

Лозовский И. В.
I. V. Lozovsky

**О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ОПЕРАЦИЙ,
ВЫПОЛНЯЕМЫХ ЛЕГКИМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ**

MATHEMATICAL SIMULATION OF LIGHT AIRBORN VEHICLE'S OPERATIONS



Лозовский Иван Владимирович – аспирант кафедры «Технология самолётостроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, пр. Ленина, 27. E-mail: Lozovsky@yandex.ru.

Mr. Ivan V. Lozovsky – PhD Candidate, Department of Aviation Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). Email: Lozovsky@yandex.ru

Аннотация. В статье приведены типовые операции для легких летательных аппаратов. Описана система математических моделей летательного аппарата, особенности математического моделирования операций. Приведен вариант критерия эффективности выполнения операции.

Summary. The paper describes typical operations for light airborne vehicles. A system of mathematical models of an aircraft is described. The features of mathematical modeling of operations are described. An efficiency indicator for operation performance is proposed.

Ключевые слова: системный анализ, легкая авиация, математическое моделирование.

Key words: system analysis, light aviation, mathematical simulation.

УДК 656.7.076

В настоящее время в мире значительный интерес уделяется созданию легких летательных аппаратов, которые могут быть более выгодными с экономической точки зрения для выполнения ряда задач. Из поставленных задач применения легких летательных аппаратов наиболее востребованы следующие: патрулирование береговой линии; патрулирование продуктопроводов и линий электропередач; использование летательного аппарата в качестве административного транспорта; связные функции; воздушное такси; мониторинг транспортных потоков; аэрофотосъемка; мониторинг окружающей среды; контроль состояния лесных массивов; рыбоохрана; патрулирование государственных границ; снабжение геологических партий и разведывательных групп; поисково-спасательные работы; сельскохозяйственные работы; медицинская помощь.

Большинство задач можно отнести к одной из трёх типовых операций:

- 1) транспортной;
- 2) поисковой;
- 3) авиационно-химических работ.

Методология проектирования летательных аппаратов в последние годы претерпела существенные изменения, суть которых в основном состоит в следующем:

- методы системного анализа и синтеза стали использоваться практически на всех этапах проектировочных работ;
- относительный объём неформализованных (творческих) поисков рациональных проектных решений снизился благодаря расширению сферы применения математического моделирования и более четкому структурированию проектных процедур;

• процессы разработки проекта и создания математических моделей, проблемно-ориентированных программных комплексов в ряде случаев совмещены по времени, что обусловлено необходимостью использования новых физических эффектов и принципиально новых решений.

Система математических моделей должна включать в себя (см. рис. 1):

- модель летательного аппарата;
- модель операции;
- расчет экономического эффекта (экономическая модель).

Задача моделирования летательного аппарата заключается в определении летно-технических характеристик, т.е. основывается на аэродинамическом расчете, массово-компоновочном расчете, расчете динамики полёта, расчете взлётно-посадочных характеристик. Модель учитывает тип и схему летательного аппарата.

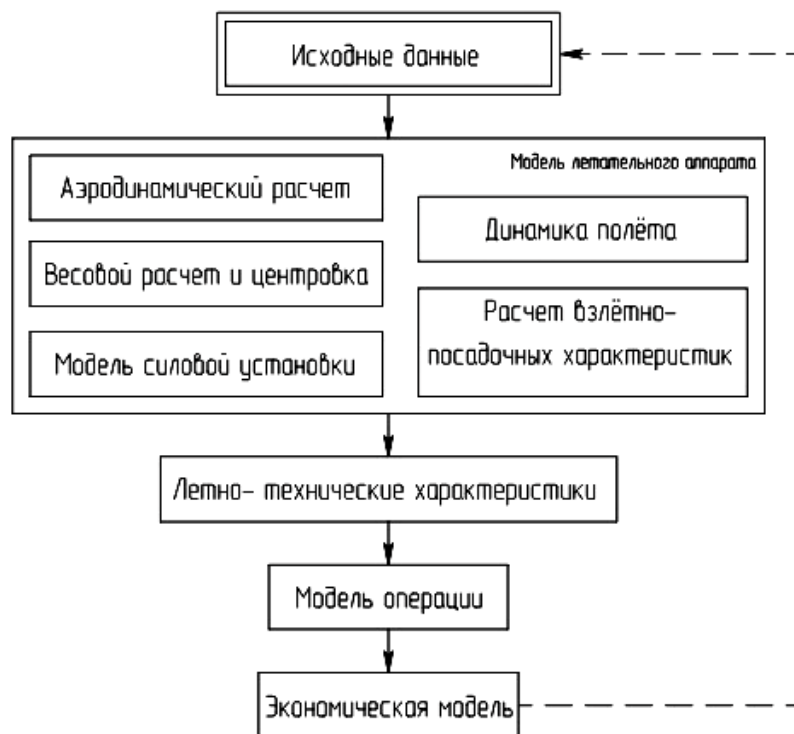


Рис. 1. Блок-схема взаимосвязей математических моделей (стрелками показаны потоки исходных данных)

Модель операции (модель функционирования) разрабатывается на основе построенной схемы операции в виде ряда последовательных этапов (шагов) и совокупности элементарных действий составляющих её элементов. Увеличивая глубину проработки модели операции, можно провести более детальный анализ различных вариантов, но это приводит к резкому росту затрат времени на поиск и подготовку исходной информации. Уменьшение же размерности модели операции приводит к потере части информации и, как следствие, к нерациональным проектным решениям на выходе. Модель операции должна учитывать особенности ландшафта, климата, инфраструктуры.

На рис. 2 представлена схема транспортной операции, где выделяются следующие этапы: два наземных участка (А-а1, а2-Б); взлет и набор высоты (а1-1); воздушный участок (1-2); заход на посадку и посадка (2-а2); погрузка, разгрузка в точках а1 и а2.

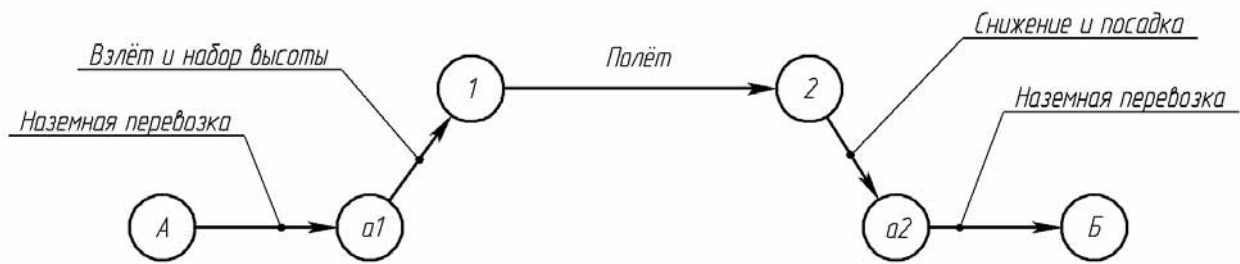


Рис. 2. Схема транспортной операции

На рис. 3 представлены схемы двух видов поиска (поиск в заданной зоне и поиск на рубеже). Поиск представляет обследование заданного района для обнаружения объекта или установления его отсутствия. Он проводится в тех случаях, когда нет данных о месте нахождения объекта на определённый момент времени.

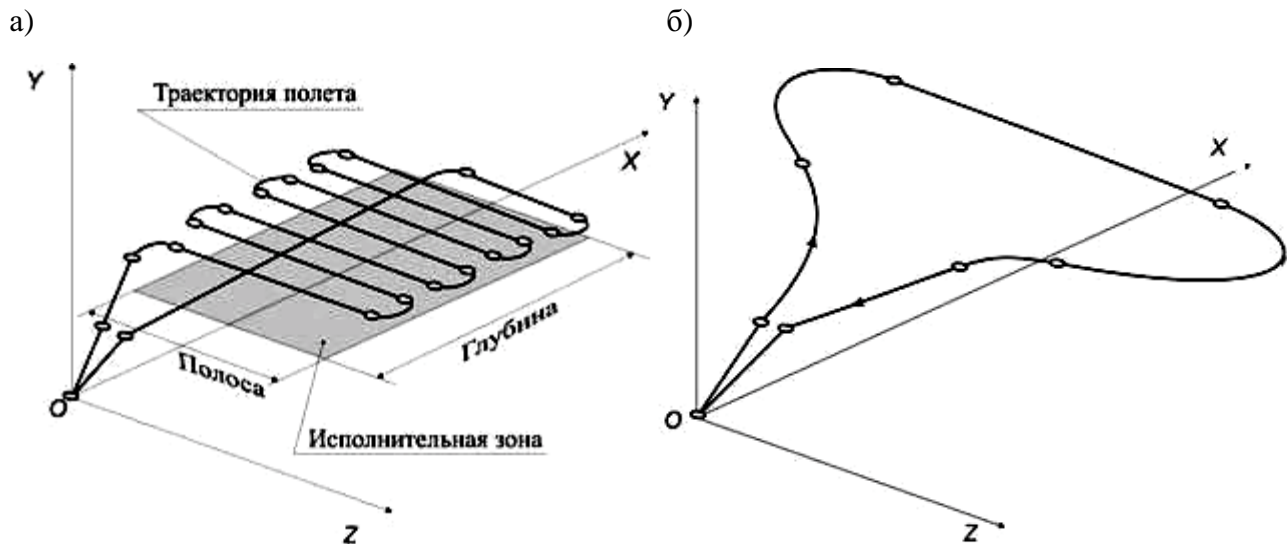


Рис. 3. Схема поисковой операции: а – поиск в заданной зоне; б – поиск на рубеже

Этапы операции поиска аналогичны этапам транспортной операции. На этапе непосредственного поиска (аналогичен этапу 1-2 транспортной операции, см. рис. 2) рассматривается производительность поиска. Для первого случая определяется площадь поиска (исполнительной зоны), для второго – длина рубежа:

$$W = \text{Ш}_{\text{п.о}} \cdot v_{\text{po}},$$

$$\text{Ш}_{\text{п.о}} = (N_{\text{н}} - 1) d_{\text{н}} + 2D_{\text{об}},$$

$$v_{\text{po}} = k_v (v_{\text{н}} + v_{\text{ц}}),$$

где $\text{Ш}_{\text{п.о}}$ – эффективная полоса обнаружения; $N_{\text{н}}$ – количество наблюдателей; $D_{\text{об}}$ – диаметр зоны обнаружения; $d_{\text{н}}$ – расстояние между наблюдателями; v_{po} – средняя относительная скорость поиска; k_v – коэффициент скорости; $v_{\text{н}}$ – скорость наблюдателя; $v_{\text{ц}}$ – скорость цели. Коэффициент скорости определяется по формуле

$$k_v = 0,446 \left(\frac{v_{\text{н}}}{v_{\text{ц}}} \right)^2 - 0,789 \frac{v_{\text{н}}}{v_{\text{ц}}} + 0,989.$$

Лозовский И. В.

**О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ОПЕРАЦИЙ,
ВЫПОЛНЯЕМЫХ ЛЕГКИМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ**

Диаметр зоны обнаружения характеризуется используемыми средствами наблюдения, например: радиолокацией, оптическими приборами, а также помехами в данном диапазоне (в том числе и погодными условиями).

Технология выполнения авиационно-химических работ заключается в последовательном нанесении параллельных полос химикатов на обрабатываемый участок. Схема операции представлена на рис. 4.

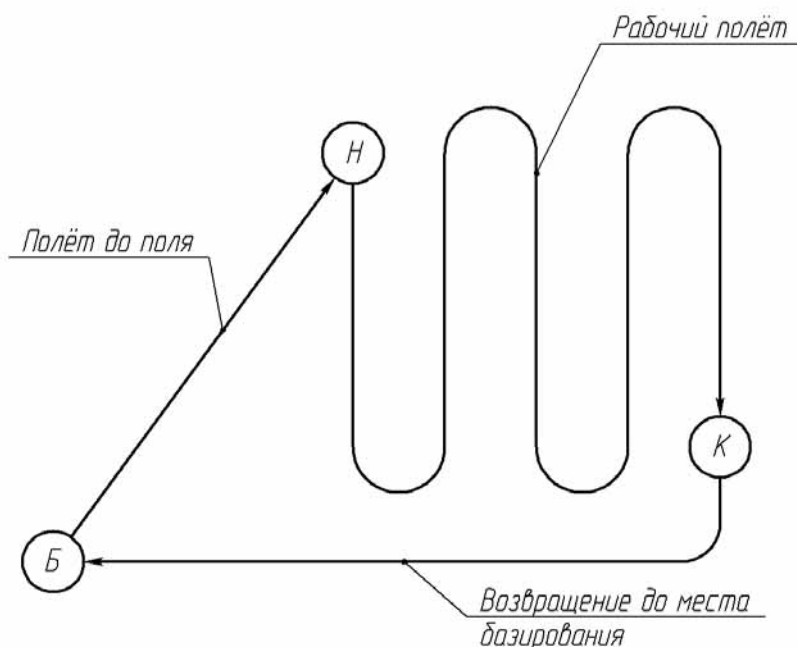


Рис. 4. Схема операции авиационно-химических работ

Особенностью авиационно-химических работ является то, что рабочая высота полёта составляет $H_{\text{раб}} = 5 \dots 20$ м, в зависимости от рельефа, в конце каждого прохода (гона) необходимо выполнить разворот. Моделирование данной операции показывает, что большое время тратится на развороты (до 50 %) и перелёт с места базирования до обработки и обратно (до 30 %). Уменьшение этих показателей ведёт к увеличению эффективности операции.

