}, \quad (10)$$

где τ_1 – время чистого запаздывания последовательного формирования частот f_1 и f'_1, f_2 и f'_2, f_3 и f'_3, f_4 и f'_4 на выходах соответствующих приемников П1 и П1', П2 и П2', П3 и П3', П4 и П4', которое определяется по соотношению $\tau_1 = L/V_B$.

Тогда с учетом интервала времени τ_2 обработки, определения и формирования цифровых выходных сигналов $N_{V_{в\beta}}, N_{\beta}, N_{\alpha}, N_{V_{в\alpha}}$ в вычислителе операторные чувствительности каналов измерения выходных сигналов ультразвукового измерительного канала по истинной воздушной скорости $N_{V_{в\beta}}$ в плоскости изменения угла скольжения, по углу скольжения β , по углу атаки α , по истинной воздушной скорости $N_{V_{в\alpha}}$ в плоскости изменения угла атаки будут определяться аналитической моделью вида

$$W_{y_i} = e^{-2(\tau_1 + \tau_2)p}, \quad (11)$$

где τ_2 – время запаздывания выдачи выходного сигнала в вычислителе.

Как видно из рисунка, основной информативный сигнал высотно-скоростного измерительного канала – статическое давление P_H набегающего воздушного потока – для устранения возможных пульсаций в месте расположения отверстия для восприятия давления на скользящей поверхности плиты приемника набегающего потока поступает в термоизолированную глухую камеру с операторной чувствительностью

$$W_{ГК}(p) = \frac{1}{\tau_k p + 1}, \quad (12)$$

где τ_k – постоянная времени глухой камеры, определяемая выражением [13]

$$\tau_k = 128\eta/V_K / \pi D^4 R T_K \rho_{BK}, \quad (13)$$

где η – кинематическая вязкость воздуха; $T_K, \rho_{BK} = \rho_M/g$ – абсолютная температура и весовая плотность воздуха в камере, ρ_M – массовая плотность воздуха, g – ускорение силы тяжести; R – газовая постоянная воздуха; D, l – диаметр и длина отверстия в глухой камере; V_K – объем глухой камеры.

Полость глухой камеры соединена со входом датчика абсолютного давления с операторной чувствительностью $W_{ДАД}(p)$. Тогда операторная чувствительность канала измерения абсолютной (баромет-

рической) высоты H , определяемая в вычислителе, формирующем цифровой выходной сигнал высотного канала, будет определяться аналитической моделью вида

$$W_H(p) = W_{ГК}(p)W_{ДАД}(p)e^{-\tau_2 p}. \quad (14)$$

Операторная чувствительность канала измерения температуры T_H наружного воздуха на текущей барометрической высоте H , определяемая в вычислителе с учетом запаздывания обработки и формирования информативных сигналов, будет определяться аналитической моделью вида

$$W_{T_H}(p) = W_{ДТТ}(p)e^{-\tau_2 p}. \quad (15)$$

Операторная чувствительность канала измерения статического давления определяется аналитической моделью

$$W_{P_H}(p) = W_{ГК}(p)W_{ДАД}(p). \quad (16)$$

Операторная чувствительность канала измерения плотности воздуха будет определяться аналитической моделью

$$W_{\rho_H}(p) = \frac{W_{P_H}(p)}{W_{T_H}(p)} = \frac{W_{ГК}(p)W_{ДАД}(p)(\tau_2 p + 1)}{W_{ДТТ}(p)}. \quad (17)$$

С учетом выражений (6), (7), (10), (15), (16) операторные чувствительности каналов измерения приборной скорости и числа Маха можно представить в виде аналитических моделей вида

$$W_{V_{пр}}(p) = \frac{W_{ГК}(p)W_{ДАД}(p)}{W_{ДТТ}(p)}e^{-(2\tau_1 + \tau_2)p}; \quad (18)$$

$$W_M(p) = \frac{1}{W_{ДТТ}(p)}e^{-(2\tau_1 + \tau_2)p}. \quad (19)$$

Полученные аналитические модели для операторных чувствительностей измерительных каналов системы измерения параметров движения ЛА на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего потока позволяют при выбранной элементной базе решать задачи анализа динамических погрешностей каналов измерения при детерминированных и случайных воздействиях в соответствии с методиками [13, 14].

В общем виде выражение для результирующей динамической погрешности каждого канала измерения системы воздушных параметров движения ЛА в операторной форме имеет вид

$$\Delta_{\Sigma_k}(p) = W_k(p)Y_k(p) - Y_k(p) + W_k(p)\xi_k(p) = \Delta Y_{кс}(p) + \Delta Y_{кв}(p), \quad (20)$$

где $Y_k(p)$ – изображение выходного сигнала k -го канала; $\xi_k(p)$ – изображение внешнего воздействия, приведенного ко входу k -го канала; $\Delta Y_{кс}(p)$, $\Delta Y_{кв}(p)$ – изображения собственной и вынужденной динамических погрешностей k -го канала; $\Delta_{\Sigma_k}(p)$ – результирующая динамическая погрешность k -го канала системы.

В зависимости от изменения во времени измеряемого параметра рассматриваемого канала измерения системы при анализе собственной динамической погрешности каждого k -го канала используют различные типовые входные воздействия, характеризующие наиболее неблагоприятные условия его работы и достаточно точно описывающиеся детерминированными функциями времени.

Как правило, для оценки собственной динамической погрешности каналов измерения бортовых измерительных систем в качестве входных воздействий используют скачкообразные изменения входного воздушного параметра k -го измерительного канала в виде «единичного скачка», а также изменение входного параметра, изменяющегося с постоянной скоростью.

При заданном законе изменения измеряемого параметра, например истинной воздушной скорости, при известной операторной чувствительности $W_{V_b}(p)$ собственная динамическая погрешность канала измерения определяется выражением

$$\Delta V_b(t) = L^{-1} \left\{ \left[W_{V_b}(p) - 1 \right] V_b(p) \right\} = L^{-1} \left\{ \left[e^{-(2\tau_1 + \tau_2)p} - 1 \right] V_b(p) \right\}, \quad (21)$$

где L^{-1} – операция обратного преобразования Лапласа.

Используя линейное приближение функции e^{-x} , получим

$$\Delta V_b(t) = L^{-1} \left[\frac{1}{e^{(2\tau_1 + \tau_2)p}} - 1 \right] V_b(p) = L^{-1} \left[\frac{1}{1 + (2\tau_1 + \tau_2)p} - 1 \right] V_b(p) = L^{-1} \left[\frac{1}{(2\tau_1 + \tau_2)p + 1} - 1 \right] V_b(p). \quad (22)$$

Для собственной динамической погрешности канала измерения барометрической высоты получим

$$\Delta H(t) = L^{-1} \left[\frac{W_{\text{ДАД}}(p)}{(\tau_k p + 1)(\tau_2 p + 1)} - 1 \right] H(p). \quad (23)$$

Для собственной динамической погрешности канала измерения температуры наружного воздуха получим

$$\Delta T_H(t) = L^{-1} \left[W_{\text{ДТТ}}(p) \frac{1}{\tau_2 p + 1} - 1 \right] T_H(p). \quad (24)$$

Для собственной динамической погрешности канала измерения статического давления получим

$$\Delta P_H(t) = L^{-1} \left[\frac{W_{\text{ДАД}}(p)}{\tau_k p + 1} - 1 \right] P_H(p). \quad (25)$$

Для собственной динамической погрешности канала измерения плотности воздуха получим

$$\Delta \rho_H(t) = L^{-1} \left[\frac{W_{\text{ДАД}}(p)(\tau_2 p + 1)}{(\tau_k p + 1)(\tau_2 p + 1)} - 1 \right] \rho_H(p). \quad (26)$$

Для собственной динамической погрешности каналов измерения приборной скорости и числа Маха получим

$$\Delta V_{\text{пр}}(t) = L^{-1} \left\{ \left[\frac{W_{\text{ГК}}(p)W_{\text{ДАД}}(p)}{W_{\text{ДТТ}}(p)} - 1 \right] V_{\text{пр}}(p) \right\}; \quad (27)$$

$$\Delta M(t) = L^{-1} \left\{ \left[\frac{1}{W_{\text{ДТТ}}(p)[(2\tau_1 + \tau_2)p + 1]} \right] M(p) \right\}. \quad (28)$$

Следовательно, при известных операторных чувствительностях выбранных датчиков абсолютного давления, температуры торможения и параметра τ_1 ультразвуковых измерительных каналов и параметра τ_2 вычислителя при известных детерминированных законах изменения измеряемых воздушных параметров по полученным аналитическим моделям (21) – (28) определяется характер изменения собственных динамических погрешностей измерения воздушных параметров движения ЛА.

В реальных условиях эксплуатации системы измерения воздушных параметров движения ЛА на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего потока процессы изменения измеряемых параметров можно характеризовать экспоненциально-коррелированными автокорреляционными

функциями и спектральными плотностями мощности, например, для канала истинной воздушной скорости вида [12]

$$K_{V_B} = \sigma_{V_B}^2 e^{-a_v |\tau|}; S_{V_B}(\omega) = \frac{\sigma_{V_B}^2}{\pi} \frac{a_v}{a_v^2 + \omega^2}, \quad (29)$$

где $\sigma_{V_B}^2$ – дисперсия случайного процесса; a_v – величина, обратная интервалу корреляции процесса.

В этом случае дисперсия собственной динамической погрешности измерительного канала, например канала истинной воздушной скорости, будет определяться выражением [12]

$$\sigma_{V_B}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |W_{V_B}(p) - 1|_{p=j\omega}^2 S_{V_B}(\omega) d\omega. \quad (30)$$

Основным возмущением, действующим на ультразвуковой и высотно-скоростной измерительные каналы системы измерения воздушных параметров движения ЛА, является случайная атмосферная турбулентность, продольную составляющую которой, как показано в работе [15], можно характеризовать спектральной плотностью мощности вида

$$S_{\xi_x}(\omega) = \frac{2\sigma_{\xi_x}^2 L_x}{\pi} \frac{1}{\left(1 + \frac{L_x}{V_B} \omega^2\right)^2}, \quad (31)$$

где $\sigma_{\xi_x}^2$, L_x – дисперсия интенсивности и масштаб продольной атмосферной турбулентности атмосферы по продольной оси ЛА.

Вызываемая продольной атмосферной турбулентностью дисперсия вынужденной динамической погрешности будет определяться выражением

$$\sigma_{V_B}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |W_{V_B}(p)|_{p=j\omega}^2 S_{\xi_x}(\omega) d\omega. \quad (32)$$

С учетом (30), (32) дисперсия результирующей динамической погрешности измерительных каналов рассматриваемой системы измерения воздушных параметров движения ЛА, например канала истинной воздушной скорости, будет определяться выражением

$$\sigma_{V_B}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |W_{V_B}(p) - 1|_{p=j\omega}^2 S_{V_B}(\omega) d\omega + \sigma_{V_B}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |W_{V_B}(p)|_{p=j\omega}^2 S_{\xi_x}(\omega) d\omega. \quad (33)$$

Следует отметить, что для уменьшения собственной динамической погрешности каналов рассматриваемой системы операторная чувствительность канала должна приближаться к единице, что увеличивает вынужденную динамическую погрешность канала. Это обуславливает постановку задачи синтеза параметров канала по критерию динамической точности при случайных погрешностях и при ее решении, например, можно использовать оптимальный линейный фильтр Винера [12, 16].

Таким образом, полученные ранее принципы построения и аналитические модели для определения выходных параметров рассматриваемой системы измерения позволили разработать структурную схему, методики построения аналитических моделей и определить динамические погрешности каналов измерения углов атаки и скольжения, истинной воздушной скорости, приборной скорости и числа Маха, а также барометрической высоты, вертикальной скорости, статического давления, температуры наружного воздуха и плотности воздуха на текущей барометрической высоте полета ЛА при детерминированных и случайных воздействиях. Определяют постановку задачи синтеза измерительных каналов системы по критерию динамической точности с использованием оптимального линейного фильтра Винера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кравцов В.Г., Алексеев Н.В.* Аэрометрия высотно-скоростных параметров летательных аппаратов // Приборы и системы: Управление, контроль, динамика. 2000. № 8. С. 47–50.
2. *Клюев Г.И. и др.* Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов: Ульяновск: УлГТУ, 2005. 590 с.
3. *Солдаткин В.М. и др.* Авиационные приборы, измерительно-вычислительные системы и комплексы: Принципы построения, алгоритмы обработки информации, характеристики и погрешности. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. 526 с.
4. *Солдаткин В.М. и др.* Построение, формирование и обработка информативных сигналов, определение выходных параметров ультразвукового датчика вектора воздушной скорости летательного аппарата // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2023. № 2. С. 86–92.
5. *Солдаткин В.М. и др.* Исследование погрешностей ультразвуковой системы воздушных параметров движения летательного аппарата // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2023. № 3. С. 86–90.
6. *Солдаткин В.М.* Информационно-измерительная система воздушных сигналов летательного аппарата на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2024. № 3 (356). С. С. 151–159.
7. ГОСТ 4.401-81. Атмосфера стандартная, параметры. М.: Изд-во стандартов, 1981. 179 с.
8. *Боднер В.А.* Приборы первичной информации. М.: Машиностроение, 1981. 344 с.
9. *Браславский Д.А.* Приборы и датчики летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1970. 392 с.
10. *Залманзон Л.А.* Проточные элементы пневматических приборов контроля и управления. М.: Изд-во АН СССР. 1961. 249 с.
11. *Ефремова Е.С. и др.* Методические погрешности электронного датчика параметров вектора воздушной скорости летательного аппарата // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. № 6. С. 437–463.
12. *Брславский Д.А., Петров В.В.* Точность измерительных устройств. М.: Машиностроение, 1976. 312 с.
13. *Ференец В.А.* Полупроводниковые струйные термоанемометры. М.: Энергия. 1972. 112 с.
14. *Солдаткин В.В.* Построение и методы исследования информационно-измерительных систем. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2008. 198 с.
15. *Макаров Н.Н.* Системы обеспечения безопасности функционирования бортового аэрокосмического комплекса: теория, проектирование, применение. М.: Машиностроение, 2009. 760 с.
16. *Солдаткин В.В., Солдаткин В.М.* Анализ погрешностей и методы повышения точности измерительных приборов и систем. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2009. 248 с.