Модель оценки экономических показателей разрабатываемого летательного аппарата определяет финансовые, материальные и людские затраты на всём протяжении жизненного цикла системы (разработка, изготовление, эксплуатация, утилизация).

Рассмотрим транспортную операцию, выполняемую различными летательными аппаратами с одинаковой полезной нагрузкой. Критерием оценки такой операции может служить критерий Д. Л. Томашевича:

$$\Theta = \frac{P}{B},$$

где Θ – эффективность летательного аппарата; P – транспортная работа летательного аппарата; B – затраты на всём протяжении жизненного цикла системы. Таким образом, чем больше значение Θ , тем летательный аппарат более эффективен для эксплуатанта.

Результаты моделирования представлены на рис. 5, где показан график зависимости эффективности транспортной операции от дальности полёта для различных летательных аппаратов.

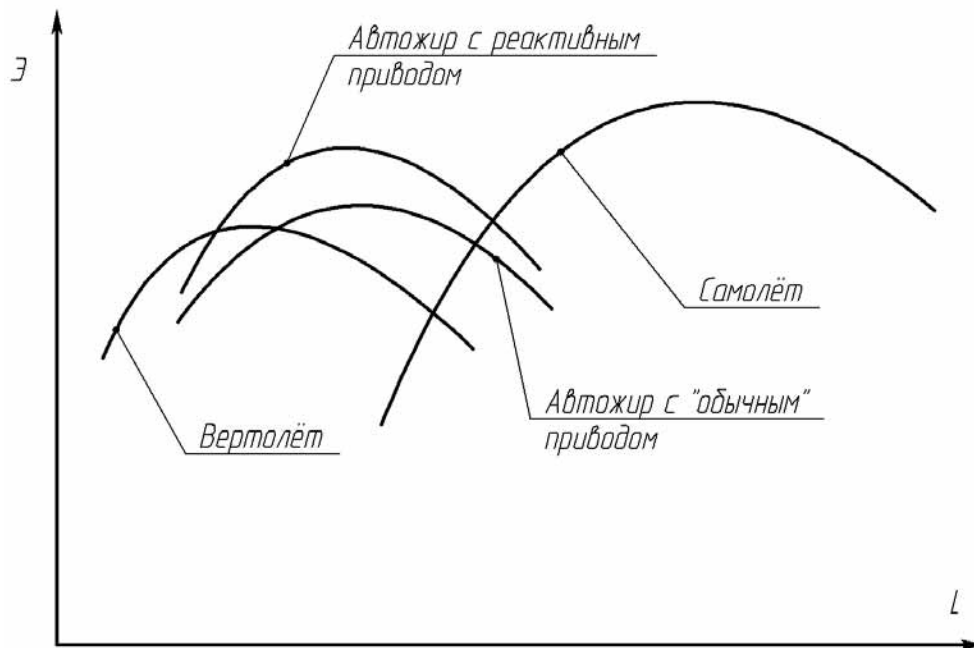


Рис. 5. Зависимость эффективности транспортной операции от дальности полёта различных летательных аппаратов

Полученная функция может использоваться в качестве целевой как при проведении предварительных расчетов, так и при проведении оптимизационного проектирования, поскольку для каждого летательного аппарата существует своя зона ограничений максимальных значений эффективности.

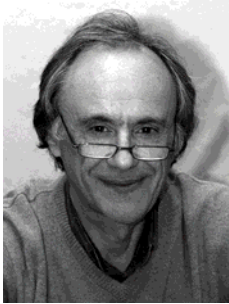
ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по исследованию операций / В. А. Абчук [и др.]; под общ. ред. Ф. А. Матвейчука. – М.: Воениздат, 1979. – 368 с.: ил.
2. Гуляев, В. В. Математическое моделирование при формировании облика летательного аппарата / В. В. Гуляев, О. Ф. Демченко, Н. Н. Долженков. – М.: Машиностроение / Машиностроение-Полёт, 2005. – 496 с.
3. Сарымсаков, Х. Г. Сельскохозяйственные самолёты / Х. Г. Сарымсаков. – М.: Машиностроение, 1979. – 184 с.
4. Саркисян, С. А. Экономическая эффективность перевозок грузов воздушным транспортом / С. А. Саркисян, Э. С. Минаев, П. А. Нечаев. – М.: Транспорт, 1984. – 168 с.

Лейзерович Г. С., Симонов В. С.
G. S. Leyzerovich, V. S. Simonov

**О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ФОРМ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ
ТОНКИХ КРУГОВЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК
С РАЗНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ**

**ON INTERACTION OF VIBRATION MODES OF THIN CIRCULAR CYLINDRICAL
SHELLS WITH DIFFERENT PARAMETRES OF WAVE FORMATION**



Лейзерович Григорий Самуилович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Механика и анализ конструкций и процессов» Комсомольско-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktpm@knastu.ru

Mr. Grigoriy S. Leyzerovich — PhD in Engineering, Assistant Professor, Professor of the Department of Mechanics and Analysis of Processes and Structures, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktpm@knastu.ru.



Симонов Валерий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика и анализ конструкций и процессов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Mr. Valeriy S. Simonov — PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Mechanics and Analysis of Processes and Structures, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. Рассмотрены малые изгибные колебания тонкостенной круговой цилиндрической оболочки с граничными условиями Навье. Считается, что оболочка имеет начальные отклонения от идеальной круговой формы. Анализ основан на уравнениях движения теории пологих оболочек. Установлено, что начальные неправильности могут привести к интенсивному взаимодействию изгибных форм с разным, но близким, числом окружных волн.

Summary. The paper considers small flexural vibrations of a thin-walled circular cylindrical shell with Navier boundary conditions. It is believed that the shell has initial deviations from the ideal circular shape. The analysis is based on the equations of motion within the theory of shallow shells. It has been established that initial imperfections may lead to an intensive interaction of flexural modes with different, but close, numbers of circumferential waves.

Ключевые слова: круговая цилиндрическая оболочка, начальные неправильности, взаимодействие изгибных форм.

Key words: circular cylindrical shell, initial imperfections, interaction of flexural modes.

УДК 539.3:534.1

Введение. Теоретически установлено [4], что изгибные колебания оболочки с большими амплитудами при определенных условиях представляют собой режим бегущей волны. Этот режим характеризуется взаимодействием сопряженных изгибных форм (форм с одинаковыми волновыми параметрами, сдвинутых в окружном направлении на угол $\pi/2$).

Однако на практике и в экспериментах, даже при относительно небольших уровнях периодического возбуждения, отмечается и взаимосвязанность изгибных форм с разным, но близким, числом окружных волн n . Принято считать, что механизмом, запускающим такое взаимодействие, является геометрическая нелинейность оболочки [1; 3].

Ниже будет показано, что взаимодействие упомянутых изгибных форм может быть обнаружена даже в линейной постановке. И обусловлена она наличием у оболочки неизбежных начальных неправильностей w_0 .

Математическая модель. Пусть оболочка радиусом R , длиной l и толщиной h совершает малые свободные изгибные колебания. Анализ основывается на уравнениях движения теории пологих оболочек [2]:

$$\frac{1}{E} \nabla^4 \Phi = -L(w_0, w) - \frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \quad \frac{D}{h} \nabla^4 w = L(w_0, \Phi) + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где ∇^4 и L – известные дифференциальные операторы; w – прогиб; Φ – функция напряжений; $D = Eh^3/12(1-\mu^2)$ – цилиндрическая жесткость; E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона; ρ – массовая плотность; t – время.

Считается, что оболочка имеет начальные неправильности

$$w_0(y) = f_0 \cos \beta_0 y; \quad \beta_0 = n_0/R,$$

где f_0 – амплитуда; n_0 – число волн.

Прогиб оболочки с краевыми условиями Навье аппроксимируется выражением, предполагающим связанность изгибных форм с разным числом окружных волн $n_1 \neq n_2$:

$$w(x, y, t) = [f_1(t) \cos \beta_1 y + f_2(t) \cos \beta_2 y] \sin \alpha x; \quad \beta_1 = n_1/R; \quad \beta_2 = n_2/R; \quad \alpha = \pi/l.$$

Собственные частоты идеальной оболочки. Квадрат n -й безразмерной собственной частоты определяется по формуле [2]

$$\omega_n^2 = \frac{\varepsilon_n (1 + \theta_n^2)^2}{12(1 - \mu^2)} + \frac{\theta_n^4}{(1 + \theta_n^2)^2},$$

где $\varepsilon_n = (n^2 h/R)^2$; $\theta_n = \pi R/nl$.

Рассмотрим, например, оболочку с параметрами $l/R = 0,6$; $R/h = 200$. Зависимость квадрата частоты такой оболочки от числа окружных волн n представлена на рис. 1.

Видно, что основной частоте соответствует $n = 10$. При этом $\omega_9^2 \approx \omega_{10}^2 \approx \omega_{11}^2$.

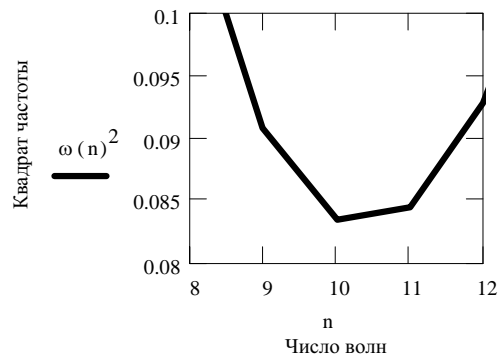


Рис. 1. Зависимость квадрата безразмерной собственной частоты от числа волн n

Частоты и формы собственных колебаний несовершенной оболочки. Покажем, что ω_0 могут привести к заметному взаимодействию форм, например, с числом волн $n_1 = 9$ и $n_2 = 11$. Решение (1) по схеме П.Ф. Папковича приводит к связанным уравнениям:

$$(\rho R^2/E)\ddot{a}_1 + c_{11}a_1 + c_{12}a_2 = 0; \quad (\rho R^2/E)\ddot{a}_2 + c_{21}a_1 + c_{22}a_2 = 0, \quad (2)$$

в которых

$$c_{11} = \omega_9^2 + \frac{\varepsilon\theta^4}{4} \left\{ \frac{1}{[\theta^2 + (1+n_9/n_0)^2]} + \frac{1}{[\theta^2 + (1-n_9/n_0)^2]} \right\} a_0^2;$$

$$c_{22} = \omega_{11}^2 + \frac{\varepsilon\theta^4}{4} \left\{ \frac{1}{[\theta^2 + (1+n_{11}/n_0)^2]} + \frac{1}{[\theta^2 + (1-n_{11}/n_0)^2]} \right\} a_0^2;$$

$$c_{12} = \frac{\varepsilon\theta^4}{4[\theta^2 + (1-n_9/n_0)^2]} a_0^2; \quad c_{21} = \frac{\varepsilon\theta^4}{4[\theta^2 + (1-n_{11}/n_0)^2]} a_0^2;$$

$$\varepsilon = (n_0^2 h/R)^2; \quad \theta = \pi R/n_0 l; \quad a_0 = f_0/h; \quad a_1 = f_1/h; \quad a_2 = f_2/h.$$

Анализ выражений для коэффициентов упругой связи $c_{12} = c_{21}$ свидетельствует о том, что механизмом, запускающим взаимодействие изгибных форм с разным, но близким, числом окружных волн, являются начальные отклонения от идеальной круговой формы.

Из частотного уравнения

$$(c_{11} - \omega_{0n}^2)(c_{22} - \omega_{0n}^2) - c_{12}^2 = 0,$$

соответствующего системе (2), находим квадраты безразмерных собственных частот несовершенной оболочки ω_{0n}^2 :

$$\omega_{011}^2 = \frac{1}{2} \left[c_{11} + c_{22} - \sqrt{(c_{11} - c_{22})^2 + 4c_{12}^2} \right]; \quad \omega_{09}^2 = \frac{1}{2} \left[c_{11} + c_{22} + \sqrt{(c_{11} - c_{22})^2 + 4c_{12}^2} \right].$$

Отношение амплитуд колебаний определяется по формуле

$$\kappa_{0n} = \frac{a_1}{a_2} = -\frac{c_{12}}{c_{11} - \omega_{0n}^2} = -\frac{c_{22} - \omega_{0n}^2}{c_{21}}. \quad (3)$$

Расчеты и выводы. Зависимость (3) для оболочки с рассматриваемыми выше параметрами, имеющей несовершенства с числом окружных волн $n_0 = 10$, представлена на рис. 2.

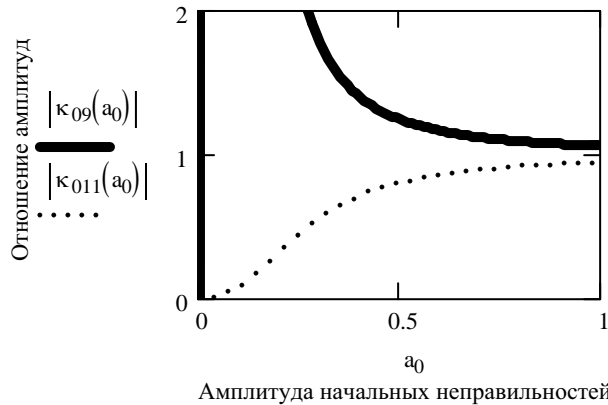


Рис. 2. Отношение амплитуд изгибных форм с разным числом окружных волн n



Из графика видно, что с ростом амплитуды начальных неправильностей связанность изгибных форм с числом волн $n=9$ и $n=11$ заметно усиливается. При $f_0 \geq h$ ($a_0 \geq 1$) амплитуды этих форм по модулю примерно равны между собой как при колебаниях оболочки с частотой $\omega_0 = \omega_{09}$, так и при колебаниях с частотой $\omega_0 = \omega_{011}$.

Это означает, что генерирование одной из собственных изгибных форм оболочки может привести к нежелательным, с точки зрения ее динамической прочности, интенсивным колебаниям по другой изгибной форме с близким числом окружных волн. И механизмом, запускаящим такое взаимодействие изгибных форм, являются начальные неправильности, неизбежные у реальной тонкостенной круговой цилиндрической оболочки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аврамов, К. В. Многомодовые модели свободных нелинейных колебаний шарнирно-опертых цилиндрических оболочек / К. В. Аврамов, Р. Е. Кочуров // Методы розв'язування прикладних задач механіки деформівного тіла. – 2009. – № 10. – С. 3-9.
2. Вольмир, А. С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек / А. С. Вольмир. – М.: Наука, 1972. – 432 с.
3. Кубенко, В. Д. Нелинейное взаимодействие форм изгибных колебаний цилиндрических оболочек / В. Д. Кубенко, П. С. Ковальчук, Т. С. Краснопольская. – Киев: Наук. думка, 1984. – 220 с.
4. Эвенсен, Д. А. Нелинейные колебания круговых цилиндрических оболочек / Д. А. Эвенсен // Тонкостенные оболочечные конструкции. – М.: Машиностроение, 1980. – С. 156-176.

Сериков А. В., Костюченко В. И.
A. V. Serikov, V. I. Kostyuchenko

**РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ РАСЧЁТА ТРЁХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ
ДЛЯ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОВОДОНАГРЕВА**

**RECOMMENDATIONS CONCERNING CALCULATION OF THREE-PHASE
TRANSFORMERS WITH A SPATIAL MAGNETIC SYSTEM FOR ELECTRIC
WATER HEATING PLANTS**



Сериков Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 8-909-899-05-98. E-mail: kem@knastu.ru.

Mr. Aleksandr V. Serikov – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Electromechanics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, 27 Lenina pr.; + (7909) 899-05-98. E-mail: kem@knastu.ru.



Костюченко Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент военной кафедры Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 8-914-173-63-08. E-mail: kem@knastu.ru.

Mr. Vladimir I. Kostyuchenko – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Military Education, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, 27 Lenina pr.; + (7914) 173-63-08. E-mail: kem@knastu.ru.

Аннотация. Представлена конструкция трёхфазного трансформатора с пространственной магнитной системой и короткозамкнутой обмоткой цилиндрического типа. Описаны особенности проектирования данного устройства. Приведены результаты расчёта трансформатора мощностью 25 кВт. Даны рекомендации для расчёта трансформатора минимальной стоимости с использованием метода планирования эксперимента.

Summary. The paper proposes a design of a three-phase transformer with a spatial magnetic system and a short-circuit cylindrical type winding. The peculiarities of designing such devices are described. Calculation results for a 25 kW transformer are given. Recommendations for calculating a minimum price transformer using the method of experimental design are given.

Ключевые слова: нагревательный элемент трансформаторного типа, электромагнитный расчёт, тепловой расчёт, планирование эксперимента.

Key words: transformer-type heating element, electromagnetic calculation, thermal calculation, method of experimental design.

УДК 621.314.21

Проблема горячего водоснабжения и отопления потребителей, удалённых от централизованных систем теплоснабжения, является в настоящее время актуальной. Использование децентрализованных систем позволяет экономить потребление энергоресурсов и осуществлять индивидуальное терморегулирование. Замена традиционных источников тепловой энергии электронагревательными установками облегчает контроль и регулирование температу-

ры, повышает надёжность оборудования. В качестве нагревательных элементов в приборах электронагрева широко применяются трубчатые нагревательные элементы, которые имеют существенные недостатки: низкий класс электробезопасности, небольшой срок службы и невысокую надёжность.

Качественно улучшить условия получения горячей воды могут нагревательные элементы трансформаторного типа (НЭТ), состоящие из магнитопровода, первичной и вторичной обмоток, причём вторичная обмотка выполняется в виде короткозамкнутого (КЗ) витка, в котором выделяется основная доля тепла [3]. Короткозамкнутая обмотка непосредственно, без дополнительного слоя изоляции и промежуточного теплообменника контактирует с нагреваемой водой. Такое техническое решение позволяет получить более безопасный в эксплуатации и надёжный нагревательный элемент с большим сроком службы. При выборе конструктивной схемы немаловажным фактором является возможность изготовления устройства на существующих предприятиях трансформаторостроения без значительных капиталовложений. В связи с этим возникает необходимость разработки и исследования данных конструкций.

Безопасность НЭТ обеспечивается многоуровневой электрической изоляцией первичной обмотки, отсутствием электрической связи между вторичной обмоткой и сетью. Кроме этого, на этапе проектирования напряжение витка выбирается так, чтобы на КЗ обмотке электрический потенциал был менее допустимого по условиям безопасной эксплуатации.

Конструкцией, удовлетворяющей этому условию, является трёхфазный трансформатор с пространственной магнитной системой призматической формы 1 (рис. 1). На стержнях магнитопровода размещена многослойная первичная обмотка 2. Вторичная обмотка состоит из трёх цилиндров 3, концентрически охватывающих первичные обмотки, боковины 4, охватывающей все три стержня с обмотками, и двух торцевых дисков 6 (верхнего и нижнего). Конструкция вторичной обмотки образует герметичную полую камеру 5, в которой циркулирует нагреваемая вода. В камере имеются патрубки для входа и выхода нагреваемой жидкости. Рассматриваемый нагревательный элемент работает в проточном режиме, причём для повышения коэффициента полезного действия (КПД) вторичная обмотка должна иметь хорошую тепловую изоляцию [3].

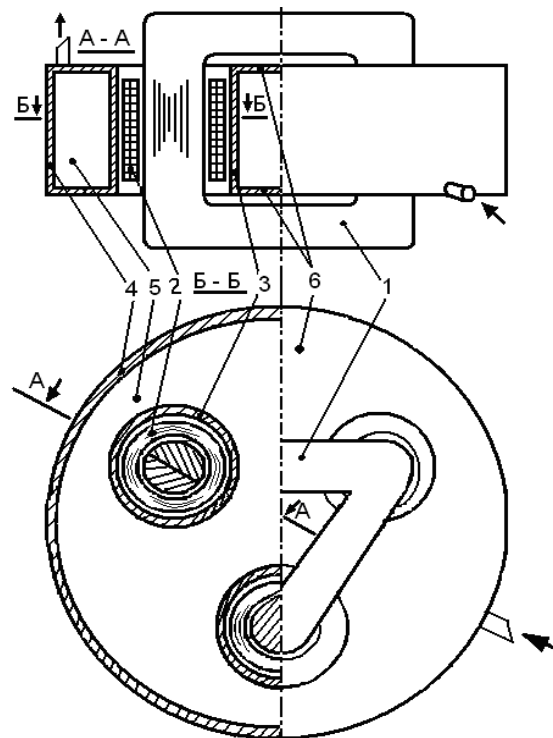


Рис. 1. Трёхфазный НЭТ с пространственной магнитной системой призматической формы

Так как существующие рекомендации для проектирования силовых трансформаторов [5] не учитывают особенности конструкции и режима эксплуатации НЭТ, то целью работы является создание методики проектирования и получение рекомендаций по выбору исходных данных для расчёта такого устройства.

За основу принята методика расчёта трёхфазного силового двухобмоточного сухого трансформатора [5]. Расчёт включает в себя:

- выбор исходных данных,
- определение основных электрических величин и размеров трансформатора,
- расчёт первичной и вторичной обмоток,
- окончательный расчёт магнитной системы,
- определение параметров холостого хода,
- тепловой и экономический расчёты.

Исходными данными к электромагнитному расчёту являются мощность трансформатора, число фаз, напряжение и частота питающей сети. По рекомендациям выбираются материалы первичной и вторичной обмоток, число витков первичной обмотки, геометрический коэффициент β , электромагнитные нагрузки (плотность тока в первичной обмотке и индукции в стержне и ярме магнитопровода), а также изоляционные расстояния главной изоляции обмоток.

При определении основных электрических величин и размеров трансформатора вычисляются по известным формулам [5] ток первичной обмотки, электродвижущая сила (ЭДС) витка, активное сечение и диаметр стержня, а также – предварительно – высота первичной обмотки.

Расчёт первичной обмотки включает в себя выбор провода, распределение витков по слоям, определение размеров многослойной цилиндрической обмотки, её массы, потерь в ней и уточняет ЭДС витка по формуле

$$E_{\text{в}} = \frac{U_{1\text{ф}} - I_{1\text{ф}} r_1}{w_1},$$

где $E_{\text{в}}$ – ЭДС витка, В; $U_{1\text{ф}}$ – фазное напряжение, В; $I_{1\text{ф}}$ – фазный ток, А; r_1 – активное сопротивление, Ом; w_1 – число витков в первичной обмотке.

Основной особенностью проектирования НЭТ является расчёт вторичного короткозамкнутого контура, который обеспечивает необходимые тепловые потери. Исходными данными является мощность тепловыделений во вторичной обмотке P_2 . Радиальные и осевые геометрические размеры должны быть привязаны к соответствующим размерам первичной обмотки. Толщина цилиндра δ подбирается таким образом, чтобы обмотка имела необходимое активное сопротивление и, следовательно, обеспечивала заданную мощность тепловыделений, определяемую по формуле

$$P_2 = mE_{\text{в}}^2 \left(\frac{1}{R_{2\text{ц}}} + \frac{2}{R_{2\text{т}}} \right),$$

где P_2 – мощность тепловыделений, Вт; m – число фаз; $R_{2\text{ц}}$, $R_{2\text{т}}$ – активные сопротивления цилиндра и торцевой части вторичной обмотки, Ом.

По геометрическим размерам определяется масса вторичной обмотки. Алгоритм расчёта вторичной обмотки представлен на рис. 2.

Методики окончательного расчёта магнитной системы и определения параметров холостого хода ничем не отличаются от соответствующих методик расчёта силового трансформатора с пространственной магнитной системой [5].