Поступила в редколлегию 6.02.25

MODELS OF DYNAMIC ERRORS OF THE CHANNELS OF THE SYSTEM OF MEASURING AIR PARAMETERS OF THE AIRCRAFT MOVEMENT BASED ON THE ULTRASONIC METHOD OF MONITORING THE PARAMETERS OF THE INCIDENT FLOW

E.S. Efremova, B.I. Miftakhov, V.V. Soldatkin, and V.M. Soldatkin

The prospects and features of the design are noted, analytical models of the system of measuring air parameters of the aircraft movement based on the ultrasonic method of monitoring the parameters of the incoming air flow are considered. A structural diagram is constructed, a technique is proposed and analytical models of the operator sensitivities of the measuring channels of the considered system of measuring air parameters of the aircraft movement are obtained. Using the example of a true airspeed measurement channel, analytical models were obtained for determining the inherent and forced dynamic errors of the channel with typical deterministic and random changes in the input signal with superimposed stationary interference. It was noted that the obtained results allow solving the problems of analysis and synthesis of the system's measuring channels according to the criteria of dynamic accuracy using the optimal linear Wiener filter.

Keywords: aircraft; movement; air parameters; measurement system; ultrasonic, incident flow; dynamic errors; channels; models.

Ефремова Елена Сергеевна – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: soldatkina1991@bk.ru

Мифтахов Булат Ильгизарович – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: bulatmiftakhov@mail.ru

Солдаткин Вячеслав Владимирович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: w-soldatkin@mail.ru

Солдаткин Владимир Михайлович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: w-soldatkin@mail.ru

СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

В.К. Козлов, И.М. Минегалиев, Д.М. Валиуллина

Предложен метод определения содержания воды в трансформаторном масле, основанный на анализе спектральных данных в ближней инфракрасной области. Метод включает построение корреляционной зависимости, которая позволяет с высокой степенью достоверности (96 %) оценить уровень влагосодержания в исследуемом образце масла.

Ключевые слова: трансформаторное масло, влагосодержание, спектроскопия.

Трансформаторное масло, представляющее собой продукт переработки нефти, имеет определяющее значение для функционирования электротехнического оборудования благодаря способности обеспечивать изоляцию, осуществлять гашение электрической дуги, отвод тепла и защиту твердой изоляции от влаги и воздуха. Благодаря его антиокислительным свойствам обеспечивается долговечность работы систем энергоснабжения, включающих силовые и измерительные трансформаторы, реакторы и масляные выключатели. Однако в процессе эксплуатации масло подвергается старению, которое проявляется в изменении его химических и электрофизических свойств, а также структурно-группового состава [1–4]. Это происходит из-за окислительных процессов, накопления загрязнений и примесей, ускоряемых присутствием воды и кислорода.

Вода в масле может находиться в трех формах – связанной, растворенной и эмульсионной. Растворенная вода практически не влияет на изоляционные характеристики масла, однако вследствие ее конденсации при понижении температуры образуется эмульсия, что увеличивает диэлектрические потери [5, 6]. Особенно опасна связанная вода, образующаяся в результате взаимодействия молекул воды с продуктами окислительных процессов масла, поскольку она значительно ухудшает его электрофизические свойства [7]. При быстром охлаждении оборудования, например при снижении нагрузки, растворенная вода переходит в эмульсию, способствуя диффузии влаги в целлюлозу, что повышает риск пробоев при включении высоковольтного оборудования. Для предотвращения подобных ситуаций необходим своевременный контроль содержания влаги в масле, требующий правильного отбора проб и выбора адекватного метода анализа.

Согласно ГОСТ 1547-84 качественное определение воды в минеральных маслах основывается на быстром нагревании пробы диэлектрика в пробирке, погруженной в масляную баню, разогретую до 130 °С. Резкое повышение температуры приводит к парообразованию, и стенки пробирки выше уровня масла мутнеют из-за конденсации паров воды. О наличии влаги судят по вспениванию и треску пробы. Этот метод применяется редко, так как содержание влаги в масле строго регулируется из-за риска пробоев.

Предпочтительно использование количественных методов анализа воды в жидких диэлектриках – гидрид-кальциевого метода (ГОСТ 7822-75), метода кулонометрического титрования по Фишеру (IEC 60814, ASTM D1533-08) и хроматографических методов с различными способами ввода пробы масла (РД 34.43.107-95). На результаты анализа влияют не только выбранные методы, но и формы связи воды с молекулами диэлектрика.

Гидрид-кальциевый метод определяет массовую долю растворенной воды в свежем, регенерированном и эксплуатационном масле без эмульсионной воды. Он основан на реакции гидрида кальция с водой, в результате которой выделяется водород. По объему выделившегося водорода рассчитывают массовую долю воды в масле. Из-за низкого предела чувствительности (10 г/т) метод не используется в условиях эксплуатации высоковольтного оборудования с герметичными системами. Несмотря на малое количество используемых реактивов, гидрид-кальциевый метод является весьма трудоемким способом определения влаги в минеральных маслах и в современной лабораторной практике практически не применяется.

Метод Фишера самый популярный метод определения содержания воды в минеральных маслах. Он реализован в приборах различных производителей в виде автоматических кулонометрических титра-

торов. Метод стандартизирован в России согласно ГОСТ Р МЭК 60814-2013, в Европе – ИЕС 60814, в США – ASTM D1533-08. Анализ основан на химической реакции между водой, йодом и двуокисью серы в присутствии пиридина в метаноле.

Несмотря на высокую чувствительность и точность при правильной эксплуатации, метод Фишера трудоемок, необходима специальная подготовка персонала химических лабораторий и строгое соблюдение правил работы с токсичными и вредными веществами.

Альтернативный кулонометрический метод определения влажности изоляционных жидкостей основывается на непрерывном поглощении влаги из пробы жидкого диэлектрика сухим газом-носителем, проходящим через кулонометрический чувствительный элемент, где происходит электролиз всей поглощенной влаги. Продукты электролиза – кислород и водород – удаляются из чувствительного элемента потоком обезвоженного газа-носителя [8]. Показателем влажности является сила тока, необходимая для электролитического разложения всей поглощенной влаги за единицу времени при стабилизированном потоке газа-носителя. Метод отличается высокой чувствительностью и точностью, позволяя измерять влажность с концентрациями до миллионных долей. Основной недостаток – необходимость использования газа для переноса влаги из масла в сорбент, из-за чего сложно осуществить полное извлечение влаги в реальных условиях.

Хроматографические методы используют разделение воды и сопутствующих компонентов в потоке газа-носителя на колонке с адсорбентом, определение проводится с помощью детектора теплопроводности. Чувствительность к воде составляет 2 г/т.

Современные спектрометрические методы – ИК-, ЯМР- и ЭПР-спектрометрия – позволяют проводить количественный и качественный анализ воды в образцах, используя взаимодействие электромагнитного излучения с веществом. Интенсивность полосы поглощения воды в диапазоне 1930...1940 нм используется для количественного определения содержания воды. В работе [9] исследована спектральная характеристика различных марок изоляционных масел. Метод ^1H и ^{13}C ЯМР-спектроскопии был предложен для идентификации диспергированной воды в трансформаторном масле, которую невозможно обнаружить методом титрования по Фишеру [10].

Преимущества спектрометрических методов – быстрая скорость измерений; отсутствие необходимости предварительной обработки образцов и применения химических реагентов; возможность получения информации не только о количестве воды, но и о физических свойствах (размеры частиц, вязкость, плотность), структурно-групповом составе жидких диэлектриков, а также о процессах старения (например, появлении окисленных соединений в изоляционных жидкостях) [11–13]. Данные аспекты обуславливают повышенную привлекательность спектрометрии в исследовательской практике, хотя их внедрение требует определенных ресурсов и навыков.

Спектроскопия ближней инфракрасной области применяется для анализа объектов в различном физическом состоянии, что определяет способ получения спектров. Идеальный во многих отношениях случай представляет оптически однородная смесь жидких веществ, если основной ее компонент, представляющий растворитель, прозрачен, а интересующий компонент, аналит, поглощает излучение. Процесс поглощения излучения при прохождении прозрачной среды, содержащей поглощающий компонент, описывается известным законом Бугера – Ламберта – Бера: $D = \log(I_0/I) = kCl$, где D – оптическая плотность просвечиваемой среды; I_0 – интенсивность света, падающего на среду; I – интенсивность света после прохождения среды; C – концентрация поглощающего вещества в просвечиваемой среде; l – толщина просвечиваемого слоя; k – коэффициент пропорциональности, зависящий от длины волны падающего излучения и природы поглощающего вещества.

Отношение I_0/I называют коэффициентом пропускания и обозначают как T . В обычном фотометрическом анализе в видимой области за I_0 принимают интенсивность излучения после прохождения чистого растворителя. В этом случае закон поглощения излучения можно записать следующим образом: $D = \log(1/T) = kCl$.

В ближнем инфракрасном диапазоне вода проявляет характерные полосы поглощения вблизи длин волн 1950, 1450, 1200, 980 нм [14].

Трансформаторное масло, представляющее собой смесь углеводородов (преимущественно алканов, циклоалканов и ароматических соединений), демонстрирует полосы поглощения в ближнем инфракрасном диапазоне (800...2500 нм). Наибольшая поглощательная активность наблюдается в следующих областях:

- 910...930 нм (соответствует комбинационным колебаниям С–Н-связей в ароматических структурах);
- 1010...1040 нм (связана с колебательными переходами в CH_2 и CH_3 группах) (рис.1).

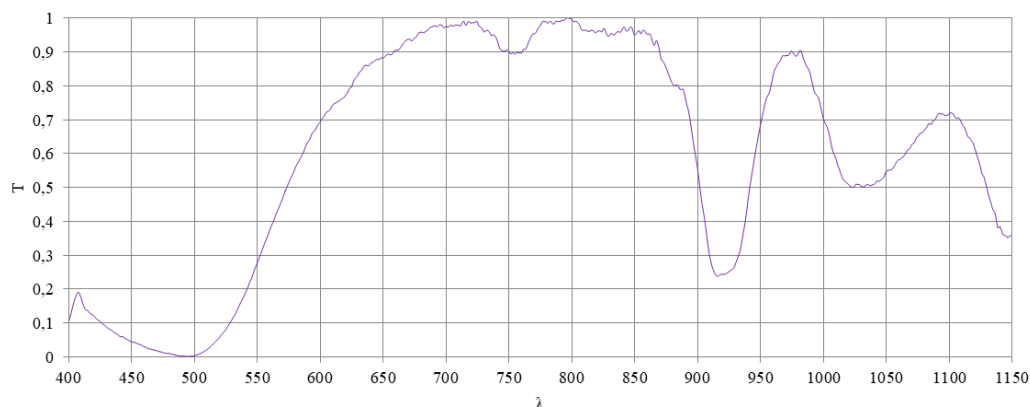


Рис. 1

Предложенный в настоящей работе спектральный метод заключается в определении влагосодержания трансформаторного масла на длине волны 980 нм. В этой области поглощение масла пренебрежимо мало ($T \approx 1$), что обусловлено отсутствием энергетических переходов молекул масла в данной спектральной области.

Для дальнейшего спектрального исследования требуется получить образцы трансформаторных масел с влагой в растворенном состоянии с концентрациями 5...40 ppm. Существует проблема приготовления контрольных образцов масла с низким влагосодержанием, поэтому предлагается два способа приготовления образцов трансформаторных масел с различным влагосодержанием.

Первый способ заключается в осушке масла с помощью силикагеля и постепенном насыщении масла влагой из атмосферного воздуха. Вначале измеряется исходное влагосодержание в образцах методом кулонометрического титрования по Фишеру. Затем образцы трансформаторного масла объединяются в одной емкости для обеспечения однородности состава. Спустя 24 ч после смешивания отбирается проба масла для повторного измерения содержания влаги, что помогает оценить изменения, произошедшие в результате объединения различных образцов. Затем выполняется процесс осушки масла добавлением в общую емкость прокаленного крупного гранулированного крупнопористого силикагеля. Прокаленный силикагель хорошо поглощает влагу. Его использование позволяет уменьшить содержание воды в трансформаторном масле. Герметичная емкость предотвращает попадание дополнительной влаги извне. После добавления силикагеля снова отбирают пробу масла через 24 ч и определяют новое влагосодержание, что позволяет оценить эффективность осушения масла с помощью силикагеля. Удаляя силикагель, прекращают процесс осушения. Оставляя емкость открытой, дают возможность маслу впитывать влагу из окружающей среды, что создает условия для увеличения влагосодержания. Наконец, вновь отбирают пробу и измеряют содержание влаги, чтобы зафиксировать изменение после контакта с атмосферой. Минимальное влагосодержание, полученное осушкой силикагелем, составляет 5 ppm. Максимальное влагосодержание после насыщения влагой из атмосферы – 15 ppm.