Важным этапом при расчёте трансформатора для установок электроводонагрева является оценка его теплового состояния. Для этого была составлена тепловая схема замещения для среднего по высоте сечения стержня (рис. 3). Расчёт проводился для наиболее нагруженного режима работы, когда все потери идут на нагрев воды в баке (теплоизолированный

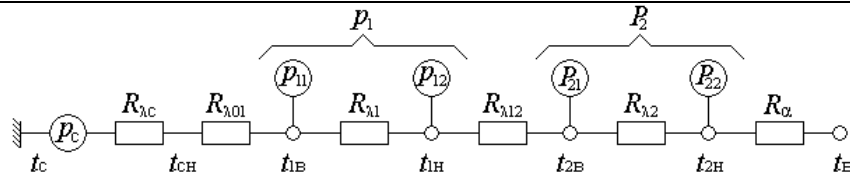


Рис. 3. Тепловая схема замещения:

p_c, p_1 – потери в магнитопроводе и первичной обмотке, Вт; $R_{\lambda c}, R_{\lambda 01}, R_{\lambda 1}, R_{\lambda 12}, R_{\lambda 2}$ – тепловые сопротивления теплопроводности стержня магнитопровода, между стержнем и первичной обмоткой, первичной обмотки, между первичной и вторичной обмотками и вторичной обмотки соответственно, °С/Вт; R_{α} – тепловое сопротивление теплоотдачи с поверхности вторичной обмотки, °С/Вт; $t_c, t_{сн}$ – температуры внутри и на поверхности стержня магнитопровода, °С; $t_{1в}, t_{1н}$ – температуры внутренней и наружной частей первичной обмотки, °С; $t_{2в}, t_{2н}$ – температуры на внутренней и наружной поверхностях цилиндра, °С; $t_в$ – температура воды, °С

По приведённой методике выполнены электромагнитные расчёты серии нагревательных элементов мощностью 10...100 кВт. Результаты расчёта трансформатора мощностью 25 кВт с короткозамкнутой вторичной обмоткой, выполненной из алюминиевого сплава марки АМГ5М, и первичной обмоткой из алюминиевого прямоугольного провода марки АПСДК приведены в табл. 1. Схема соединения первичной обмотки – звезда. Величина фазного напряжения 220 В.

Таблица 1

Результаты электромагнитного расчёта

Величина, единица измерения	Обозначение	Результат
Фазный ток первичной обмотки, А	$I_{1\phi}$	38,7
Диаметр стержня, м	d	0,063
Высота первичной обмотки, м	l	0,289
Внутренний диаметр первичной обмотки, м	$D_{1в}$	0,067
Наружный диаметр первичной обмотки, м	$D_{1н}$	0,131
Полные потери в первичной обмотке, Вт	p_1	551,4
ЭДС витка, В	$E_в$	0,902
Число витков	w_1	239
Мощность тепловыделений во вторичной обмотке, кВт	P_2	24,440
Толщина стенки цилиндров, торцевых частей и бака, мм	δ	1,11
Внутренний диаметр цилиндра, м	$D_{2в}$	0,135
Наружный диаметр цилиндра, м	$D_{2н}$	0,137
Удельная поверхностная мощность цилиндров, Вт/см ²	W_{Π}	6,11
Геометрический коэффициент	β	1,11
Длина стержня, м	l_c	0,319
Расстояние между осями стержней, м	C	0,148
Потери холостого хода, Вт	P_x	66,1
Наружный диаметр трансформатора, м	D_n	0,32
Масса первичной обмотки, кг	G_1	16,77
Масса бака, кг	G_2	2,23
Масса электротехнической стали, кг	$G_{ст}$	36,61
Стоимость активных материалов, у.е.	$C_{акт}$	63,14

Тепловое состояние НЭТ оценивалось для наиболее нагруженного режима при средней температуре нагреваемой воды 77,5 °С и её расходе 23,8 л/мин. При этом температура воды на входе в нагревательный элемент задавалась 70 °С (максимально допустимая в обратном трубопроводе при использовании в автономной системе теплоснабжения), а на выхо-

де составляла 85 °С. Коэффициенты теплопроводности материалов выбраны по [2] и имеют значения, приведённые в табл. 2.

При температуре теплоотдающей поверхности более 100 °С возникает кипение. В этом случае коэффициент теплоотдачи определялся по формуле

$$\alpha = \frac{44(t_{2H} - 100)^3}{t_{2H} - t_B} + \alpha_K,$$

где α – коэффициент теплоотдачи с учётом кипения, Вт/(м²·°С); t_{2H} – температура теплоотдающей стенки, °С; t_B – среднemasовая температура воды, °С; α_K – коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции без учёта кипения, определяемый по [2; 4], Вт/(м²·°С).

Таблица 2

Коэффициенты теплопроводности элементов конструкции трансформатора

Элемент конструкции	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
Стержень магнитопровода	4,00
Первичная обмотка поперёк намотки провода	1,75
Изоляция катушки	0,18
Вторичная обмотка	100,00

Результаты теплового расчёта по схеме замещения для трансформатора мощностью 25 кВт (рис. 4) показывают, что для таких устройств необходимо использовать изоляционные материалы класса нагревостойкости *H*.

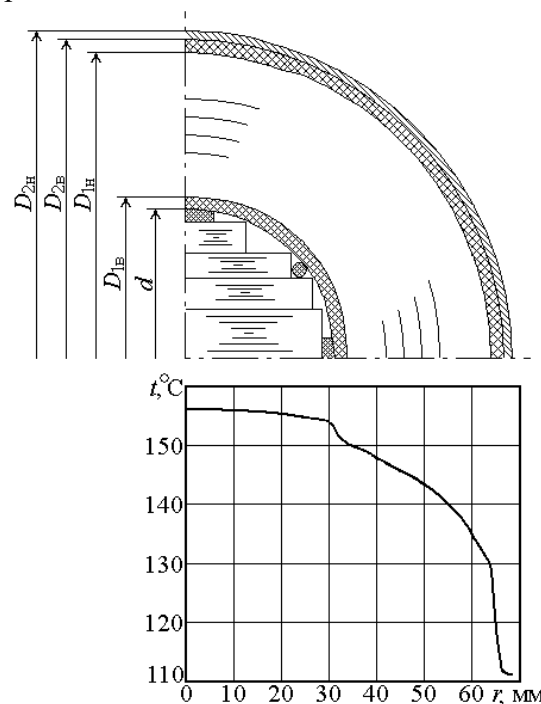


Рис. 4. Распределение температуры в среднем сечении

С целью получения рекомендаций для проектирования НЭТ в работе исследовано влияние числа витков в первичной обмотке w_1 и геометрического коэффициента β на массы активных материалов (провод первичной обмотки G_1 , магнитопровод $G_{ст}$ и материал бака G_2), на их стоимость $C_{акт}$, толщину листа вторичного контура δ , максимальную температуру изоляции $t_{из}$ и плотность теплового потока с поверхности цилиндра вторичной обмотки в воду $W_{п}$. Коэффициент β так же, как и в традиционных силовых трансформаторах, устанавливает соотношение между диаметром и высотой обмотки и для исследуемого устройства определяется по формуле

Сериков А. В., Костюченко В. И.

РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ РАСЧЁТА ТРЁХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ ДЛЯ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОВОДОНАГРЕВА

$$\beta = \frac{\pi d_{12}}{l} = \frac{\pi(D_{1в} + D_{2н})}{2l},$$

где d_{12} – средний диаметр первичной обмотки и цилиндра вторичной обмотки, м.

Математические модели, которые связывают все перечисленные параметры, найдены с помощью метода планирования эксперимента на основе ортогонального центрального композиционного плана (ОЦКП) второго порядка, что позволяет получить достаточно точные аппроксимирующие выражения в виде полиномов второй степени [1]. Электромагнитные нагрузки выбирались с учётом существующих рекомендаций для классических силовых трансформаторов. Очень важным моментом является выбор интервалов варьирования переменных факторов w_1 и β , так как от этого зависят в значительной степени результаты эксперимента и точность моделей. Задача осложняется тем, что число витков в первичной обмотке не может быть дробным, а уточнённый в результате расчётов коэффициент β может отличаться от предварительно заданного значения. Это объясняется тем, что геометрический коэффициент β определяется размерами первичной обмотки, которые зависят от распределения витков по слоям. Число витков в слое также не может быть дробным. С целью определения интервалов варьирования для числа витков и геометрического коэффициента β проведена серия предварительных расчётов. В каждом расчёте плотность тока в первичной обмотке выбиралась так, чтобы максимальная температура первичной обмотки не превышала 165 °С и соответствовала классу нагревостойкости изоляции H . Также накладывались ограничения по выбору числа витков, чтобы ЭДС витка не превысила безопасного значения 2 В. Другие ограничения при расчёте не ставились, так как распространять требование обеспечения заданных значений напряжения короткого замыкания и тока холостого хода на трансформаторы данного класса нецелесообразно.

В экономическом расчёте учитывались цены на алюминиевый обмоточный провод марки АПСДК сечением 27,9 мм² (147 р./кг) [6], электротехническую сталь марки 3413 (108 р./кг) [7] и алюминиевый сплав марки АМГ5М (179 р./кг) [8].

Результаты предварительных исследований показывают, что зависимости $C_{акт} = f(w_1)$ и $C_{акт} = f(\beta)$ имеют минимумы. Значения w_1 и β , при которых наблюдаются минимальные величины $C_{акт}$, принимаются за нулевой уровень варьирования факторов (табл. 3).

Таблица 3

Уровни варьирования факторов

Переменные факторы	Уровни варьирования				
	– α	– 1	0	+ 1	+ α
Число витков в первичной обмотке w_1	200	200	250	300	300
Геометрический коэффициент β	0,7	0,7	1,0	1,3	1,3

Примечание. $\alpha = 1$ – «звёздная точка» для двухфакторного ОЦКП второго порядка

По результатам расчётного эксперимента в соответствии с ОЦКП второго порядка для трансформатора мощностью 25 кВт определены коэффициенты полиномов для стоимости активных материалов $C_{акт}$, толщины вторичной обмотки δ , температуры изоляции $t_{из}$, плотности теплового потока $W_{п}$, масс провода первичной обмотки G_1 , магнитопровода $G_{ст}$, бака G_2 и получены следующие выражения в кодированной системе единиц:

$$\begin{aligned} C_{акт} &= 61,854 - 0,023w_1 - 0,785\beta + 2,955w_1\beta + 2,483w_1^2 + 1,848\beta^2; \\ \delta &= 1,076 + 0,523w_1 + 0,378\beta + 0,19w_1\beta + 0,097w_1^2 + 0,032\beta^2; \\ t_{из} &= 153,1 + 7,25w_1 + 13,233\beta + 3,075w_1\beta + 1,05w_1^2 + 1,0\beta^2; \\ W_{п} &= 5,989 - 0,277w_1 + 0,777\beta - 0,245w_1\beta - 0,083w_1^2 - 0,183\beta^2; \\ G_1 &= 16,739 + 3,386w_1 + 1,125\beta + 0,575w_1\beta + 0,28w_1^2 + 0,12\beta^2; \\ G_{ст} &= 35,492 - 6,616w_1 - 3,202\beta + 1,533w_1\beta + 1,611w_1^2 + 1,542\beta^2; \\ G_2 &= 2,161 + 1,198w_1 + 0,535\beta + 0,386w_1\beta + 0,295w_1^2 + 0,086\beta^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Поверхность отклика в факторном пространстве для зависимости $C_{\text{акт}} = f(w_1, \beta)$ имеет точку экстремума (минимума) $C_{\text{акт. min}}$ с координатами $w_{1\text{min}} = -0,23$ и $\beta_{\text{min}} = 0,4$ в кодированной системе единиц (рис. 5). Им соответствуют истинные значения факторов $w_{1\text{min}} = 239$ витков и $\beta_{\text{min}} = 1,11$.

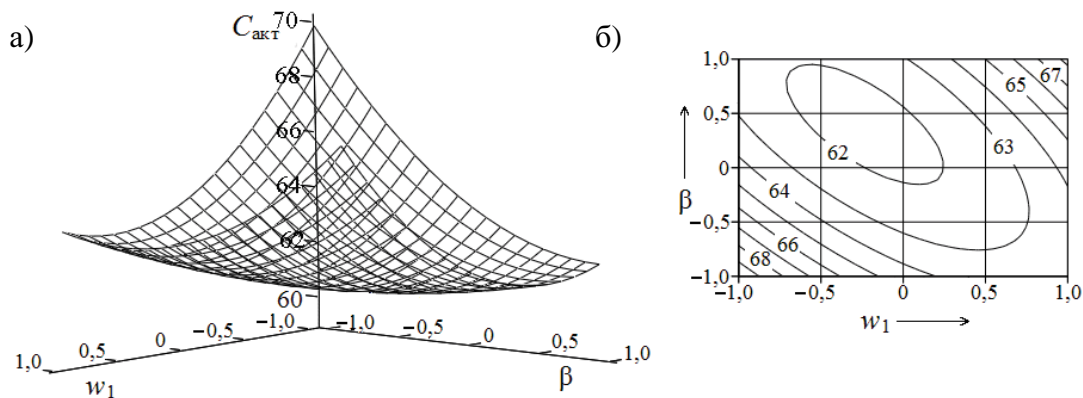


Рис. 5. Поверхность отклика (а) и контурный график (б) для НЭТ мощностью 25 кВт

При выборе наилучшего варианта проектирования учитывались следующие обстоятельства: во-первых, для обеспечения повышенной электробезопасности максимальное напряжение прикосновения к вторичной обмотке должно быть меньше допустимого по условиям эксплуатации. При расчёте принималось максимально возможное напряжение витка 2 В. Во-вторых, с целью замедления процесса образования накипи плотность теплового потока с теплоотдающей поверхности (наружной поверхности цилиндров) ограничивается величиной 10 Вт/см^2 . Это обстоятельство учитывалось при расчёте размеров цилиндров. В-третьих, температура изоляционных материалов не должна превышать допустимого значения для выбранного класса нагревостойкости H . В-четвёртых, толщина вторичной обмотки не может быть менее 1 мм для обеспечения достаточной прочности бака и возможности использования сварки при сборке вторичной обмотки. Важным является то, что все тепловые потери трансформатора при работе в качестве нагревательного элемента идут на нагрев воды и электромагнитный КПД может быть меньше, чем у классических трансформаторов, поэтому допустимо завышение электромагнитных нагрузок.

С целью получения рекомендаций по выбору исходных данных при расчёте трансформатора с короткозамкнутой вторичной обмоткой по полиномам (1) были построены зависимости $C_{\text{акт}} = f(w_1)$, $\delta = f(w_1)$, $t_{\text{из}} = f(w_1)$ и $W_{\text{п}} = f(w_1)$ при условии $\beta = \beta_{\text{min}}$ (рис. 6, а) и $C_{\text{акт}} = f(\beta)$, $\delta = f(\beta)$, $t_{\text{из}} = f(\beta)$ и $W_{\text{п}} = f(\beta)$ при $w_1 = w_{1\text{min}}$ (рис. 6, б). Анализ полученных графиков показывает, что функции для стоимости активных материалов имеют минимумы, которые определяют рекомендации по выбору числа витков первичной обмотки w_1 и геометрического коэффициента β . Ограничивающими условиями являются: температура изоляционных материалов $t_{\text{из}}$, толщина вторичной обмотки δ и плотность теплового потока $W_{\text{п}}$. Таким образом, из рис. 6 видно, что для трансформатора мощностью 25 кВт число витков в первичной обмотке рекомендуется выбирать в пределах 230...263, а геометрический коэффициент β – в пределах 1,04...1,29. Причём для удовлетворения всех ограничений при больших значениях β необходимо выбирать меньшие значения w_1 . В этом случае стоимость активных материалов не превышает минимальную стоимость более чем на 5 %, температура изоляционных материалов соответствует классу нагревостойкости H и толщина материала бака более 1 мм. Из графиков (см. рис. 6) видно, что в исследуемом интервале изменения w_1 и β условие по ограничению плотности теплового потока $W_{\text{п}}$ выполняется.

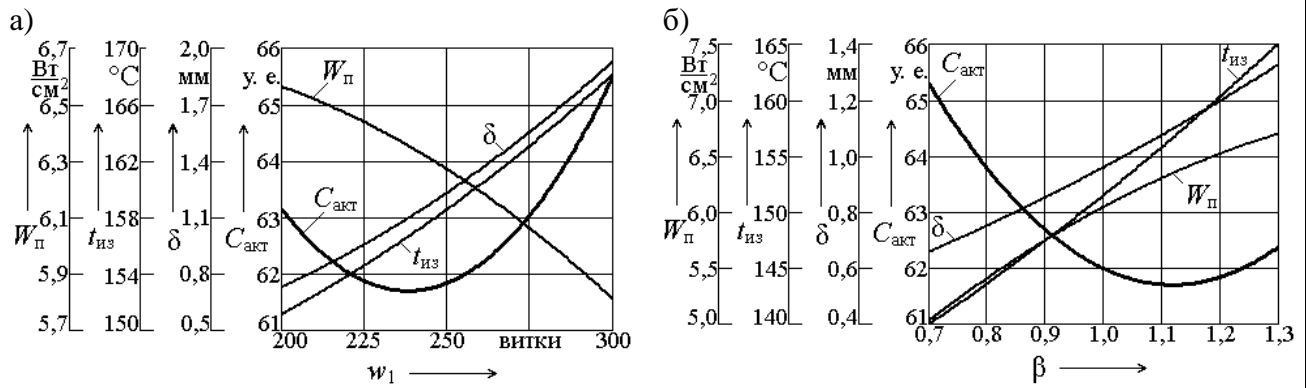


Рис. 6. Результаты исследований для НЭТ мощностью 25 кВт

Уравнения

$$G_1 = f(w_1, \beta), \quad G_{ст} = f(w_1, \beta) \quad \text{и} \quad G_2 = f(w_1, \beta)$$

позволяют получить универсальное выражение стоимости активных материалов для других цен по формуле

$$C_{акт}(w_1, \beta) = G_{ст}(w_1, \beta) + k_{1с}G_1(w_1, \beta) + k_{2с}G_2(w_1, \beta).$$

Полученная модель также может быть исследована для выявления варианта проектирования трансформатора с минимальной стоимостью активных частей.

С целью получения рекомендаций по выбору исходных данных при расчётах трансформаторов других мощностей по аналогичной методике исследовано влияние w_1 и β на массогабаритные и стоимостные показатели. На рис. 7 представлены результаты поиска варианта, соответствующего минимальной стоимости активных материалов $C_{акт}$ для трансформаторов мощностью $P_1 = 10 \dots 100$ кВт. Анализ результатов исследований показывает, что при мощностях более 40 кВт температура изоляционных материалов $t_{из}$ и плотность теплового потока с поверхности вторичной обмотки в воду $W_п$ могут превышать допустимые значения. Наиболее эффективным способом снижения $t_{из}$ и $W_п$ является уменьшение геометрического коэффициента β . В этом случае стоимость $C_{акт}$ увеличивается незначительно (менее 5%). Уменьшение электромагнитных нагрузок приводит к более значительному повышению стоимости и увеличению массогабаритных показателей всего трансформатора. В нагревательных элементах мощностью 100 кВт и более для обеспечения требуемых ограничений необходимо значительно уменьшать коэффициент β (до значений менее 0,6), что приводит к проблемам обеспечения прочности конструкции, поэтому трансформаторы мощностью 100 кВт и более не рекомендуется выполнять по такой конструктивной схеме. Следует отметить, что при использовании в качестве вторичной обмотки нержавеющей немагнитных сталей, стоимость активных материалов повышается на 15...20 %, что экономически менее выгодно.

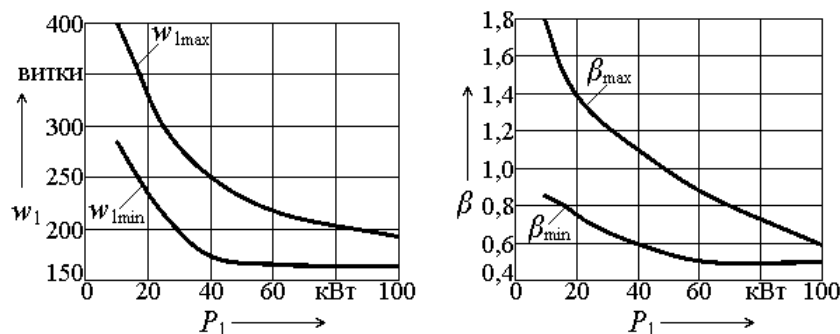


Рис. 7. Рекомендации по выбору исходных данных



Таким образом, в работе предложена конструкция трёхфазного трансформатора с короткозамкнутой вторичной обмоткой, работающего в качестве электропроводонагревателя; описаны разработанные методики электромагнитного и теплового расчётов с учётом особенностей конструкции, режима работы и эксплуатации таких устройств; приведены результаты исследований трансформатора мощностью 25 кВт с вторичной обмоткой, выполненной из алюминиевого сплава; предложены рекомендации для расчёта НЭТ мощностью 10...100 кВт минимальной стоимости с использованием математического аппарата метода планирования эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ивоботенко, Б. А. Планирование эксперимента в электромеханике / Б. А. Ивоботенко, Н. Ф. Ильинский, И. П. Копылов. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
2. Крейт, Ф. Основы теплопередачи / Ф. Крейт, У. Блэк. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
3. Сериков, А. В. Электронагревательные элементы и устройства трансформаторного типа для систем теплоснабжения: моногр. / А. В. Сериков, В. М. Кузьмин. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – 247 с.
4. Сипайлов, Г. А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчёты в электрических машинах / Г. А. Сипайлов, Д. И. Санников, В. А. Жадан. – М.: Высш. шк., 1989. – 239 с.
5. Тихомиров, П. М. Расчёт трансформаторов / П. М. Тихомиров. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
6. Прайс-лист на обмоточные провода ООО «Кабельпласт». URL: <http://www.cabelplast.ru/obmotka> (дата обращения 25.10.2010).
7. Прайс-лист оптовой металлоторговой компании «АВЕРС-Спецсталь». URL: <http://www.avers-steel.ru/prices> (дата обращения 25.10.2010).
8. Прайс-лист на цветной металл компании «МПП-Групп». URL: http://www.metalport.ru/prices/id_1621_page_6 (дата обращения 25.10.2010).

Алетдинов Р. Ф., Волкова Т. А.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ В ДУАЛЬНО-ИНВЕРСНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ ПУТЁМ СРАВНЕНИЯ РАЗМЕРНОСТЕЙ

Алетдинов Р. Ф., Волкова Т. А.

R. F. Aletdinov, T. A. Volkova

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ В ДУАЛЬНО-ИНВЕРСНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ ПУТЁМ СРАВНЕНИЯ РАЗМЕРНОСТЕЙ

DEFINING FUNCTIONAL RELATIONS IN DUAL INVERSION ELECTRODYNAMICS BY MEANS OF COMPARING DIMENSIONS

Алетдинов Рустам Фларидович – начальник электротехнической лаборатории ОАО «НЕФАЗ», (Россия, Нефтекамск); 452689, г. Нефтекамск, ул. Строителей, 87Б, кв. 27; +79874915830.

E-mail: rustikose@yandex.ru.

Mr. Rustam F. Aletdinov – head of electrical laboratory of ОАО «NEFAZ», (Russia, Neftekamsk); 452689, 87B Stroiteley str., apt.27, Neftekamsk city, Russian Federation; +79874915830.

E-mail: rustikose@yandex.ru

Волкова Татьяна Александровна – аспирант кафедры электромеханики УГАТУ (Россия, Уфа); 450005, г. Уфа, ул. Мингажева 156, кв. 47; (347)253-15-63. E-mail: volkovausatu@yandex.ru.

Ms. Tatyana A. Volkova – PhD candidate, Ufa State Aviation Technical University, Department of Electromechanics (Russia, Ufa); 450005, 156 Mingazhev str., apt.47, city of Ufa, Russian Federation. E-mail: volkovausatu@yandex.ru

Аннотация. Определены функциональные связи между элементами дуально-инверсной электродинамики. Рассмотрены их размерности и проведён анализ характеристик с применением LTM-физики.

Summary. The paper define functional relations between the elements of dual version electrodyamics. Their dimensions are considered and characteristics analyzed using the LTM-physics.

Ключевые слова: анализ размерностей; дуально-инверсная электродинамика; сопротивление; проводимость; ёмкость; индуктивность; электромагнитная энергия.

Key words: dimensional analysis; dual inversion electrodyamics; resistance; conductivity; capacitance; inductance; electromagnetic energy.

УДК 621.313; 530.1

Введение

Во многих областях физики и смежных наук – теплотехнике, гидромеханике и др. – метод, получивший название анализа размерностей (АР), нашёл широкое применение, так как АР предлагает унифицированную форму представления любой количественной зависимости между физическими величинами [11]. Однако в теории дуально-инверсной электродинамики он не применялся.

В работе применён метод АР для элементов дуально-инверсной электродинамики и произведено их качественное сравнение. Для этого приведены уравнения LTM-физики в системе размерности СГС и СИ. В [3] доказывается несостоятельность размерностей в системе СГС, хотя он широко применяется для анализа многими физиками. В [11] говорится о том, что нет необходимости расширять LMT-базис дополнительными размерностями, такими как: ϵ , μ , I и т.д. Но при определении размерностей индуктивности и ёмкости C и L в системе СГС мы окажемся в некотором тупике, ведь в системе СГС $\dim[C]$ и $\dim[L]$ имеют одинаковое значение L , выражающее пространственную величину. Хотя это упрощает некоторые виды анализа, но здесь не учитываются различия, которые проявляются при сравнении свойств электрического и магнитного полей таких, как ϵ и μ . Но так как $\epsilon \neq \mu$, то и $\dim[C] = L \neq \dim[L] = L$. Первое имеет истоки и стоки, т.е. силовые линии имеют начало и конец и прерываются на

проводящих поверхностях; второе всегда замкнуто. Поэтому значения размерностей приводятся в двух системах.