Второй способ приготовления образцов трансформаторного масла состоит в том, что в предварительно осушенное масло с влагосодержанием 5 ppm и объемом 500 мл последовательно добавляют малые порции воды массой 0,003 г. Выдерживают 48 ч, достигая таким образом концентрации воды на

уровне 11 ppm. Далее к полученному образцу добавляют еще 0,003 г воды и получают 17 ppm. Процесс повторяется до максимальной растворимости влагосодержания – 40 ppm.

Приведенные способы позволяют создать серию образцов трансформаторного масла с разными уровнями влагосодержания, начиная от минимального значения после осушения силикагелем и заканчивая максимальным значением после добавления малых порций воды в осушенное масло. Такой подход удобен для проведения сравнительных анализов и оценки влияния влаги на свойства трансформаторного масла.

Для регистрации спектров пропускания был использован современный спектрофотометр AvaSpec-2048XL с высокими показателями чувствительности и разрешения. Длина оптического пути 120 мм позволила достичь оптимальной глубины проникновения света в образец и обеспечить необходимую чувствительность метода. Спектры пропускания записывались со спектральным разрешением 1 нм.

Для каждого образца трансформаторного масла, размещенного в кварцевой кювете, проводилось освещение узконаправленным световым пучком со сплошным спектром длин волн. Регистрация спектров пропускания осуществлялась в диапазоне длин волн 400...1150 нм. Используемая как источник излучения лампа прибора Ocean Optics LS-1 обеспечивала стабильное и равномерное освещение образцов. Эксперимент проводился при постоянной температуре окружающей среды, поддерживаемой на уровне 20 °С.

Как отмечалось ранее, в ближнем инфракрасном диапазоне жидкая вода проявляет характерные полосы поглощения вблизи длины волны 980 нм. Для экспериментального подтверждения этого явления был зарегистрирован спектр пропускания воды (рис. 2) в диапазоне длин волн 750...1150 нм. Наблюдается полоса поглощения воды в указанной области.

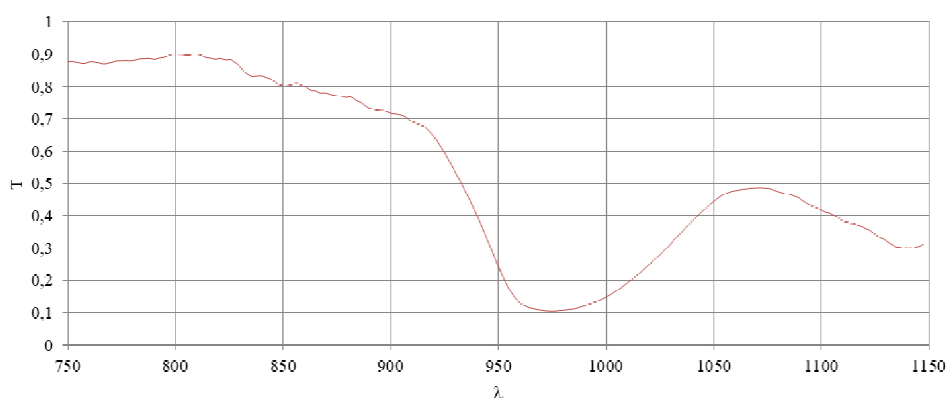


Рис. 2

На рис. 3 представлены нормированные спектры пропускания для образцов трансформаторного масла с различным содержанием влаги. Отчетливо видно влияние поглощения воды в области 980 нм и практически полное пропускание молекул масла ($T \approx 1$). Форма спектров отражает влияние структурно-группового состава масла и концентрации воды в нем.

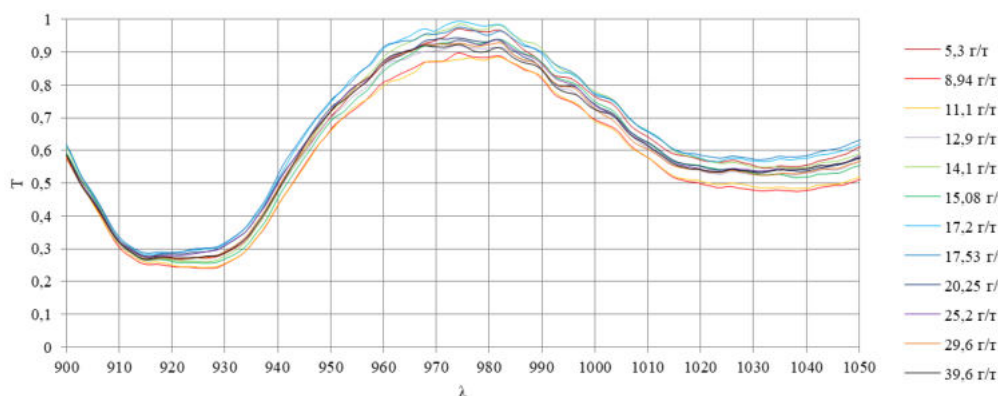


Рис. 3

В таблице указаны концентрации влагосодержания трансформаторных масел и оптические плотности в спектре поглощения $D = \log(1 / T)$ на длине волны 980 нм.

Характеристики образцов	Номер образца											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Влагосодержание C , г/г	5,3	8,94	11,1	12,9	14,1	15,08	17,2	17,53	20,25	25,2	29,6	39,6
Оптическая плотность D , отн. ед.	0,006	0,008	0,016	0,012	0,010	0,015	0,020	0,018	0,02	0,029	0,034	0,042

Построена зависимость оптической плотности в спектре пропускания на длине волны 980 нм от концентрации воды в масле, проведена линейная аппроксимация и получена корреляционная зависимость (рис. 4) для определения количества воды в трансформаторном масле.

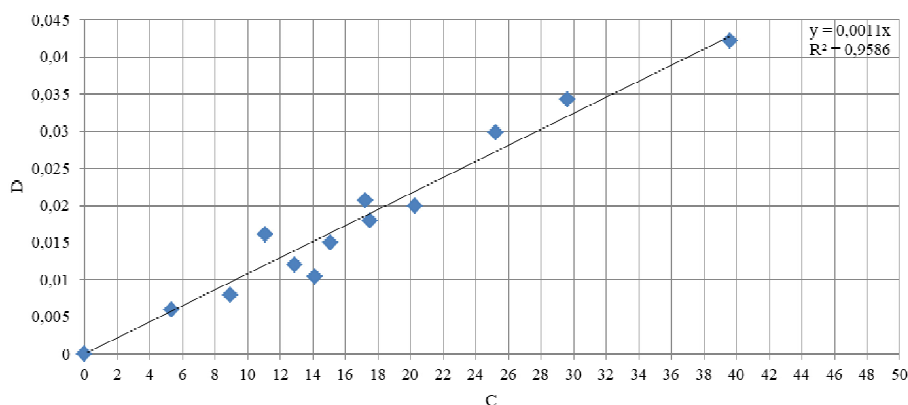


Рис. 4

Установленная зависимость позволяет определять влагосодержание масла с помощью измерения оптической плотности масла на длине волны 980 нм.

Предложенный метод позволяет с чувствительностью в 1 ppm и точностью в 96 % определять влагосодержание трансформаторного масла без использования дополнительных реагентов и сложных расчетов на основе корреляционной зависимости между оптической плотностью масла в области 980 нм и концентрацией воды. Благодаря распространенности оптических спектрометров этот метод доступен для широкого применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лититейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. М.: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
2. Сборник распорядительных материалов по эксплуатации энергосистем. Электротехническая часть: в 2 ч. [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293819/4293819593.pdf> (дата обращения: 23.12.2024).
3. Wilson A.C.M. Insulating Liquids: Their Uses, Manufacture and Properties. London: Institution of Engineering & Technology, 1980. 221 p.
4. 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.
5. N'cho J.S. et al. Review of Physicochemical-Based Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers // Energies. 2016. № 9 (5). Article № 367.
6. Аракелян В.Г. Диагностика состояния изоляции маслонаполненного оборудования по влагосодержанию масла // Электротехника. 2004. № 3. С. 34–39.
7. Коробейников С.М. Диэлектрические материалы. Новосибирск: НГТУ, 2000. 67 с.
8. Аналитические средства контроля параметров трансформаторного масла [Электронный ресурс]. URL: <http://www.okba.ru> (дата обращения: 23.12.2024).
9. Захарич М.П. и др. Анализ трансформаторного масла с использованием ИК анализаторов // Журнал прикладной спектроскопии. 2001. № 1. С. 47–50.
10. Суханов А.А. и др. ЭПР- и ЯМР-спектроскопия трансформаторного масла // Химия и технология топлив и масел. 2013. № 3. С. 47–52.

11. Козлов В.К., Гарифуллин М.Ш., Туранов А.Н. Люминесценция трансформаторного масла марки ГК // Химия и технология топлив и масел. 2012. № 6. С. 54–56.
12. Тонгоногов Б.П. и др. Разработка экспресс-метода определения вязкости, индекса вязкости и температуры застывания базовых масел методом ИК-спектроскопии // Химия и технология топлив и масел. 2016. № 1. С. 46–51.
13. Маркова Л.В., Мышкин Н.К., Макаренко В.М. Флуоресцентный метод оперативного контроля трансформаторного масла // Химия и технология топлив и масел. 2016. № 2. С. 46–51.
14. Крищенко В.П. Ближняя инфракрасная спектроскопия. М.: КРОН-Пресс, 1997. 638 с.

Поступила в редколлегию 23.01.25

SPECTRAL METHOD FOR DETERMINING THE MOISTURE CONTENT OF TRANSFORMER OIL

V.K. Kozlov, I.M. Minegaliev, and D.M. Valiullina

A method for determining the water content in transformer oil based on the analysis of spectral data in the near infrared region is proposed. The method includes the construction of correlation dependence, which allows to estimate with a high degree of reliability (96%) the level of moisture content in the studied oil sample.

Keywords: transformer oil, moisture content, spectroscopy.

Козлов Владимир Константинович – д-р физ.-мат. наук (КГЭУ, Казань)

E-mail: kozlov_vk@bk.ru

Минегалиев Ильсур Маратович – аспирант (КГЭУ, Казань)

E-mail: minegaliev.1998@mail.ru

Валиуллина Дилия Мансуровна – канд. техн. наук (КГЭУ, Казань)

E-mail: valiullinadiliya@mail.ru

О ВОЗМОЖНОСТИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СВЕРХСЛАБЫХ СИГНАЛОВ ИЗ БЕСТРЕНДОВЫХ СЛУЧАЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Р.Р. Нигматуллин

Предлагается оригинальный метод по детектированию сверхслабых сигналов, когда отношение безразмерных размахов сигнал/шум достигает величины 10^{-10} и менее. Метод основан на модифицированной формуле оптимального линейного сглаживания, который ранее был использован для отделения скрытых трендов от их остатков (шума или бестрендовых последовательностей случайных флуктуаций). Установлено, что данная формула может быть применена для детектирования сверхслабых сигналов (когда начальное отношение $\text{SNR} \leq -100$ дБ). При малых величинах параметра сглаживания w бестрендовая последовательность превращается в некий дискретный спектр, который имеет размах 10^{-10} и менее, что позволяет детектировать малые сигналы/возмущения, если величина размаха детектируемого сигнала превышает величину вычисленного дискретного спектра фона (бестрендовая последовательность без сигнала). Благодаря универсальности предлагаемого алгоритма, который может быть применен к произвольной бестрендовой последовательности, метод может широко применяться в радиолокации (включая космическую связь), астрофизике, радиоэлектронике, в медицине, химии, т. е. там, где возникает необходимость детектировать скрытый слабый сигнал на фоне сильных внешних помех.

Ключевые слова: сверхслабый сигнал, отношение сигнал/шум, бестрендовые последовательности, дискретный спектр, модифицированная процедура по оптимальному сглаживанию данных.

Под сверхслабым сигналом понимают сигналы, когда отношение сигнал/шум (SNR) становится равным -100 дБ и менее. Для более точной оценки в дальнейшем определим это соотношение формулой

$$\text{SNR} = 10 \log \left(\frac{\text{Range}(\text{Sgn})}{\text{Range}(ns)} \right), \quad (1)$$

$$\text{Range}(f) = \max(f) - \min(f).$$

Вторая строка в формуле (1) определяет величину размаха сигнала или шума. Допустим, что изначально величина размаха сигнала определяется формулой $\text{Range}(\text{Sgn}) = a \cdot 10^{-\bar{s}} \equiv 10^{-\bar{s}}$, $0 < a < 9$, а величина шума нормирована к единичному значению $\text{Range}(ns) = 1$. Тогда из формулы (1) следует, что величина $\text{SNR} = -10\bar{s}$. В этом случае сигнал полностью скрывается в шуме и не может быть обнаружен. Допустим теперь, что найдено преобразование, которое позволяет уменьшить величину размаха шума до малых величин $\text{Range}(ns) = b10^{-\bar{n}} \equiv 10^{-\bar{n}}$, $0 < b < 9$. Тогда формулу (1) можно представить в виде

$$\text{SNR} = 10 \log \left(\frac{10^{-\bar{s}}}{10^{-\bar{n}}} \right) = 10(\bar{n} - \bar{s}). \quad (2)$$

Выражение (2) показывает, когда детектирование малого сигнала становится возможным. Если разность $\bar{n} - \bar{s} > 0$, то малый сигнал детектируется (размах дискретного спектра фона меньше размаха детектируемого сигнала, скрытого в фоне); в противном случае, когда это соотношение $\bar{n} - \bar{s} \leq 0$, сигнал не может быть обнаружен. Следовательно, задача сводится к нахождению преобразования, которое может свести исходный единичный размах бестрендовой последовательности к величине $1 \rightarrow 10^{-\bar{n}}$. Такое преобразование существует и имеет вид

$$Y_j(w, p) = \frac{\sum_{i=1}^N K \left(\frac{\Delta_{ji}}{w} \right) y_i}{\sum_{i=1}^N K \left(\frac{\Delta_{ji}}{w} \right)}, \quad \Delta_{ji} = x_j - x_i; \quad K(u) = F(-|u|^p). \quad (3)$$

Здесь: w – параметр сглаживания; p – параметр ускорения; $K(u)$ – функция, определяющая ядро сглаживания. Если параметр $w \gg 1$, то сглаженная функция $Y_j(w, p)$ сводится к среднеарифметическому значению исходной функции y_j . Если рассмотреть другой предельный случай $w \rightarrow 0$, возникает неопределенность отношения $\Delta_{ji}/w \approx 0/0$, когда $x_j \rightarrow x_i$. Эта неопределенность раскрывается в зависимости от дискретной структуры исходного сигнала. Иными словами, каждая бестрендовая последовательность при малых ($w \rightarrow 0$) имеет свой уникальный дискретный спектр, который служит своеобразным детектором для обнаружения малого сигнала, скрытого в бестрендовой последовательности и принятого за исходный фон. В связи с этим необходимо учитывать повышение стабильности (воспроизводимости) шумов измерительного устройства. Устройство должно иметь достаточную разрядность аналого-цифрового преобразователя и воспроизводить измеряемые массивы бестрендовой последовательности с малыми отклонениями, тогда гарантируется, что на этом измерительном устройстве можно будет обеспечить выполнение условия $\bar{n} - \bar{s} > 0$. Ранее эта формула была использована в работах [1, 2] для удаления тренда и отделения «очищенного» тренда от случайных флуктуаций бестрендовой последовательности. Если рассмотреть литературу, связанную с работами других исследователей [3–8], то результаты, полученные в этих работах, можно классифицировать по критерию (1). Приведем достижимые минимальные отношения SNR, приведенные в работах разных исследователей: –3дБ [3]; –5дБ [4]; (+5, +20) дБ [5]; (–6,5, +18,5) дБ [6]. Таким образом, показатели не опускаются ниже –6,5 дБ.

Из реальных данных можно рассмотреть метеоданные, которые были измерены с достаточно высокой точностью. Они представляют собой ежесекундные измерения флуктуаций произведения плотности на колебания скорости по выбросам метана, углекислого газа и содержанию воды в атмосфере. Детальный разбор этих измерений проведен в работе [9]. В настоящей работе эти данные анализируются только с точки зрения выделения малого сигнала из бестрендовой последовательности со своей структурой дискретности, порожденной исходным сигналом. Как показывают расчеты различных данных, каждая бестрендовая последовательность имеет свой уникальный дискретный спектр, который отличается различной чувствительностью по отношению к детектируемому сигналу.

Случайным образом были выбраны две соседние случайные последовательности (из метеоданных по метану), в одну из которых был добавлен сигнал. Вид и параметры сигнала следующие:

$$\begin{aligned} \text{Sgn}(x) &= [A \cos(\omega x) + B \sin(\omega x)] E(x), \\ E(x) &= x(0,5 - x)(1 - x), \end{aligned} \quad (4)$$

где $A = 2 \cdot 10^{-16}$; $B = 9 \cdot 10^{-16}$; $\omega = 10^3$; функция $E(x)$ задает форму огибающей сигнала. Исходная дискретная переменная x нормирована на единичный интервал и определяется формулой $x_j = j/N$, $j = 1, 2, \dots, N$. Этот малый сигнал добавляется в соседнюю бестрендовую последовательность по формуле

$$Y_1(x) = y_0(x)(\text{Sgn}(x)) + \text{Sgn}(x) + y_1(x). \quad (5)$$

Здесь $y_{0,1}(x)$ – две соседние случайные последовательности, принятые за исходный фон, функция $Y_1(x)$ – бестрендовая последовательность, содержащая малый сигнал.

На рис. 1, а изображены две исходные бестрендовые последовательности, приведенные к масштабу $[-1, 1]$. На рис. 1, б показана структура малого сигнала, вычисленного по формуле (4). Исходное отношение сигнал – шум достигает величины $\text{SNR} = 10 \log(\text{Stdev}(\text{Sgn}(x))/\text{Stdev}(Y_1(x))) = -163,55$ дБ.

На рис. 2, а показаны зависимости $\text{SNR}(w)$ для малых значений параметра сглаживания w , локализованного в интервале $[0,9 \cdot 10^{-4}; 1,0 \cdot 10^{-3}]$, когда четко проявляются различия между двумя бестрендовыми последовательностями. Для бестрендовой последовательности, содержащей сигнал (бестрендовая последовательность $Y_1(x)$) по отношению к задаваемому уровню детектирования малого сигнала 10^{-5} ($s = 17$), это отношение достигает величины примерно +112 дБ, в то время как для фона без сигнала при том же зна-

чении уровня детектирования сигнала ($s = 17$) оно равно 10,62 дБ. На рис. 2, б показана разность между функциями $SNR_{0,1}(w)$. Таким образом, детектирование сигнала на бестрендовой последовательности, принятой за фон, может быть обнаружено.

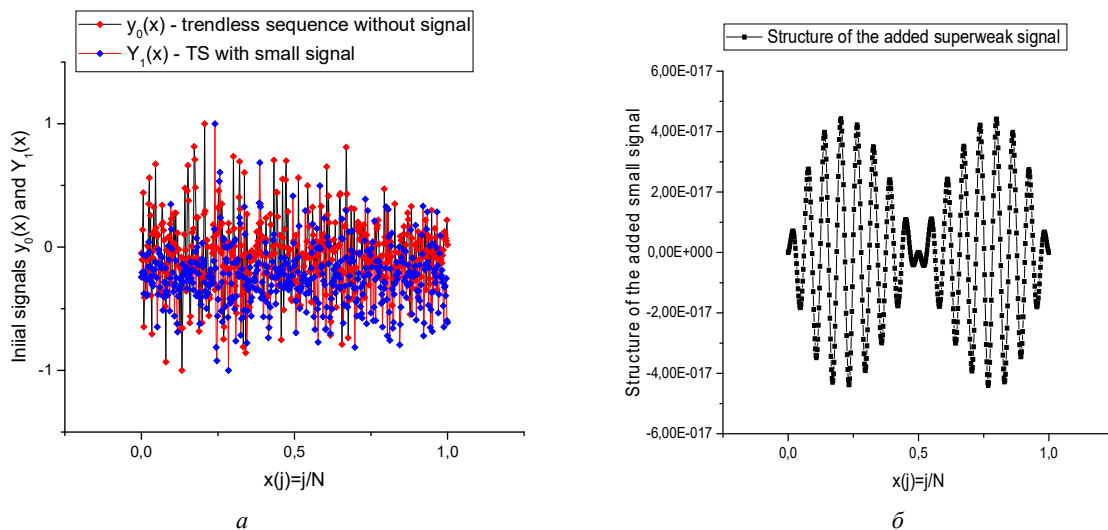


Рис. 1

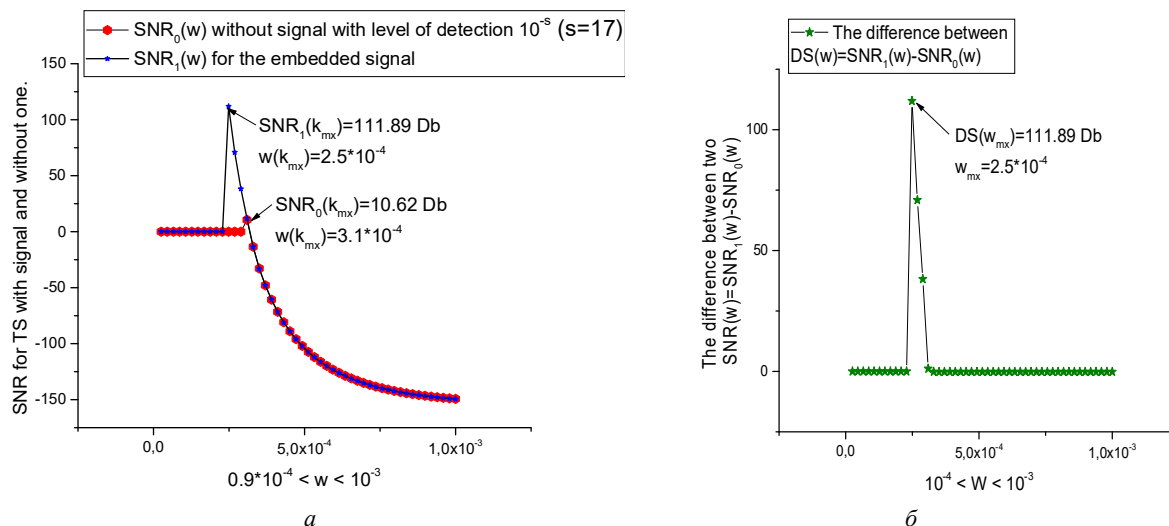


Рис. 2

На рис. 3, а показана трансформация исходных бестрендовых последовательностей (см. рис. 1) в дискретные спектры, которые уже в состоянии детектировать малые сигналы. Если размах дискретного спектра, содержащего малый сигнал ($2,31 \cdot 10^{-16}$), превышает размах дискретного спектра фона ($2,22 \cdot 10^{-16}$), то он детектируется. В противном случае он не может быть детектирован, так как находится полностью внутри фоновой бестрендовой последовательности, не содержащей сигнал. На рис. 3, б для более полного выявления различий между дискретными спектрами показаны их просуммированные значения. Различия между размахами на рис. 3, б выявляются более полно. Размах интегральной суммы для дискретного спектра с сигналом равен $8,76 \cdot 10^{-16}$, а для интегральной суммы, не содержащей сигнал, величина размаха – $6,61 \cdot 10^{-16}$.

Таким образом, в работе предложен новый метод детектирования малых сигналов из исходных бестрендовых последовательностей. Суть метода в следующем: благодаря формуле (3), которая работает по алгоритму «сгладить – вычесть», исходная бестрендовая последовательность может быть трансформирована в некий дискретный спектр. Согласно этому алгоритму вначале обнуляются амплитуды самого большого порядка, затем обнуляются амплитуды меньшего порядка и т. д., пока не остаются амплитуды

самого малого порядка, близкие к нулю. Именно из этой совокупности малых амплитуд образуется искомым дискретный спектр. Структура этого дискретного спектра зависит от параметров (w , p), удачного выбора ядра сглаживания $K(u)$, а также от специфики дискретизации исходной бестрендовой последовательности. Если размах дискретного спектра, содержащий малый сигнал, превышает размах дискретного спектра фона (без сигнала), малый сигнал может быть детектирован. В противном случае, когда размах дискретного спектра с сигналом находится внутри дискретного спектра фона, то присутствие малого сигнала не обнаруживается. Заметим также, что каждая бестрендовая последовательность имеет свой специфический дискретный спектр, поэтому анализ совокупности дискретных спектров, принадлежащих массиву данных, будет классифицироваться уже по максимальному значению размаха от всех дискретных спектров, характеризующих заданный массив. Только в этом случае можно будет гарантировать обнаружение малого сигнала, если размах дискретного спектра от малого сигнала будет превышать значение максимального размаха дискретного спектра от всего массива.

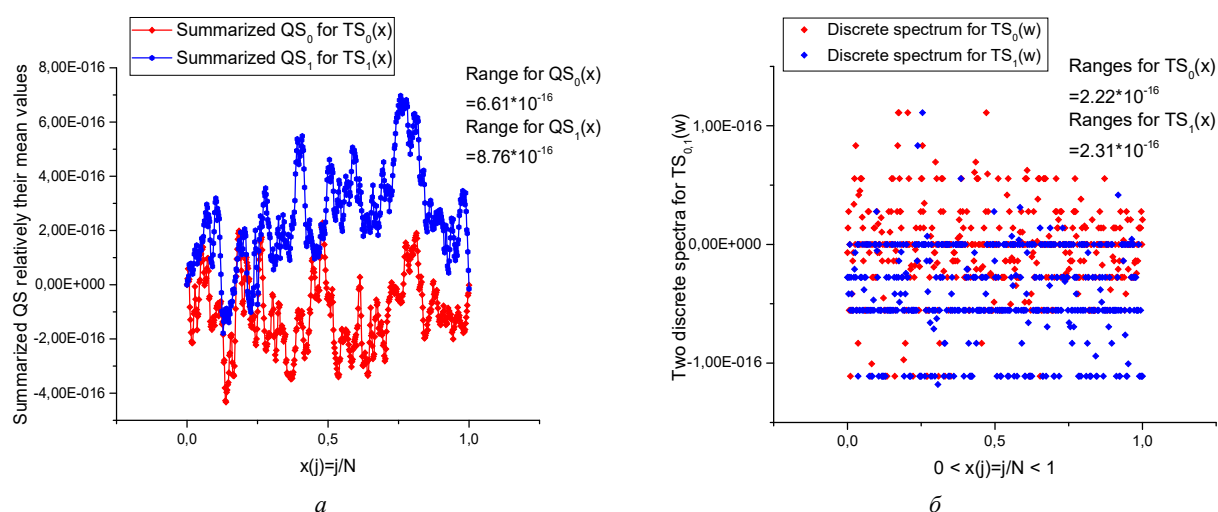


Рис. 3

Благодаря модифицированной процедуре по оптимальному сглаживанию данных появляются новые возможности классификации бестрендовых последовательностей по их малым дискретным спектрам и перспективным модельным исследованиям, связанным с трансформациями известных сигналов в заданные дискретные спектры. Метод модифицированной процедуры по оптимальному сглаживанию данных в силу его универсальности может применяться в науке и технике, в частности в космической связи и радиолокации, астрофизике, химии, медицине, радиоэлектронике и др., а также в областях, где возникает необходимость детектирования малого сигнала на фоне помех с большими амплитудами.