Метод АР состоит в получении критериев подобия без составления уравнений, описывающих данное явление, с помощью общих законов, на которых построена система единиц измерения величин, характеризующих исследуемое явление [9].

Получение функциональных связей

Для получения функциональных связей выделим величины пространства и времени L и T , т.к. любой процесс преобразования содержит в себе явное или неявное пространственно-временные соотношения – расстояния и промежутки времени, изменения в пространстве и во времени [7]. Пространство L – это совокупность соотношений, характеризующих координацию, протяженность и структуру материальных объектов. Время T – это совокупность отношений, характеризующих координацию сменяющих друг друга состояний материальных объектов, их последовательность и длительность процессов. За материальный объект примем массу электромагнитного поля m_0 , которая характеризуется способностью поля иметь при данной скорости определенную меру движения

$$m_0 = \frac{1}{c^2} (\bar{E} \cdot \bar{D} + \bar{H} \cdot \bar{B}).$$

В уравнениях индуктивных машин складываются напряжения (свойство последовательных цепей), в уравнениях же ёмкостных машин – токи (свойство параллельных цепей), так как в уравнениях индуктивной и ёмкостной машин с одной системой на статоре и на роторе видно, что уравнения, определяющие электрическое состояние машины, являются уравнениями напряжения для индуктивной машины и уравнениями тока для ёмкостной [4].

Математически эти уравнения совершенно аналогичны и одни могут быть получены из других, если произвести замену величин по следующему принципу [2; 4; 5]:

u	i	r	g	L	C
i	u	g	r	C	L

Таким образом, можно отметить три пары аналогий:

$$1) u - i; 2) r - g; 3) L - C.$$

1) Напряжение U связано с силой тока I и мощностью P постоянного тока соотношением:

$$P = IU, \text{ отсюда } U = P/I.$$

Размерность напряжения U :

$$\dim U = \frac{\dim P}{\dim I} = \frac{L^2 M T^{-3}}{L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}} = L^{1/2} M^{1/2} T^{-1},$$

тока I :

$$\dim I = L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}.$$

2) Единицей сопротивления является сопротивление проводника, по которому течёт ток, равный единице силы тока, при разности потенциалов на концах этого проводника, равной единице потенциала.

Размерность сопротивления R :

$$\dim R = L^{-1} T,$$

проводимости G :

$$\dim G = L T^{-1}.$$

Как видно из размерности, проводимость – величина, обратная сопротивлению.

3) Размерность индуктивности L :

$$\dim L = L,$$

ёмкости C :

$$\dim C = L.$$

Как видно из приведённого АР, первая пара, представляющая напряжение и ток, отличается показателями пространства и времени.

Метод определения функциональных связей не ограничивается АР базисных величин, поэтому также следует обратить внимание к непосредственному анализу характеристик преобразования электрической или магнитной энергии ёмкостным и индуктивным ЭМПЭ.

Единство выражений энергии при описании механических, электрических и магнитных систем можно записать следующим образом:

$$\text{Джоуль} = \text{Ньютон} \cdot \text{метр} = \text{Вольт} \cdot \text{Кулон} = \text{Ампер} \cdot \text{Вебер}.$$

Джоуль – это единица измерения механической работы, принятой в СИ [8].

Характерными различиями между электрическим и магнитным полями являются [5; 6]:

- 1) Силовые линии электрического поля незамкнуты, они начинаются и оканчиваются на заряженных телах;
- 2) Магнитные силовые линии всегда замкнуты; они не имеют ни начала, ни конца.

При рассмотрении размерностей энергии электрической и магнитной систем можем видеть следующие соотношения (в СИ):

- для ёмкостных компонент

$$U \cdot Q = [L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}] \times [L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}] = L^2 M T^{-2}; \quad (1)$$

- для индуктивных компонент

$$I \cdot B = [L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}] \times [L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}] = L^3 M T^{-3}. \quad (2)$$

Из соотношений (1), (2) видно, что для реализации конструкции индуктивной или ёмкостной машины необходимым условием является:

- для индуктивной машины сосредоточение магнитного потока должно занимать весь объём ферромагнитного потокопровода машины;
- для ёмкостной машины сосредоточение электрического поля должно обеспечиваться поверхностями электродов, заключённых в объёме диэлектрической оболочки машины (при условии, что поля не накладываются друг на друга).

Это также доказывается при получении основных уравнений из первого и второго уравнений Максвелла. Для ёмкостных машин интегральное преобразование Гаусса приводит к поверхностному интегралу, в то время как для индуктивных машин использование теоремы Стокса даёт контурный интеграл. Это различие отражается, прежде всего, на принципиальных сторонах конструкции машин. Так, из указанных математических теорем непосредственно следует, что активные элементы ёмкостных машин должны иметь форму материальных поверхностей, тогда как в индуктивных машинах активные элементы должны представлять собой материальные линии (контур) [6].

Также использование различного рода полей приводит и к различию в основных конструкционных материалах. Если в индуктивных машинах основными являются проводниковые и ферромагнитные материалы, то в ёмкостных машинах – проводниковые и диэлектрические материалы. Вместе с тем различие полей находит свое отражение в том, что в индуктивных машинах обязательно наличие замкнутого потокопровода, тогда как в ёмкостных машинах, в связи с прерывностью потока вектора электрического смещения, замкнутого потокопровода нет.

Полученные размерности отличны друг от друга величинами L и T . Преобразованные размерности постоянных сред для диэлектрической и магнитной сред в LT -размерности (при условии, что $\dim[q] = L^3 T^{-1}$) (см. прим. 1) будут:

$$\dim[\epsilon_0] = T^2, \quad \dim[\mu_0] = L^2.$$

Таким образом, можем видеть, что при участии длины (пространственной протяженности) токовое взаимодействие становится электромагнитным или сильным (амперовским). При участии времени токовое взаимодействие становится электростатическим (кулоновским) (см. прим. 1). При обращении к механическим аналогам электрических величин видим,

что аналогом электрического тока является механическая сила; механическим аналогом электрического напряжения является скорость. При этом должна осуществляться взаимная симметричная связь между элементами i и k системы:

$$\frac{\partial i_i}{\partial u_k} = \frac{\partial i_k}{\partial u_i}$$

Для понимания физического смысла по времени обратимся к характеристикам переходных процессов, протекающих в индуктивностях и емкостях (см. рис. 1 – 2) [10].

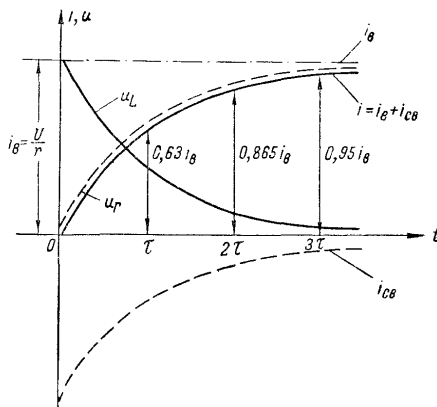


Рис. 1. Характеристика переходного процесса индуктивности

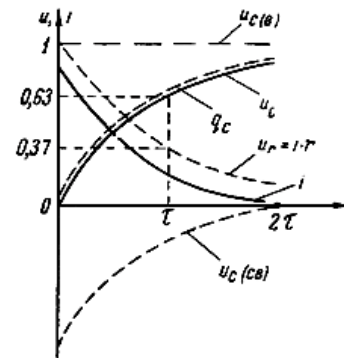


Рис. 2. Характеристика переходного процесса ёмкости

Ток в индуктивной машине будет стремиться достичь установившегося значения. Таким образом, работа индуктивной машины будет происходить в приграничной зоне установившегося режима. Также из графиков видно, что время, для достижения установившегося режима в ёмкостной машине составляет 2τ , тогда как для индуктивной машины – 3τ .

Рассматривая индуктивную и ёмкостную составляющую электрических машин методом АР, получили следующие немаловажные характеристики каждой из машин. Для обобщения полученные результаты сведем в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики размерностей электрических машин

	Тип электрической машины	
	индуктивная	ёмкостная
Размерность пространства	L^3	L^2
Размерность времени	T^3	T^2

По результатам, полученным в [13], можно заметить, что, несмотря на высокое значение относительной диэлектрической проницаемости (до 700), равные значения относительной диэлектрической проницаемости и относительной магнитной проницаемости лежат в пределах 30 единиц при составе шихты 40 % титаната бария и 60 % никель-цинкового феррита. Таким образом, для выполнения индуктивно-ёмкостных преобразователей следует соблюдать соотношение два к трём.

В [12] для двух дуальных электрических цепей показано, что должна соблюдаться пропорция между напряжениями и токами и удовлетворять условию:

$$\frac{u_L}{i_C} = \frac{u_C}{i_L} = K.$$

Вывод

Рассмотрев размерности электромагнитной и электростатической энергии, а также характеристики переходных процессов, можно сделать вывод: для достижения установившегося режима ёмкостной машиной потребуется меньше времени, чем для индуктивной машины. Это можно назвать одним из преимуществ ёмкостных ЭМПЭ по сравнению с индуктивными ЭМПЭ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бальчитис, А. А. Ёмкостная подобласть индукционных процессов преобразования потоков энергии / А. А. Бальчитис. – Вильнюс: Минтис, 1973. – 307 с.
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учеб. / Л. А. Бессонов. – 11-е изд., перераб. и доп. – М.: Гардарики, 2006. – 701 с.
3. Зайцев, Г. П. Об ошибочности системы единиц СГС / Г. П. Зайцев // ЖРФМ. – 1994. – № 1 – 4.
4. Каплянский, А. Е. Введение в общую теорию электрических машин: моногр. / А. Е. Каплянский. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1941. – 96 с.
5. Каплянский, А. Е. Теоретические основы электротехники: учеб. пособие для эл. техн. и энерг. спец. вузов / А. Е. Каплянский, А. П. Лысенко, Л. С. Полотовский [и др.]. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 1972. – 448 с.
6. Левитов, В. И. Электростатические генераторы с жестким ротором. Ч. 1. Электростатические генераторы с транспортерами-проводниками / В. И. Левитов, А. Г. Ляпин. – М.: ЦИНТИПРИБОРЭЛЕКТРОПРОМ, 1963. – 191 с.
7. Милях, А. Н. Принцип взаимности и обратимость явлений в электротехнике / А. Н. Милях, А. К. Шидловский. – Киев: Наукова думка, 1967. – 316 с.
8. Сена, Л. А. Единицы физических величин и их размерности / Л. А. Сена. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1977. – 336 с.
9. Тетельбаум, И. М. Модели прямой аналогии / И. М. Тетельбаум, Я. И. Тетельбаум – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1979. – 384 с.
10. Тихомирова, А. Е. Специальный курс электротехники, радиотехники и электроники / А. Е. Тихомирова, П. Л. Тихомиров. – Л.: Гостоптехиздат, 1960. – 484 с.
11. Филиппов, Г. Г. Теория размерностей и ЛТМ-физика / Г. Г. Филиппов. – М.: КомКнига, 2007. – 96 с.
12. Челухин, В. А. Математическое моделирование процессов преобразования энергии на основе дуально-инверсной электродинамики / В. А. Челухин. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 63 с.
13. Челухин, В. А. Электрооборудование с ёмкостными компонентами / В. А. Челухин. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 72 с.

ПРИМЕЧАНИЕ

1. Чуев, А. С. Фундаментальные физические постоянные – взаимосвязь размерностей и единство числовых значений в системе размерностей – ЛТ / А. С. Чуев. – Режим доступа: <http://chuev.narod.ru/fundam.htm>.

Алетдинов Р. Ф., Волкова Т. А.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ В ДУАЛЬНО-ИНВЕРСНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ
ПУТЁМ СРАВНЕНИЯ РАЗМЕРНОСТЕЙ

Алетдинов Р. Ф., Волкова Т. А.

R. F. Aletdinov, T. A. Volkova

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ В ДУАЛЬНО-ИНВЕРСНОЙ
ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ ПУТЁМ СРАВНЕНИЯ РАЗМЕРНОСТЕЙ**

**DEFINING FUNCTIONAL RELATIONS IN DUAL INVERSION
ELECTRODYNAMICS BY MEANS OF COMPARING DIMENSIONS**

Алетдинов Рустам Фларидович – начальник электротехнической лаборатории ОАО «НЕФАЗ», (Россия, Нефтекамск); 452689, г. Нефтекамск, ул. Строителей, 87Б, кв. 27; +79874915830.

E-mail: rustikose@yandex.ru.