Модифицированная процедура по оптимальному сглаживанию данных предъявляет высокие требования к уровню фона. Регистрируемые временные отрезки бестрендовых последовательностей должны быть достаточно стабильными. Необходимо убедиться, что регистрируемый фон воспроизводим и свободен от ложных срабатываний на присутствие псевдосигналов иной природы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pershin S.M. et al. Detection of the OH Band Fine Structure in a Liquid Water By Means of New Treatment Procedure Based on the Statistics of the Fractional Moments // Laser Physics Letters. 2007. Vol. 4. Iss. 11. P. 809–812.
2. Nigmatullin R.R., Osokin S.I., Nelson S.O. Application of Fractional-Moments Statistics to Data for Two-phase Dielectric Mixtures // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2008. Vol. 15. № 5. P. 1385–1392.
3. Maccone C. The KLT (Karhunen–Loève Transform) to Extend SETI Searches to Broad-Band and Extremely Feeble Signals // Acta Astronautica. 2010. Vol. 67. Iss. 11-12. P. 1427–1439.

4. *Seongwook Lee et al.* Two-Stage DOA Estimation Method for Low SNR Signals in Automotive Radars // IET Radar, Sonar & Navigation. 2017. Vol. 11. Iss. 11. P. 1613–1619.
5. *Petovello M.G., O'Driscoll C., Lachapelle G.* Carrier Phase Tracking of Weak Signals Using Different Receiver Architectures // Proc. of the Institute of Navigation National Technical Meeting, Jan 28–30, 2008, San Diego, USA.
6. *Li Y. et al.* SNR Enhancement of Back Scattering Signals for Bistatic Radar Based on BeiDou GEO Satellites // Remote Sensing. 2021. № 13. Article № 1254.
7. *Petovello M.G., O'Driscoll C., Lachapelle G.* Weak Signal Carrier Tracking Using Extended Coherent Integration with an Ultra-Tight GNSS/IMU Receiver // Proc. of the European Navigation Conference, Apr. 23–25, 2008, Toulouse, France. P. 23–25.
8. *Wenning Gao et al.* Weak Signal Processing Method for Moving Target of GNSS-S Radar Based on Amplitude and Phase Self-Correction // Remote Sensing. 2023. № 15. Article № 969.
9. *Nigmatullin R.R., Litvinov A.A., Osokin S.I.* Quasi-Reproducible Experiments: Universal Fitting Function for Quantitative Description of Complex Systems Data // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2024. Vol. 45. № 8. P. 3956–3971.

Поступила в редколлегию 11.02.25

ON THE POSSIBILITY OF DETECTING ULTRAWEAK SIGNALS FROM TRENDLESS RANDOM SEQUENCES

R.R. Nigmatullin

It is proposed an original method for detecting ultra-weak signals when the ratio of dimensionless signal-to-noise ratio reaches a value of 10^{-10} or less. The method is based on a modified formula of optimal linear smoothing, which was previously used to separate hidden trends from their residuals (noise or trendless sequences of random fluctuations). It is found that this formula can be applied to the detection of ultra-weak signals (when the initial SNR ratio is – 100 dB or even less). At small values of the smoothing parameter w the trendless sequence turns into a certain discrete spectrum, which has a range of 10^{-10} and less, which allows to detect small signals/disturbances, if the value of the range of the detected signal exceeds the value of the calculated discrete spectrum of the background (trendless sequence without signal). Due to the universality of the proposed algorithm, which can be applied to an arbitrary trendless sequence, the method can be widely used in radar (including space communications), astrophysics, radio electronics, medicine, chemistry, i.e., wherever there is a need to detect a hidden weak signal against a background of strong external interferences.

Keywords: super weak signal, signal to noise ratio, trendless sequence, discrete spectrum, modified optimal data smoothing procedure.

Нигматуллин Равиль Рашидович – д-р физ.-мат. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: renigmat@gmail.com

РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ В ГРАДИЕНТЕ ХИМИЧЕСКОГО РАЗДРАЖИТЕЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОКСИЧНОСТИ

А. Соколов, Т.В. Кустов

Представлен метод оценки хемотаксической реакции инфузории *Paramecium caudatum*. Эксперимент включал применение различных концентраций модельного токсиканта. Полученные изображения анализировались с помощью специального программного обеспечения с целью определения концентрации клеток в верхней части кюветы. Статистическая обработка данных выявила значительную корреляцию между концентрацией токсиканта и распределением клеток.

Ключевые слова: биотестирование, *Paramecium caudatum*, цифровая обработка изображений.

Биотестирование, являясь значимым методом оценки токсичности окружающей среды, активно применяется наряду с методами аналитической химии. Этот метод широко распространен благодаря своей простоте, доступности и высокой скорости проведения анализа. Под токсичностью понимается способность веществ вызывать нарушения физиологических функций живых организмов, что приводит к интоксикации и гибели сначала отдельных клеток, а затем и всего организма. Существует два основных подхода к биотестированию – морфологический и хемотаксический. Хемотаксический метод считается более точным, так как он использует специализированные приборы, тогда как морфофизиологический метод позволяет более детально описывать изменения в тест-объектах, например, изменение движения организмов в загрязненной воде. В биотестировании биологический объект используется в качестве аналитического прибора или его части [1].

Оценка токсичности и безопасности химических веществ необходима для разработки и создания новых материалов, лекарств и пищевых добавок, а также для понимания проблемы загрязнения окружающей среды. Использование традиционных методов с лабораторными животными затруднено из-за этических, юридических и финансовых проблем. Для разрешения возникающих вопросов разрабатываются новые средства и методы, в которых применяются различные одноклеточные организмы.

Основной метод оценки токсичности химических веществ заключается в определении эффективной дозы и концентрации, вызывающей биологический ответ. Определяемые показатели LD50 (летальная доза, вызывающая гибель 50 % испытуемых) и LC50 (летальная концентрация, вызывающая гибель 50 % испытуемых) являются стандартизированными методами оценки воздействия на живые организмы и позволяют достаточно точно экстраполировать данные на другие виды. Определение данных показателей требует тщательной постановки экспериментов, проведения многочисленных измерений и сложной статистической обработки, что, соответственно, увеличивает сроки проведения исследований и расходы [2].

Уровень развития методик и аппаратного оснащения для биотестирования на данный момент остается недостаточно высоким как в России, так и на международном уровне. Наиболее активно биотестирование в качестве метода контроля применяется в США, где были разработаны унифицированные методы оценки токсичности водной среды. Эти методы используются для установления предельно допустимых уровней загрязнения и разработки критериев качества воды. В информационную систему по токсичности сточных вод сложного состава, созданную Агентством по охране окружающей среды США, включены данные о токсичности сточных вод и их влиянии на водные объекты, полученные на основе биотестирования с использованием 4650 тестов и 145 тест-организмов. Токсикологические методы оценки качества воды и соответствующая аппаратура также активно разрабатываются в Великобритании, Франции, Германии, Швеции и Швейцарии. Так, функционирование приборов серии «Биотестер», в частности, массовой модели прибора «Биотестер-2М», основано на особенностях реакций инфузорий

на внешние воздействия. Этот прибор предназначен для реализации методик определения токсичности вод, почвы, донных осадков, твердых отходов и других объектов и сред на основе хемотаксической реакции инфузории-туфельки (*Paramecium caudatum*). При оперативной оценке токсичности приборы серии «Биотестер» выполняют те же задачи, что и полностью оснащенная химико-аналитическая лаборатория. Однако использование биотестовых методов значительно снижает вероятность получения ложноотрицательных результатов [3].

Использование одноклеточных организмов позволяет упростить и избежать сложностей, возникающих при работе с многоклеточными тест-объектами, так как чаще всего они просты в культивировании, размножении и длительном содержании культуры. Одноклеточные организмы применяются для исследований в рамках стандартных опытов LC50 и LD50, а также при использовании особенностей группового поведения в экспресс-методах, которые позволяют определить различные параметры токсичности в значительно более короткие сроки. Например, хемотаксис микроорганизмов в градиенте химического раздражителя является чувствительным индикатором физиологического состояния организмов и их восприимчивости к опасным концентрациям веществ. Хемотаксис на уровне популяции в ответ на внешние раздражители – это экономичный по времени и трудозатратам метод выявления токсического воздействия.

Традиционно для количественной оценки распределения микроорганизмов в градиентах химического раздражителя применяются методы прямого подсчета клеток с помощью микроскопии и измерения оптической плотности [4]. Однако эти методы имеют ряд ограничений, связанных с высокой трудоемкостью, невысокой точностью и сложностью автоматизации. Также основными методами контроля характеристик движения тест-организмов является фотонная корреляционная спектроскопия, основанная на изменении частоты рассеянного от движущихся частиц излучения за счет эффекта Доплера, оптическое гетеродинамирование, использующее эффект интерференции волн от источника колебаний [5]. В СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в середине 1970-х гг. А. В. Пожаровым были начаты исследования по разработке биотестовой аппаратуры для контроля токсичности водных сред, основанные на поведенческих реакциях инфузорий. Была обоснована концепция биотестовой аппаратуры как измерительного микробиологического преобразователя, который контролирует токсичность водных сред аналогично тестеру.

Развитие в области микроэлектроники способствовало появлению телевизионных методов исследования. Это современный подход к анализу характеристик движущихся биообъектов, основанный на обработке параметров последовательных изображений популяции микроорганизмов. Данные методы включают использование телевизионных измерительных систем, систем технического зрения. Телевизионные измерительные системы позволяют получать высококачественные изображения биообъектов в реальном времени, что обеспечивает возможность детального анализа их движения и взаимодействия. Системы технического зрения дополнительно оснащаются алгоритмами компьютерного зрения, которые автоматически распознают и отслеживают биообъекты, обеспечивая высокую точность и надежность измерений [6].

В настоящее время появляются разработки с использованием искусственного интеллекта, которые значительно улучшают возможности в различных областях науки и промышленности. Например, искусственный интеллект играет ключевую роль в системах технического зрения, повышая их эффективность и точность. Алгоритмы машинного обучения – нейронные сети – способны обрабатывать большие объемы данных и выявлять сложные паттерны, что особенно важно для отслеживания движения клеток и контроля качества в биофармацевтическом производстве. В исследованиях университета Бирмингема используется данно-ориентированный подход для выявления влияния химических загрязнителей на организмы, что вызывает сомнения в традиционной экотоксикологии и открывает путь к новым методологиям. Данный метод позволяет выявлять ключевые классы химических веществ при низких концентрациях, одновременно характеризуя биомолекулярные изменения [7].

Для определения острой токсичности используется множество методов, предполагающих различные технические способы реализации. Однако при значительном усложнении электроники и развитии программных средств в экологических лабораториях до сих пор используются аппаратные методики, разра-

ботанные в середине прошлого века. В связи с этим была проведена разработка нового подхода, основанного на количественном анализе изображений и регистрации двигательных реакций тест-организмов.

Целью данной работы является разработка и апробация метода для количественного определения плотности распределения микроорганизмов в статическом градиенте химического раздражителя.

Для достижения целей исследования разработан метод для создания стабильного химического градиента и измерения распределения клеток в нем, проведена оценка работоспособности метода с использованием культуры *Paramecium caudatum* в качестве модельного организма, исследовано влияние различных химических стимулов на хемотаксическое поведение микроорганизмов в созданной системе.

В качестве тест-организма использовались инфузории *Paramecium caudatum*. Выбор данных одноклеточных простейших обусловлен их высокой чувствительностью к химическим загрязняющим веществам и ярко выраженными тест-реакциями (хемотаксис и отрицательный геотаксис). В отсутствие опасных веществ инфузории стремятся занять положение, наиболее близкое к поверхности [8]. При контакте с токсичными веществами инфузории в первую очередь реагируют изменением параметров движения – скорости и направления. Вне зависимости от типа движения, хаотического или направленного, при опасной концентрации химического раздражителя клетки будут стараться покинуть области, опасные для жизнедеятельности.

Для проведения исследований была создана специальная плоская фотометрическая кювета [9]. Это устройство обеспечивает стабильный градиент между двумя средами, одновременно позволяя тест-организмам свободно перемещаться внутри. Конструкция кюветы включает две отдельные полости: одна для раствора с микроорганизмами, другая для исследуемого или контрольного раствора. Соединительное отверстие между полостями спроектировано с учетом специфики двигательной активности тест-организмов, что обеспечивает предотвращение смешивания растворов, при этом не создаются препятствия для их свободного передвижения. Такая конфигурация гарантирует формирование устойчивого градиента химического раздражителя в ходе эксперимента. К каждой полости подходит канал для заполнения. Заполнение осуществляется при помощи стерильного медицинского шприца, что не только обеспечивает точное дозирование и равномерное внесение раствора в кювету, но и минимизирует попадание воздушных пузырей.

Расстояние между стенками затрудняет перемещение *Paramecium caudatum* в одной из плоскостей, что позволяет интерпретировать наблюдаемую картину как двумерную. Подобное положение является необходимым условием для точной фотофиксации двигательных реакций группы тест-организмов. Для обеспечения высококонтрастного изображения была разработана специализированная непрозрачная камера, оснащенная контурной светодиодной подсветкой. Внутри камеры помещается кювета, которая надежно фиксируется при помощи держателя, обеспечивая возможность точного позиционирования для последующей фиксации результатов эксперимента.

После заполнения кюветы производится фотографирование для подсчета начального количества тест-организмов, которые задействованы в опыте. Формирование соответствующего изображения производится сразу после заполнения кюветы. Затем, после протекания тест-реакции, выполняется повторное фотографирование и подсчет клеток в исследуемом объеме и безопасной среде. Этот метод может быть использован в качестве альтернативного подхода к исследованиям токсичности, при его применении возможна оперативная оценка вод.

Для получения достоверных сведений необходимо обеспечить достаточную концентрацию клеток тест-организмов. Пробоподготовка исследуемых сред и культивирование *Paramecium caudatum* проводилась согласно методике ПНД Ф Т 16.3.16-10. Для этого подготовленный раствор Лозины-Лозинского (ЛЛ) с концентраций клеток 1000 ± 500 кл/мл был загущен поливиниловым спиртом. Протекающие реакции фиксировались с помощью цифровой камеры высокого разрешения с макрообъективом.

Выбор модельного токсиканта и его концентраций осуществлялся в соответствии с методикой, описанной в нормативном документе ПНД Ф Т 16.3.16-10 (ред. 2015 г.), ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) в концентрациях 0,01; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 1 мг/дм³.

Измерения навесок производились с помощью аналитических весов AND HR-250AZG с заявленной точностью 0,0001 г.

Выбор данных концентраций обусловлен требованиями представленного нормативного документа, согласно которому при концентрации 0,1 мг/дм³ наблюдается значительный уровень выхода клеток в исследуемую среду, а при верхнем пределе большинство клеток остаются в безопасной области. Для детального исследования данного диапазона концентраций было принято решение приготовить растворы с диапазоном значений от одного уровня до другого.

Численные характеристики распределения клеток были получены фотофиксацией и подсчетом микроорганизмов в верхней и нижней областях кюветы в начале и конце эксперимента. Данный подход позволил оценить изменения концентраций инфузорий и направление перемещения.

Статистическая обработка результатов включала расчет средних значений, стандартных отклонений, а также оценку достоверности различий между контрольными и опытными группами с помощью непараметрических критериев.

Метод направлен на изучение изменения хемотаксической реакции тест-организма *Paramecium caudatum* в стабильном градиенте химического раздражителя. Основная цель – подсчет клеток, вышедших в наблюдаемую область в течение 30 мин, что позволяет оценить их хемотаксическое поведение. Для этого создается стабильный химический градиент, в который помещается культура *Paramecium caudatum*. В течение 30 мин клетки фотографируют в градиенте с равными временными интервалами.

Полученные фотографии обрабатываются с использованием специального программного обеспечения, разработанного на языке Python. Программа включает несколько модулей, каждый из которых выполняет определенную функцию. Модуль импорта изображений отвечает за чтение и загрузку изображений с использованием библиотеки Pillow. Модуль бинаризации изображения преобразует цветные изображения в монохромные (бинарные) с использованием библиотеки NumPy, что позволяет выделить клетки на фоне.

Алгоритм работы программы подсчета организмов приведен на рис. 1.

Для проведения количественного анализа серии фотографий и обработки изображений было разработано программное обеспечение на языке Python. Данное программное обеспечение включает следующие модули.

1. Модуль импорта изображений

Для реализации модуля были использованы функции чтения изображения из библиотеки Pillow (Python Imaging Library).

2. Модуль бинаризации изображения.

Для преобразования цветного изображения в монохромное (бинарное) была задействована библиотека NumPy. Чтобы сформировать черно-белое изображение, использовали логическую операцию `np.array(img) > 127` для создания бинарной матрицы. Элементы, яркость которых превышает значение 127, принимают значение «True» и становятся белыми, остальные «False» – черными. Значение яркости подбиралось эмпирически, были установлены оптимальные параметры. При более высоком пороговом значении теряется значимая информация. Далее с использованием функции `Image.fromarray()` библиотеки Pillow на основе полученных бинарных матриц генерируются новые изображения.

3. Модуль подсчета микроорганизмов.

В программном коде реализован полуавтоматический метод анализа. Оператор вручную выделяет микроорганизмы, которые представляют собой скопление белых пикселей. Каждому скоплению присваивается порядковый номер. Программа автоматически подсчитывает количество скоплений в верхней и нижней половине изображений, и результат экспортируется в электронную таблицу формата Excel для последующего статистического анализа.

На рис. 2 представлено распределение клеток *Paramecium caudatum* в кювете после создания стабильного химического градиента. Демонстрируется миграция клеток в ответ на химический стимул в течение 30 мин. Верхняя часть кюветы содержит меньшее количество клеток, что указывает на их предпочтение нахождения в безопасной области. Такое распределение клеток иллюстрирует хемотаксическое поведение *Paramecium caudatum* в условиях стабильного градиента химического раздражителя.

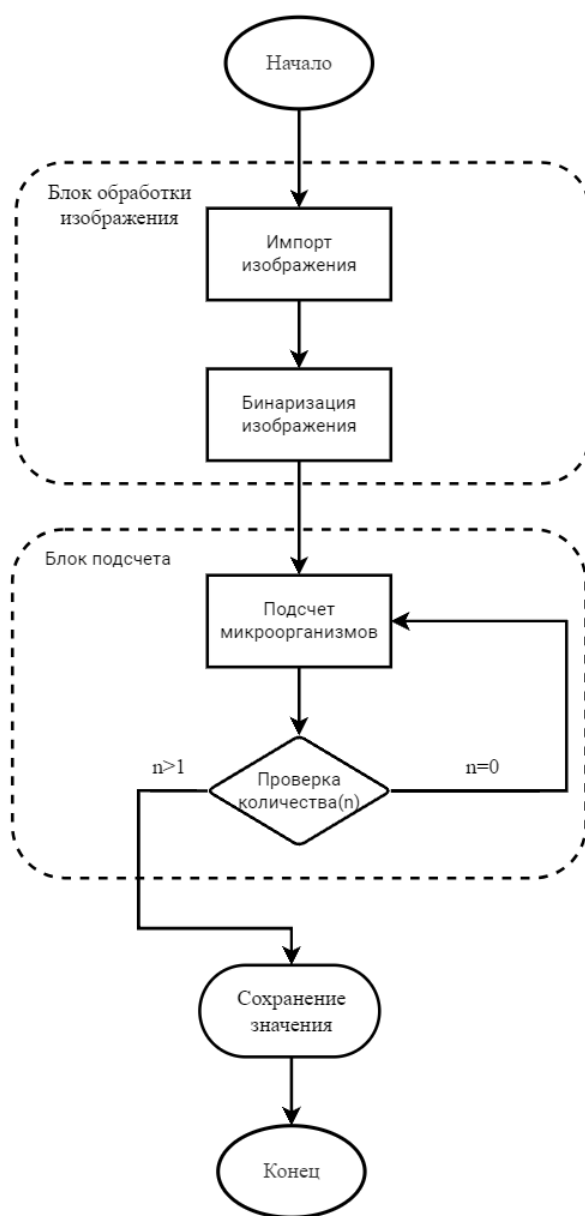


Рис. 1

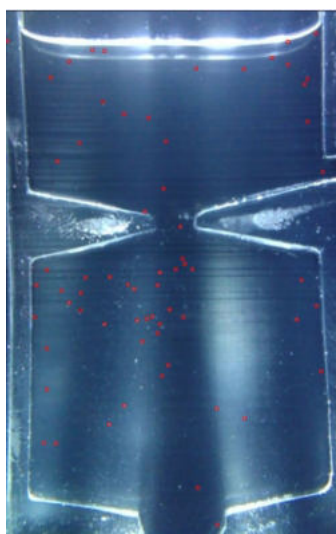


Рис. 2

С использованием описанных средств был разработан и реализован план эксперимента для оценки изменения параметров движения и распределения группы клеток *Paramecium caudatum* в стабильном градиенте химического раздражителя.

Приведем структуру эксперимента:

- независимая переменная: концентрация модельного токсиканта $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$;
- зависимая переменная: количество клеток в верхней и нижней части кюветы;
- контролируемые переменные: температура (25°C), начальная концентрация клеток (1000 ± 500 кл./мл);
- количество повторений: десять для каждой концентрации.

Эксперимент осуществлялся поэтапно.

1. Подготовка контрольной пробы.
2. Подготовка растворов разной концентрации $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.
3. Подготовка раствора Л-Л с рабочей концентрацией тест-организма.
4. Внесение растворов в кювету.
5. Фотографирование распределения клеток в течение 30 с после внесения.
6. Фотографирование распределения клеток через 30 мин после внесения.
7. Программная обработка изображений.
8. Статистическая обработка данных.

Для анализа полученных данных были рассчитаны средние значения и стандартные отклонения массы модельного токсиканта, количества клеток в верхней и нижней частях кюветы для каждой концентрации. Расчет производился с использованием программного обеспечения MATLAB. Для этого была разработана программа, автоматизирующая процесс обработки данных. Программа включала алгоритмы для вычисления среднего значения и стандартного отклонения. Приведем результаты обработки.

На рис. 3 показана диаграмма изменения количества клеток в зависимости от концентрации $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, мг/дм³.

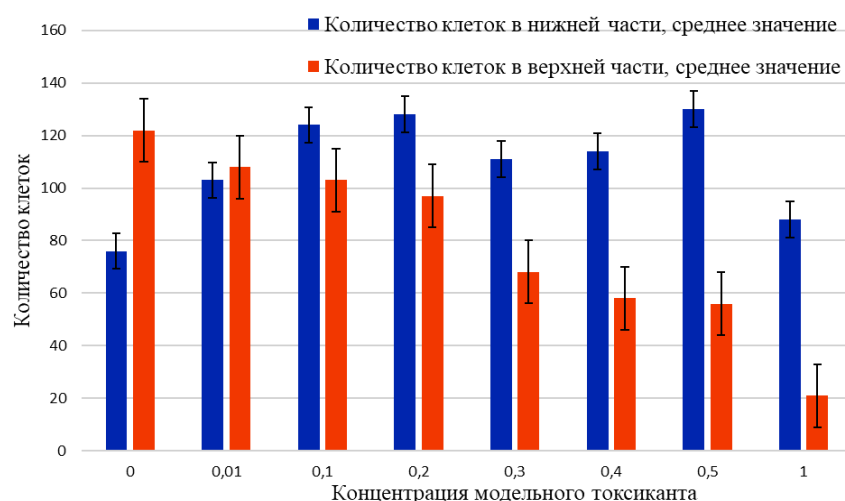


Рис. 3

Для оценки погрешности измерений было рассчитано стандартное отклонение значений концентрации модельного токсиканта и количества клеток.

Расчет производился программными средствами с использованием программного обеспечения MATLAB. Для этого была написана программа, с помощью которой процесс обработки данных был автоматизирован. Программа включает алгоритмы для вычисления среднего значения и стандартного отклонения. Результат обработки представлен на диаграмме (см. рис. 3).

Для установления зависимости между распределением клеток и концентрацией модельного токсиканта был проведен корреляционный анализ с использованием программного обеспечения MATLAB. Согласно результатам коэффициент корреляции Пирсона $r = -0,96$, что свидетельствует о наличии сильной отрицательной линейной корреляции между концентрацией модельного токсиканта и количеством клеток в верхней части экспериментальной кюветы. Статистическая значимость полученной корреляции была оценена с помощью p -value, которое составило 0,0002. Низкое значение p -value указывает на крайне малую вероятность получения такой корреляции случайным образом, если бы между исследуемыми переменными отсутствовала истинная связь. Для проведения статистического анализа были использованы стандартные функции MATLAB. В частности, функция `corrcoef` была применена для вычисления коэффициентов корреляции Пирсона и соответствующих значений p -value. Функция `corrcoef` автоматически выполняет двусторонний тест, проверяя нулевую гипотезу о том, что коэффициент корреляции статистически значимо отличается от нуля в любом направлении (положительном или отрицательном).

При увеличении концентрации модельного токсиканта $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ в верхней половине кюветы наблюдается снижение количества вышедших клеток в сравнении с «чистой» пробой. При концентрации токсиканта выше $0,4 \text{ мг/дм}^3$ наблюдается снижение общего количества клеток. Это может быть вызвано тем, что при попадании в среду с высокой концентрацией опасного вещества часть тест-организмов погибла. Диффузией между двумя средами можно пренебречь, так как время контакта и площадь поверхности очень малы.