Mr. Rustam F. Aletdinov – head of electrical laboratory of ОАО «NEFAZ», (Russia, Neftekamsk); 452689, 87B Stroiteley str., apt.27, Neftekamsk city, Russian Federation; +79874915830.

E-mail: rustikose@yandex.ru

Волкова Татьяна Александровна – аспирант кафедры электромеханики УГАТУ (Россия, Уфа); 450005, г. Уфа, ул. Мингажева 156, кв. 47; (347)253-15-63. E-mail: volkovausatu@yandex.ru.

Ms. Tatyana A. Volkova – PhD candidate, Ufa State Aviation Technical University, Department of Electromechanics (Russia, Ufa); 450005, 156 Mingazhev str., apt.47, city of Ufa, Russian Federation. E-mail: volkovausatu@yandex.ru

Аннотация. Определены функциональные связи между элементами дуально-инверсной электродинамики. Рассмотрены их размерности и проведён анализ характеристик с применением LTM-физики.

Summary. The paper define functional relations between the elements of dual version electrodyamics. Their dimensions are considered and characteristics analyzed using the LTM-physics.

Ключевые слова: анализ размерностей; дуально-инверсная электродинамика; сопротивление; проводимость; ёмкость; индуктивность; электромагнитная энергия.

Key words: dimensional analysis; dual inversion electrodyamics; resistance; conductivity; capacitance; inductance; electromagnetic energy.

УДК 621.313; 530.1

Введение

Во многих областях физики и смежных наук – теплотехнике, гидромеханике и др. – метод, получивший название анализа размерностей (АР), нашёл широкое применение, так как АР предлагает унифицированную форму представления любой количественной зависимости между физическими величинами [11]. Однако в теории дуально-инверсной электродинамики он не применялся.

В работе применён метод АР для элементов дуально-инверсной электродинамики и произведено их качественное сравнение. Для этого приведены уравнения LTM-физики в системе размерности СГС и СИ. В [3] доказывается несостоятельность размерностей в системе СГС, хотя он широко применяется для анализа многими физиками. В [11] говорится о том, что нет необходимости расширять LMT-базис дополнительными размерностями, такими как: ϵ , μ , I и т.д. Но при определении размерностей индуктивности и ёмкости C и L в системе СГС мы окажемся в некотором тупике, ведь в системе СГС $\dim[C]$ и $\dim[L]$ имеют одинаковое значение L , выражающее пространственную величину. Хотя это упрощает некоторые виды анализа, но здесь не учитываются различия, которые проявляются при сравнении свойств электрического и магнитного полей таких, как ϵ и μ . Но так как $\epsilon \neq \mu$, то и $\dim[C] = L \neq \dim[L] = L$. Первое имеет истоки и стоки, т.е. силовые линии имеют начало и конец и прерываются на

проводящих поверхностях; второе всегда замкнуто. Поэтому значения размерностей приводятся в двух системах.

Метод АР состоит в получении критериев подобия без составления уравнений, описывающих данное явление, с помощью общих законов, на которых построена система единиц измерения величин, характеризующих исследуемое явление [9].

Получение функциональных связей

Для получения функциональных связей выделим величины пространства и времени L и T , т.к. любой процесс преобразования содержит в себе явное или неявное пространственно-временные соотношения – расстояния и промежутки времени, изменения в пространстве и во времени [7]. Пространство L – это совокупность соотношений, характеризующих координацию, протяженность и структуру материальных объектов. Время T – это совокупность отношений, характеризующих координацию сменяющих друг друга состояний материальных объектов, их последовательность и длительность процессов. За материальный объект примем массу электромагнитного поля m_0 , которая характеризуется способностью поля иметь при данной скорости определенную меру движения

$$m_0 = \frac{1}{c^2} (\bar{E} \cdot \bar{D} + \bar{H} \cdot \bar{B}).$$

В уравнениях индуктивных машин складываются напряжения (свойство последовательных цепей), в уравнениях же ёмкостных машин – токи (свойство параллельных цепей), так как в уравнениях индуктивной и ёмкостной машин с одной системой на статоре и на роторе видно, что уравнения, определяющие электрическое состояние машины, являются уравнениями напряжения для индуктивной машины и уравнениями тока для ёмкостной [4].

Математически эти уравнения совершенно аналогичны и одни могут быть получены из других, если произвести замену величин по следующему принципу [2; 4; 5]:

u	i	r	g	L	C
i	u	g	r	C	L

Таким образом, можно отметить три пары аналогий:

$$1) u - i; 2) r - g; 3) L - C.$$

1) Напряжение U связано с силой тока I и мощностью P постоянного тока соотношением:

$$P = IU, \text{ отсюда } U = P/I.$$

Размерность напряжения U :

$$\dim U = \frac{\dim P}{\dim I} = \frac{L^2 M T^{-3}}{L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}} = L^{1/2} M^{1/2} T^{-1},$$

тока I :

$$\dim I = L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}.$$

2) Единицей сопротивления является сопротивление проводника, по которому течёт ток, равный единице силы тока, при разности потенциалов на концах этого проводника, равной единице потенциала.

Размерность сопротивления R :

$$\dim R = L^{-1} T,$$

проводимости G :

$$\dim G = L T^{-1}.$$

Как видно из размерности, проводимость – величина, обратная сопротивлению.

3) Размерность индуктивности L :

$$\dim L = L,$$

ёмкости C :

$$\dim C = L.$$

Как видно из приведённого АР, первая пара, представляющая напряжение и ток, отличается показателями пространства и времени.

Метод определения функциональных связей не ограничивается АР базисных величин, поэтому также следует обратить внимание к непосредственному анализу характеристик преобразования электрической или магнитной энергии ёмкостным и индуктивным ЭМПЭ.

Единство выражений энергии при описании механических, электрических и магнитных систем можно записать следующим образом:

$$\text{Джоуль} = \text{Ньютон}\cdot\text{метр} = \text{Вольт}\cdot\text{Кулон} = \text{Ампер}\cdot\text{Вебер}.$$

Джоуль – это единица измерения механической работы, принятой в СИ [8].

Характерными различиями между электрическим и магнитным полями являются [5; 6]:

- 1) Силовые линии электрического поля незамкнуты, они начинаются и оканчиваются на заряженных телах;
- 2) Магнитные силовые линии всегда замкнуты; они не имеют ни начала, ни конца.

При рассмотрении размерностей энергии электрической и магнитной систем можем видеть следующие соотношения (в СИ):

- для ёмкостных компонент

$$U \cdot Q = [L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}] \times [L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}] = L^2MT^{-2}; \quad (1)$$

- для индуктивных компонент

$$I \cdot B = [L^{3/2}M^{1/2}T^{-2}] \times [L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}] = L^3MT^{-3}. \quad (2)$$

Из соотношений (1), (2) видно, что для реализации конструкции индуктивной или ёмкостной машины необходимым условием является:

- для индуктивной машины сосредоточение магнитного потока должно занимать весь объём ферромагнитного потокопровода машины;
- для ёмкостной машины сосредоточение электрического поля должно обеспечиваться поверхностями электродов, заключённых в объёме диэлектрической оболочки машины (при условии, что поля не накладываются друг на друга).

Это также доказывается при получении основных уравнений из первого и второго уравнений Максвелла. Для ёмкостных машин интегральное преобразование Гаусса приводит к поверхностному интегралу, в то время как для индуктивных машин использование теоремы Стокса даёт контурный интеграл. Это различие отражается, прежде всего, на принципиальных сторонах конструкции машин. Так, из указанных математических теорем непосредственно следует, что активные элементы ёмкостных машин должны иметь форму материальных поверхностей, тогда как в индуктивных машинах активные элементы должны представлять собой материальные линии (контур) [6].

Также использование различного рода полей приводит и к различию в основных конструкционных материалах. Если в индуктивных машинах основными являются проводниковые и ферромагнитные материалы, то в ёмкостных машинах – проводниковые и диэлектрические материалы. Вместе с тем различие полей находит свое отражение в том, что в индуктивных машинах обязательно наличие замкнутого потокопровода, тогда как в ёмкостных машинах, в связи с прерывностью потока вектора электрического смещения, замкнутого потокопровода нет.

Полученные размерности отличны друг от друга величинами L и T . Преобразованные размерности постоянных сред для диэлектрической и магнитной сред в LT -размерности (при условии, что $\dim[q] = L^3T^{-1}$) (см. прим. 1) будут:

$$\dim[\varepsilon_0] = T^2, \quad \dim[\mu_0] = L^2.$$

Таким образом, можем видеть, что при участии длины (пространственной протяженности) токовое взаимодействие становится электромагнитным или сильным (амперовским). При участии времени токовое взаимодействие становится электростатическим (кулоновским) (см. прим. 1). При обращении к механическим аналогам электрических величин видим,

что аналогом электрического тока является механическая сила; механическим аналогом электрического напряжения является скорость. При этом должна осуществляться взаимная симметричная связь между элементами i и k системы:

$$\frac{\partial i_i}{\partial u_k} = \frac{\partial i_k}{\partial u_i}$$

Для понимания физического смысла по времени обратимся к характеристикам переходных процессов, протекающих в индуктивностях и емкостях (см. рис. 1 – 2) [10].

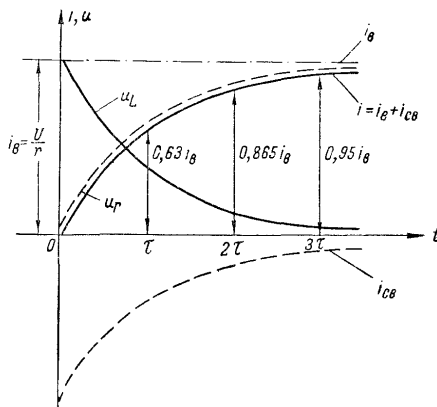


Рис. 1. Характеристика переходного процесса индуктивности

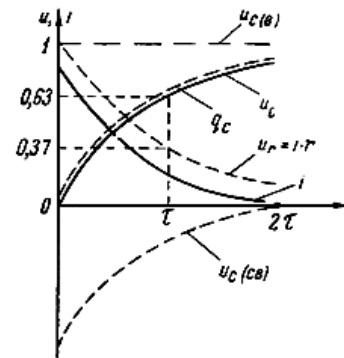


Рис. 2. Характеристика переходного процесса ёмкости

Ток в индуктивной машине будет стремиться достичь установившегося значения. Таким образом, работа индуктивной машины будет происходить в приграничной зоне установившегося режима. Также из графиков видно, что время, для достижения установившегося режима в ёмкостной машине составляет 2τ , тогда как для индуктивной машины – 3τ .

Рассматривая индуктивную и ёмкостную составляющую электрических машин методом АР, получили следующие немаловажные характеристики каждой из машин. Для обобщения полученные результаты сведем в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики размерностей электрических машин

	Тип электрической машины	
	индуктивная	ёмкостная
Размерность пространства	L^3	L^2
Размерность времени	T^3	T^2

По результатам, полученным в [13], можно заметить, что, несмотря на высокое значение относительной диэлектрической проницаемости (до 700), равные значения относительной диэлектрической проницаемости и относительной магнитной проницаемости лежат в пределах 30 единиц при составе шихты 40 % титаната бария и 60 % никель-цинкового феррита. Таким образом, для выполнения индуктивно-ёмкостных преобразователей следует соблюдать соотношение два к трём.