Таким образом, проведенная экспериментальная апробация метода с использованием разработанной ранее фотометрической кюветы совместно с программным обеспечением посредством проведения эксперимента по оценке изменения распределения клеток тест-организма *Paramecium caudatum* в зависимости от концентрации модельного токсиканта позволила выявить значимые корреляции между уровнем токсичности среды и поведенческими реакциями микроорганизмов. Полученные данные подтвердили высокую чувствительность системы и ее потенциал для использования в экологическом мониторинге и токсикологических исследованиях.

Следующим этапом разработки должна стать доработка программного обеспечения для отслеживания параметров распределения в автоматическом режиме

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терехова В.А. Биотестирование как метод определения класса опасности отходов [Электронный ресурс]. URL: <https://fadr.msu.ru/~letap/biotesting.html> (дата обращения: 4.11.2024).
2. Борисова С.Д. Биотестирование. Методические указания по выполнению лабораторных работ по профилю «Аквакультура» направления подготовки 35.03.08 «Водные биоресурсы и аквакультура». Казань: КГЭУ, 2015. 64 с.
3. Вишневецкий В.Ю., Булавкова Н.Г., Ледяева В.С. Принципы построения биотестовой системы // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2011. № 9. С. 12–17.
4. Методика определения токсичности проб природных, питьевых, хозяйственно-питьевых, хозяйственно-бытовых сточных, очищенных сточных, сточных, талых, технологических вод экспресс-методом с применением прибора серии «Биотестер». ФР.1.39.2015.19242.
5. Способ биотестирования токсичности водной среды: пат. 2123693С1 Рос. Федерация, № 97120275/04; заявл. 08.12.1997; опубл. 20.12.1998.
6. Захаров И.С., Завгородний А.В. Биотестовые аппаратные средства и методы контроля локомоций инфузорий // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2008. № 5 (82) С. 205–209.
7. Xiaojing Li Jiarui et al. Colbourn Bioactivity Profiling of Chemical Mixtures for Hazard Characterization // Ecotoxicology and Public Health. 2024. № 59 (1). С. 291–301.
8. Полянский Ю.И. Подцарство Простейшие, или Одноклеточные (Protozoa) // Жизнь животных. М.: Просвещение, 1987. Т. 1. Простейшие. Кишечнополостные. Черви. С. 95–101.
9. Приспособление для определения токсичности водных сред на основе измерения двигательных реакций инфузории *Paramecium Caudatum*: пат. 2824905 Рос. Федерация, № 2024104554; заявл. 22.02.2024; опубл. 15.08.2024, Бюл. № 23.

Поступила в редколлегию 4.12.24

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR QUANTIFYING MICROBIAL DISTRIBUTION DENSITY IN A CHEMICAL STIMULUS GRADIENT FOR TOXICITY EVALUATION

A. Sokolov and T.V. Kustov

This paper presents a method for evaluating the chemotactic response of the infusoria *Paramecium caudatum*. The experiment involved the application of different concentrations of a model toxicant. The obtained images were analysed using special software in order to determine the concentration of cells in the upper part of the cuvette. Statistical processing of the data revealed a significant correlation between toxicant concentration and cell distribution.

Keywords: biotesting, *Paramecium caudatum*, digital image processing.

Соколов Алексей – ассистент (СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург)

E-mail: asokolov@etu.ru

Кустов Тарас Владимирович – канд. техн. наук (СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург)

E-mail: tvkustov@etu.ru

ИМПЕДАНСНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕПЛООВОГО ПОТОКА НА ОСНОВЕ СКИН-ЭФФЕКТА

И.Д. Шафигуллин

Представлен новый импедансный метод измерения поверхностной температуры и нестационарного теплового потока в электропроводящих теплофизических объектах, основанный на электрическом скин-эффекте. Разработана установка для проведения экспериментальных исследований. Показано, что реальная составляющая импеданса скин-слоя является более стабильной и имеет явно выраженную реакцию на изменение поверхностной температуры. Получены временные функции отклика реальной составляющей импеданса скин-слоя на скачкообразное изменение поверхностной температуры и экспериментальные характеристики преобразования (зависимость реальной составляющей импеданса скин-слоя от поверхностной температуры) для стали. Проведены экспериментальные исследования импедансного метода измерения нестационарного теплового потока, а также сравнительный анализ полученных данных с результатами независимых измерений методом вспомогательной стенки, который показал, что предложенный импедансный метод является менее инерционным.

Ключевые слова: импедансный метод, поверхностная температуры, тепловой поток, плотность нестационарного теплового потока, скин-эффект.

Измерение термодинамических параметров является актуальной задачей при реализации систем контроля и диагностики сложных технических объектов – двигателей летательных аппаратов и автомобилей, теплоэнергетических установок, систем теплопередачи и теплоизоляции и др. Наиболее распространенными величинами при теплофизических измерениях являются поверхностная температура $T_s(t)$ и тепловой поток $q(t)$. При этом высокую точность измерений поверхностной температуры обеспечивают контактные методы измерения на основе термоэлектрических преобразователей (термопар) и термометров сопротивления [1]. Для оценки теплового потока широко используются градиентные методы вспомогательной стенки [2] и распределенные измерительные системы [3]. Однако особенностью таких датчиков является использование чувствительных элементов, искажающих реальный профиль измеряемого теплового поля и увеличивающих инерционность измерительной системы.

Устранить данный недостаток возможно использованием самого объекта контроля в качестве чувствительного элемента, что снижает тепловую инерцию и уменьшает искажения теплового поля. Такую возможность можно реализовать в электропроводящих объектах за счет использования скин-эффекта [4] – явления оттеснения переменного тока к поверхности электропроводящего материала. В радиотехнике скин-эффект воспринимается как нежелательное явление, и применяются соответствующие методы его минимизации. В то же время в ряде работ исследуется полезное применение скин-эффекта при реализации датчиков физических полей – датчиков растяжения и сжатия [5], датчиков концентрации газа [6], измерение толщины защитных покрытий электропроводящих объектов [7], радиочастотное зондирование неоднородных электропроводящих структур [8]. Однако практическая реализация и применение скин-эффекта для измерения поверхностной температуры не рассмотрены в технической литературе. В связи с этим разработка метода и прибора для измерения и контроля поверхностной температуры на основе скин-эффекта является актуальной задачей.

Скин-эффект представляет собой явление, при котором на высоких частотах плотность тока в электропроводящем материале сосредоточена в тонком приповерхностном слое толщиной δ :

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

где σ – удельная электрическая проводимость; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость; $\omega = 2\pi f$ – частота зондирующего сигнала. На рис. 1, а представлена зависимость толщины скин-слоя δ от частоты f

зондирующего сигнала для наиболее распространенных электропроводящих теплофизических материалов. Из данного графика следует, что при частотах, превышающих 1 МГц, толщина скин-слоя δ в стали составляет менее 25 мкм, тогда как в алюминии и меди она не превышает 100 мкм. Скин-слой толщиной δ , формируемый в электропроводящем объекте (рис. 1, б), характеризуется импедансом $Z_S(j\omega) = U(j\omega)/I(j\omega)$, где $U(j\omega)$, $I(j\omega)$ – комплексные амплитуда напряжения и тока.

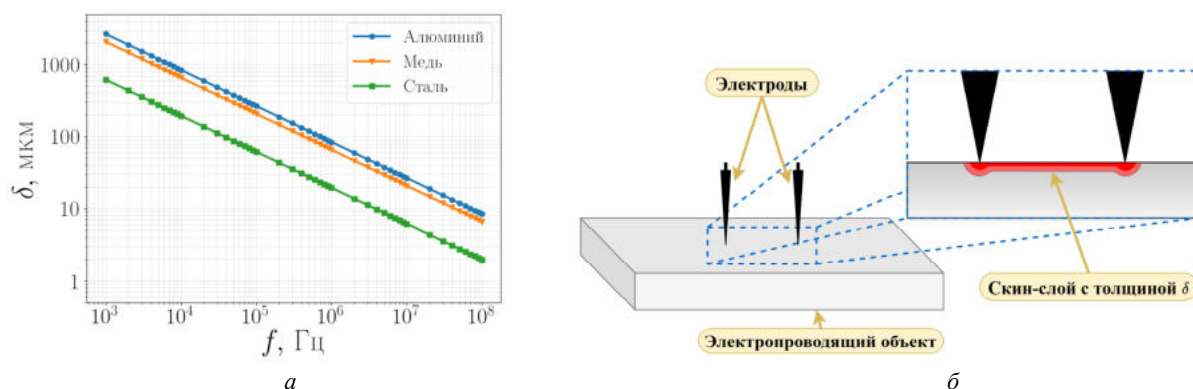


Рис. 1

Предлагаемый импедансный метод основан на функциональной зависимости Z_S от поверхностной температуры $T_S(t)$ объекта контроля (рис. 2). Здесь и далее подразумевается параметрическая зависимость импеданса $Z_S = Z_S(T_S(t)) = Z_S(j\omega, T_S(t))$.

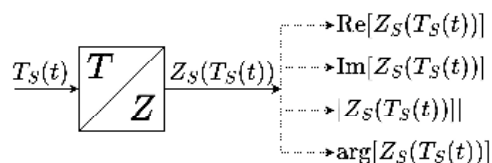


Рис. 2

Суть предложенного импедансного метода [9] заключается в установке электродов на поверхности электропроводящего объекта (см. рис. 1, б). Через электроды пропускается зондирующий ток высокой частоты, формирующий тонкий приповерхностный скин-слой δ между электродами в самом объекте. В данном случае электрический импеданс Z_S сформированного скин-слоя малой толщины δ определяет поверхностную температуру $T_S(t)$ электропроводящего объекта контроля. Так как Z_S является комплексной величиной, зависимость $T_S(t)$ от Z_S может быть выражена через реальную составляющую $T_S(t) = f(\text{Re}(Z_S))$, мнимую составляющую $T_S(t) = f(\text{Im}(Z_S))$, модуль $T_S(t) = f(|Z_S|)$ и фазу $T_S(t) = f(\arg(Z_S))$.

Использование двухэлектродной системы (см. рис. 1, б) [10] обеспечивает возможность определения интегральной поверхностной температуры в тонком слое δ , расположенном между электродами, непосредственно внутри электропроводящего объекта. Однако в случае локальных измерений применима система с одним измерительным электродом (рис. 3). Вторым (общим) электродом является электропроводящий объект. При этом основная плотность тока сосредоточена в месте контакта измерительного электрода с электропроводящим объектом, который определяет Z_S . Измеренный импеданс Z_S характеризует поверхностную температуру $T_S(t)$ электропроводящего объекта в точке контакта.

Таким образом, отличительной особенностью предлагаемого импедансного метода измерения поверхностной температуры электропроводящих теплофизических объектов является использование самого объекта контроля в качестве чувствительного элемента.

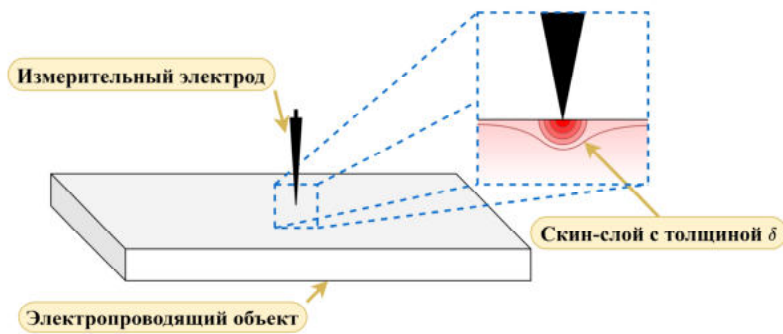


Рис. 3

Импедансный метод измерения нестационарного теплового потока $q(t)$ по измерениям поверхностной температуры $T_s(t)$ предложен в работе [9]. Алгоритм метода измерения теплового потока базируется на математическом аппарате дробных производных [11, 12] и использовании связи поверхностной температуры $T_s(t)$ с тепловым потоком $q(t)$ через дробную производную половинного порядка [9, 11]:

$$q(t) = -(\lambda \rho c)^{1/2} \frac{\partial^{1/2} T_s(t)}{\partial t^{1/2}}, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала; ρ – плотность материала; c – удельная теплоемкость материала; $\frac{\partial^{1/2} T_s(t)}{\partial t^{1/2}}$ – дробная производная половинного порядка по времени от $T_s(t)$, которая описывается интегродифференциальным уравнением Римана – Лиувилля [12]:

$$\frac{\partial^\alpha T_s(t)}{\partial t^\alpha} = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{T_s(\tau)}{(t-\tau)^\alpha} d\tau,$$

где $0 < \alpha < 1$ – дробный порядок дифференцирования; Γ – гамма-функция.

В данном случае (рис. 4) определение величины поверхностной температуры $T_s(t)$ реализуется импедансным методом измерения $T_s(t)$, а величина $q(t)$ определяется на основе математической зависимости (1) с использованием дробных производных половинного порядка.

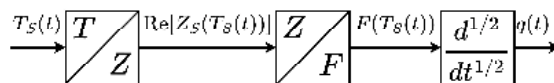


Рис. 4

Преимуществом предложенного метода измерения теплового потока является использование только одного датчика, измеряющего поверхностную температуру. При этом в качестве датчика можно использовать непосредственно сам электропроводящий объект согласно приведенному методу. Традиционные методы измерения теплового потока основаны на измерении с использованием двух датчиков и закона Фурье.

В предлагаемом методе применяется численный расчет дробных производных половинного порядка. В работе [13] представлен алгоритм расчета дробной производной в частотной области с использованием преимуществ быстрого преобразования Фурье.

Для верификации предложенного импедансного метода измерения и контроля поверхностной температуры $T_s(t)$ и теплового потока $q(t)$ разработана экспериментальная установка, позволяющая измерять электрический импеданс Z_s скин-слоя δ с погрешностью менее 2 %, определять поверхностную температуру $T_s(t)$ через реальную составляющую измеренного импеданса $T_s(t) = f(\text{Re}(Z_s))$ и вычислять величину нестационарного теплового потока $q(t)$ согласно (1).

Функциональная схема измерительной системы приведена на рис. 5. Здесь: 1 – блок управления и измерения; 2 – блок измерения температуры; 3 – блок измерения импеданса; 4 – монитор; 5 – электропроводящая исследуемая пластина; 6 – измерительный электрод и термопары; 7 – источник нагрева. Установка также оснащена термопарами К-типа с абсолютной погрешностью менее 1 °С в диапазоне температур 0...200 °С для оценки реальной температуры поверхности исследуемого объекта.

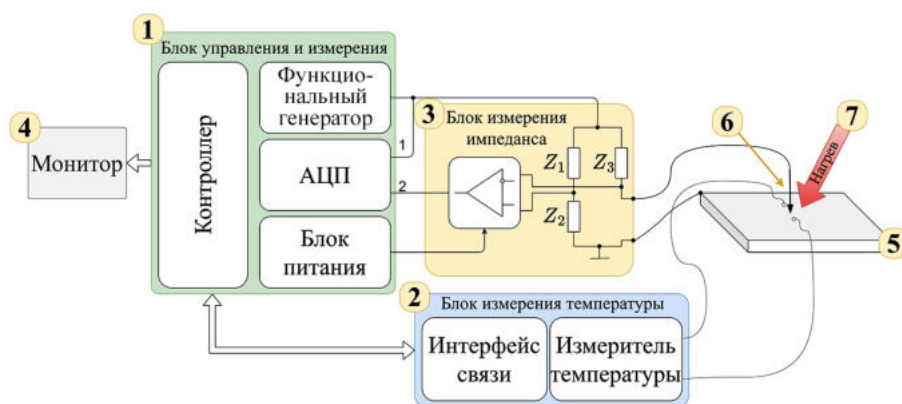


Рис. 5

Экспериментальная установка реализована на основе измерительного оборудования National Instruments, а именно шасси NI PXIe-1062Q с модулями NI PXIe-8840, NI PXI-5402, NI PXI-5122, NI PXI-4110 и шасси NI USB-9162 с модулем NI cRIO-9211. На исследуемом электропроводящем объекте (стальная пластина Ст3 толщиной 3 мм) установлены измерительный и общий электроды. Источником нагрева является фен паяльной станции. Зондирующий сигнал – гармоническое напряжение с частотой 1 МГц, при котором в стальной пластине возникает скин-слой толщиной менее 25 мкм.

Измерение неизвестного импеданса Z_S проводится при помощи мостового метода [14]. Величина электрического импеданса Z_S скин-слоя определяется согласно формуле

$$Z_S = aG + b, \quad (2)$$

где a , b – коэффициенты, определяемые в процессе первичной калибровки системы; $G = U_{\text{вх}}/U_{\text{вх}}$ – комплексный коэффициент передачи схемы; $U_{\text{вх}}$, $U_{\text{вых}}$ – комплексные амплитуды напряжений на входе и выходе измерительной схемы. Перед измерениями проводится первичная калибровка системы, которая заключается в определении коэффициентов a и b , позволяющих скомпенсировать влияние соединительных проводов и входных сопротивлений измерительных цепей.

Проведены экспериментальные исследования импедансного метода измерения поверхностной температуры $T_S(t)$ и получены временные функции отклика реальной составляющей импеданса $R_S = \text{Re}(Z_S)$ на скачкообразный нагрев (рис. 6, а). При измерениях поверхностная температура пластины дополнительно контролировалась термопарами, усредненное значение которой представлено на рис. 6, а (кривая T_S). Получены экспериментальные характеристики преобразования (рис. 6, б) для трех одинаковых условий.

В результате экспериментального исследования выявлена высокая корреляция (0,99) изменений поверхностной температуры $T_S(t)$ и реальной составляющей $R_S = \text{Re}(Z_S)$ импеданса скин-слоя. При этом чувствительность составила 0,6 мОм/°С (0,3 %/°С) в диапазоне температур 20... 80 °С. Расхождение (не более 15 %) показаний (см. рис. 6, а) при остывании (после 60 с) между результатами импедансного метода и термопар объясняется наличием теплового сопротивления в месте контакта термопар и исследуемой пластины, из-за которой их охлаждение воздухом происходит быстрее, чем охлаждение самой пластины. Эта особенность является преимуществом предложенного метода, так как исследуемый электропроводящий объект сам является чувствительным элементом и измеряется его реальная температура.

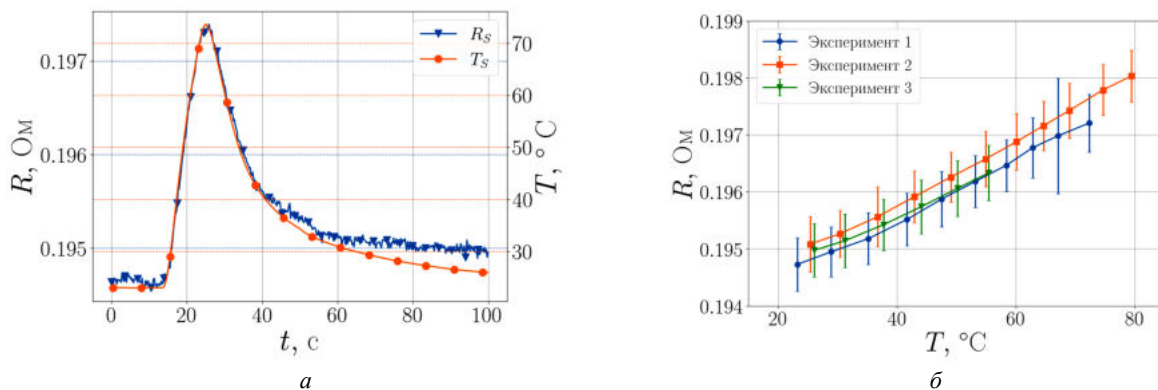


Рис. 6

Проведено аналогичное экспериментальное исследование импедансного метода измерения нестационарного теплового потока $q(t)$ (рис. 7). Одновременно и независимо измерялся тепловой поток методом вспомогательной стенки.

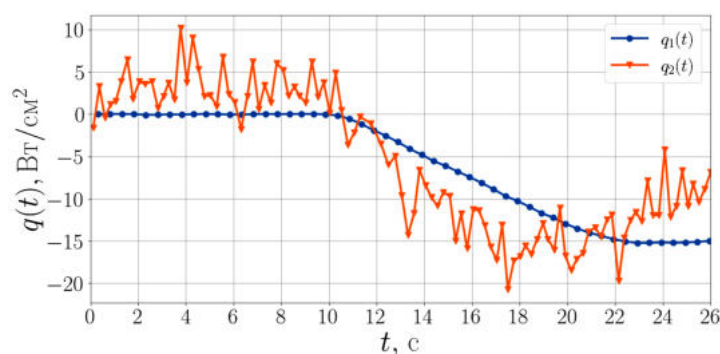


Рис. 7

Согласно результатам (см. рис. 7) инерционность предложенного импедансного метода меньше на 45 %, чем у классического метода вспомогательной стенки, что наблюдается в виде ускоренного отклика на нагрев. Кроме того, предложенный метод обеспечивает возможность измерения не только сквозного теплового потока, проходящего через исследуемый объект, но и определения величины теплового потока, испускаемого с поверхности образца, что подтверждается временным интервалом остывания экспериментального образца до комнатной температуры, составляющим до 10 с.

Предложен и разработан импедансный метод измерения и контроля поверхностной температуры $T_s(t)$ и нестационарного теплового потока $q(t)$ электропроводящих теплофизических объектов на основе использования скин-эффекта. Отличительная особенность и основное преимущество предложенного импедансного метода – использование электропроводящего объекта контроля в качестве чувствительного элемента, что позволяет уменьшить искажения теплового поля в процессе измерений, а также уменьшить тепловую инерционность измерений.

Для верификации предложенного метода разработана экспериментальная установка. Согласно результатам исследований импедансного метода измерения поверхностной температуры $T_s(t)$ установлена высокая корреляция (0,99) поверхностной температуры $T_s(t)$ и реальной составляющей импеданса скин-слоя $R_s = \text{Re}(Z_s)$. При этом метод измерения практически безынерционный, так как чувствительным элементом является сам электропроводящий объект контроля, а электрические измерения импеданса осуществляются в радиочастотном диапазоне (на частотах порядка мегагерц). По результатам экспериментальной проверки импедансного метода измерения нестационарного теплового потока, инерционность данного метода снижается на 45 % по сравнению с традиционным методом вспомогательной стенки.

Разработанный импедансный метод измерения и контроля поверхностной температуры и нестационарного теплового потока может применяться при разработке теплофизических приборов и средств измерения, контроля и диагностики, а также в научных исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дивин А.Г., Пономарев С.В. Методы и средства измерений, испытаний и контроля. Часть 3. Средства измерения температуры, оптических и радиационных величин. Тамбов: ТГТУ, 2013. 117 с.
2. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Основы градиентной теплотометрии. СПб.: СПбГУПТД, 2012. 203 с.
3. Evdokimov Yu.K., Denisov E.S., Fadeeva L.Yu. One-Dimensional Continuously Distributed Sensors for Thermophysical Fields: Method of Measurement, Model, and Numerical Algorithm // Measurement. 2021. Vol. 186. Article № 110082.
4. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988. 440 с.
5. Rahman M.S. et al. Broadband Mechanoresponsive Liquid Metal Sensors // Flexible Electronics. 2022. Vol. 6. № 71. Article № 71.
6. Способ определения концентрации газа: пат. 2739719 Рос. Федерация, № 2020126167; заявл. 3.08.2020; опубл. 28.12.2020, Бюл. № 1.
7. Timmerberg J., Martinovs A. The Use of Skin Effect for Measurement of Thickness of Sputtered Protective-Coatings // Transport and Aerospace Engineering. 2014. Vol. 1. P. 37–42.
8. Евдокимов Ю.К., Фадеева Л.Ю. Метод и алгоритм радиочастотного зондирования неоднородных электропроводящих структур // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2023. № 2. С. 94–102.
9. Способ определения нестационарного теплового потока: пат. 2787301 Рос. Федерация, № 2022113216; заявл. 17.05.2022; опубл. 9.01.2023, Бюл. № 1. 16 с.
10. Евдокимов Ю.К., Шафигуллин И.Д. Частотные характеристики импеданса планарных и сферических электродных систем в электропроводящих средах // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2024. № 10. С. 13–22.
11. Бабенко Ю.И. Метод дробного дифференцирования в прикладных задачах теории тепломассообмена. СПб.: НПО «Профессионал», 2009. 584 с.
12. Самко С.Г., Килбас А.А., Маричев О.И. Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. Минск: Наука и техника, 1987. 688 с.
13. Шафигуллин И.Д. Оценка времени расчета производной половинного порядка, основанного на алгоритме быстрого преобразования Фурье // Телекоммуникации: теория и технологии: Материалы 25-й Междунар. науч.-техн. конф., г. Казань, 22–24 нояб. 2023. Казань: КНИТУ-КАИ, 2023. С. 449–450.
14. Шафигуллин И.Д. Метод балансировки измерительного моста переменного тока для разработки устройства измерения нестационарного теплового потока // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: Материалы 8-й Междунар. науч.-техн. конф., г. Чебоксары, 22 нояб. 2024. Чебоксары: ЧувГУ, 2024. С. 191–196.

Поступила в редколлегию 20.03.25

IMPEDANCE METHOD BASED ON THE SKIN EFFECT FOR MEASURING AND CONTROLLING THERMODYNAMIC PARAMETERS OF ELECTRICALLY CONDUCTIVE THERMOPHYSICAL OBJECTS

I.D. Shafigullin

The article presents a new impedance method for measuring surface temperature and non-stationary heat flux in conductive thermophysical objects. The proposed method is based on the electric skin effect. An experimental setup has been developed. It has been shown that the real component of the skin layer impedance is more stable and has a clearly expressed response to changes in surface temperature. The time functions of the response of the real component of the skin layer impedance to a stepwise change in surface temperature and experimental characteristics of the transformation (dependence of the real component of the skin layer impedance on the surface temperature) for steel have been obtained. Experimental research of the impedance method for measuring non-stationary heat flow were conducted, as well as a comparative analysis of the obtained data with the results of independent measurements using the auxiliary wall method, which showed that the proposed impedance method is less inertial.

Keywords: impedance method, surface temperature, heat flow, non-stationary heat flow density, skin effect.

Шафигуллин Илназ Данилович – аспирант (КНИТУ-КАИ), Казань
E-mail: ilnaz_shafigullin@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 университета 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 изданиях.

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 заголовков: 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. Внутрисуночные 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, № 1 (119)

Ответственный за выпуск *Е.М. Зиннатуллина*
Компьютерная верстка – *А.А. Золина*

Подписано в печать 20.03.25. Выход в свет 25.03.25
Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 14.
Тираж 200. Заказ Д59. 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