В [12] для двух дуальных электрических цепей показано, что должна соблюдаться пропорция между напряжениями и токами и удовлетворять условию:

$$\frac{u_L}{i_C} = \frac{u_C}{i_L} = K.$$

Вывод

Рассмотрев размерности электромагнитной и электростатической энергии, а также характеристики переходных процессов, можно сделать вывод: для достижения установившегося режима ёмкостной машиной потребуется меньше времени, чем для индуктивной машины. Это можно назвать одним из преимуществ ёмкостных ЭМПЭ по сравнению с индуктивными ЭМПЭ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бальчитис, А. А. Ёмкостная подобласть индукционных процессов преобразования потоков энергии / А. А. Бальчитис. – Вильнюс: Минтис, 1973. – 307 с.
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учеб. / Л. А. Бессонов. – 11-е изд., перераб. и доп. – М.: Гардарики, 2006. – 701 с.
3. Зайцев, Г. П. Об ошибочности системы единиц СГС / Г. П. Зайцев // ЖРФМ. – 1994. – № 1 – 4.
4. Каплянский, А. Е. Введение в общую теорию электрических машин: моногр. / А. Е. Каплянский. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1941. – 96 с.
5. Каплянский, А. Е. Теоретические основы электротехники: учеб. пособие для эл. техн. и энерг. спец. вузов / А. Е. Каплянский, А. П. Лысенко, Л. С. Полотовский [и др.]. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 1972. – 448 с.
6. Левитов, В. И. Электростатические генераторы с жестким ротором. Ч. 1. Электростатические генераторы с транспортерами-проводниками / В. И. Левитов, А. Г. Ляпин. – М.: ЦИНТИПРИБОРЭЛЕКТРОПРОМ, 1963. – 191 с.
7. Милях, А. Н. Принцип взаимности и обратимость явлений в электротехнике / А. Н. Милях, А. К. Шидловский. – Киев: Наукова думка, 1967. – 316 с.
8. Сена, Л. А. Единицы физических величин и их размерности / Л. А. Сена. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1977. – 336 с.
9. Тетельбаум, И. М. Модели прямой аналогии / И. М. Тетельбаум, Я. И. Тетельбаум – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1979. – 384 с.
10. Тихомирова, А. Е. Специальный курс электротехники, радиотехники и электроники / А. Е. Тихомирова, П. Л. Тихомиров. – Л.: Гостоптехиздат, 1960. – 484 с.
11. Филиппов, Г. Г. Теория размерностей и ЛТМ-физика / Г. Г. Филиппов. – М.: КомКнига, 2007. – 96 с.
12. Челухин, В. А. Математическое моделирование процессов преобразования энергии на основе дуально-инверсной электродинамики / В. А. Челухин. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 63 с.
13. Челухин, В. А. Электрооборудование с ёмкостными компонентами / В. А. Челухин. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 72 с.

ПРИМЕЧАНИЕ

1. Чуев, А. С. Фундаментальные физические постоянные – взаимосвязь размерностей и единство числовых значений в системе размерностей – ЛТ / А. С. Чуев. – Режим доступа: <http://chuev.narod.ru/fundam.htm>.

Комаровский Ю. А.
Yu. A. Komarovskiy

УХУДШЕНИЕ ТОЧНОСТИ GPS-ПРИЁМНИКА ВБЛИЗИ ВЫСОКИХ ОБЪЕКТОВ

GPS RECEIVER'S ACCURACY DEGRADATION NEAR TALL OBJECTS



Комаровский Юрий Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры теории и устройства судна Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского (Россия, Владивосток). E-mail: komarovskiy@msun.ru.

Mr. Yuriy A. Komarovskiy – PhD in Engineering, Senior Researcher at the Department of Ship Theory and Naval Architecture of the Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoi (Russia, Vladivostok). E-mail: komarovskiy@msun.ru.

Аннотация. Рассмотрены результаты эксперимента, в котором антенна GPS-приёмника была установлена возле высокого здания. Здание закрывало спутники, находящиеся в южной полусфере. Со стороны антенны вертикальный угол, измеряемый от горизонтальной плоскости до направления на верхнюю кромку здания (угол тени), составлял 80 градусов. При таких условиях размах варьирования координат достиг 200 м, а средняя квадратическая погрешность увеличилась в 10 раз.

Summary. We conducted an experiment where the antenna of a GPS receiver was placed near a tall building that blocked signals of the GPS satellites in the direction of the sky's southern hemisphere. From the base of the antenna (at the ground level), the angle of view of the building (top to bottom) was equal to 80 degrees. The obtained results showed that under the above conditions the coordinate observation errors reached 200 meters and the mean squared error rose 10-fold.

Ключевые слова: GPS-приёмник, затенение сигналов спутников системы GPS, случайная погрешность.

Key words: GPS-receiver, GPS satellites' signal shadowing, random error.

УДК 621.396.932.1:629.783

Несмотря на почти 30-летнюю эксплуатацию спутниковой радионавигационной системы (СРНС) Навстар GPS, до сих пор изучение её недостатков не нашло адекватного освещения в научной литературе. К числу недостатков СРНС Навстар GPS относится существенная потеря точности определения координат даже при незначительном затенении сигналов спутников расположенными рядом предметами. Как показали результаты экспериментальных наблюдений, проведённых автором в течение месяца, погрешности определения места приёмником GPS-128 возрастают до 43 м с вероятностью 0,95 при сравнительно малом затенении [2]. В отсутствие препятствий сигналам спутников точность приёмника GPS-128 не хуже 5 м с вероятностью 0,95. В практике применения приёмников СРНС Навстар GPS для определения координат носителя и его элементов вектора абсолютного перемещения нередко возникают ситуации, когда антенна приёмника оказывается рядом с высоким сооружением, создающим тень сигналам спутников. Такие явления наступают при движении наземных видов транспорта по пересечённой местности и в городе по улицам с высокой застройкой. Многократно фиксировались случаи, когда прекращалось автоматическое сопровождение автомобилей, оборудованных спутниковыми системами мониторинга и современными спутниковыми противоугонными системами, при въезде в город или при парковках возле высоких зданий. Подобные явления наблюдаются на судах, на которых антенна при-

ёмника СРНС Навстар GPS крепится на рейлингах верхних мостиков. Тогда судовые конструкции неизбежно затеняют сигналы спутников. Это приводит не только к заметному и внезапному ухудшению точности определения текущих координат и параметров его движения, но и к кратковременным прекращением нормальной работы приёмника. Отмечаются случаи существенного снижения качества работы авиационных приёмников СРНС Навстар GPS на вертолётах, совершающих полёты в горных ущельях. Данная статья предназначена для объяснения таких явлений, а также для оценки ухудшения точности координат.

Плоскости орбит спутников СРНС Навстар GPS имеют наклонение к плоскости экватора, равное 55° . В силу этого траектории спутников на небесной сфере с позиции наблюдателя, находящегося в широте Владивостока, выглядят так, как это показано на рис. 1, а. Относительно наблюдателя в промежуточной северной широте траектории располагаются таким образом, что к северу образуется область, в которую никогда не заходят спутники [3]. Эта область будет смещаться к зениту по мере перемещения GPS-приёмника к северу.

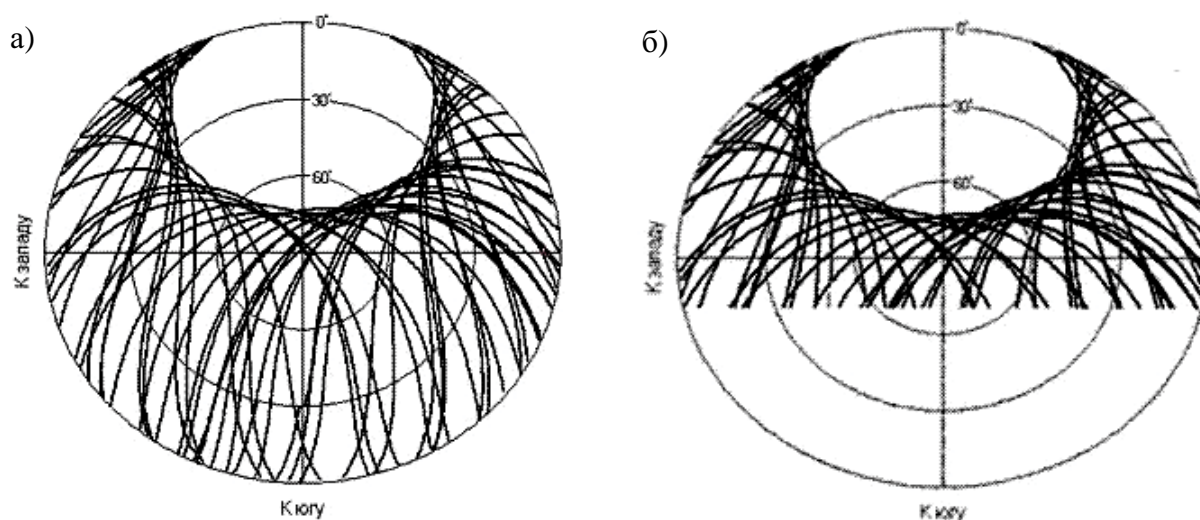


Рис. 1. Траектории спутников Навстар GPS для наблюдателя во Владивостоке:
 а – траектории без затенения сигналов спутников; б – траектории спутников при экранировании их сигналов с юга высоким сооружением

Если на пути сигналов спутников возникает высокое протяжённое препятствие, относительно которого антенна располагается к северу, то такие спутники не воспринимаются GPS-приёмником. Они становятся невидимыми приёмником. Траектории тех спутников, сигналы которых достигают приёмника, показаны на рис. 1, б. Из рисунка следует, что блокирование сигналов спутников с юга вызовет асимметрию в распределении определяемых широт GPS-приёмником. Так как траектории спутников (рис. 1, б) располагаются симметрично относительно меридиана наблюдателя, то определяемые долготы должны также распределяться симметрично.

Чтобы подтвердить эти предположения, а также оценить точность и характер распределения координат, был предпринят эксперимент. Он проводился в течение двух суток 22 и 23 октября 2010 г. во Владивостоке с судовым GPS-приёмником GP-37, изготовленным японской компанией Furuno. Антенна приёмника была установлена так, как это изображено на рис. 2.

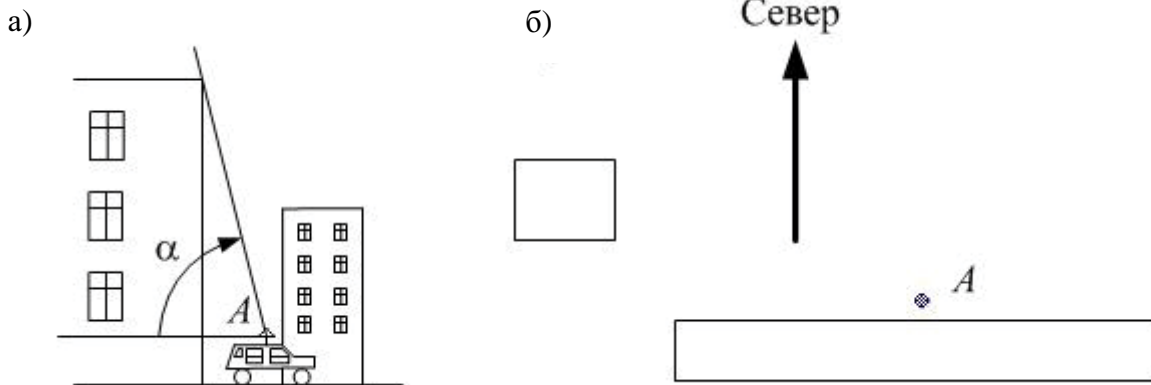


Рис. 2. Схема проведения эксперимента:
а – угол тени; б – расположение антенны в плане

Место проведения экспериментальных наблюдений было выбрано так, чтобы создающее с юга тень сигналам спутников здание было строго ориентировано своим большим размером вдоль параллели, а угол тени α составлял 80° . К сожалению, полной чистоты эксперимента достигнуть не удалось из-за здания, стоящего поодаль к западу. Информация от приёмника GP-37 ежесекундно автоматически записывалась в формате NMEA-0183 на жёсткий диск ноутбука в течение всех двух суток эксперимента. Приёмник был настроен на получение дифференциальных поправок контрольно-корректирующей станции мыса Поворотный.

Предварительная обработка накопленного статистического материала сводилась к выборке из всех записей только предложения \$GPGGA. Всего было зарегистрировано 173062 предложений \$GPGGA. Из них по каждой секунде наблюдений выделялись время по шкале UTC, динамические части координат в системе WGS-84, признак режима работы приёмника и число спутников, сигналы которых принимались в данный момент времени. Было обнаружено, что в месте проведения эксперимента дифференциальные поправки не принимались. Этот факт подтверждает предположение о неэффективности использования сигналов станций DGPS вблизи высоких сооружений [7].

Главным фактором, влияющим на точность работы приёмника любой СРНС, является число спутников, сигналы которых принимаются в данный момент времени. Чем их меньше, тем выше погрешности определения координат. Более того, если количество видимых спутников становится равным трём и менее, то приёмник СРНС прекращает определять координаты и элементы вектора абсолютного движения носителя. В результате обработки полученных данных оказалось, что на долю трёх и менее одновременно наблюдаемых спутников приходилось 8,6 % от всех зарегистрированных предложений \$GPGGA. При таком количестве спутников определение координат приёмником не происходило. Предложения \$GPGGA, соответствующие таким ситуациям, к обработке не принимались.

На рис. 3, а можно видеть гистограмму распределения числа одновременно радиовидимых спутников при угле тени 80° . Чаще всего в таких условиях одновременно наблюдалось пять спутников. Во время экспериментальных наблюдений созвездие действующих спутников СРНС Навстар GPS насчитывало 31 ИСЗ. Для сравнения на рис. 3, б представлена гистограмма, полученная по результатам наблюдений 1 декабря 2010 г., когда не было препятствий, создающих тень сигналам спутников. Видно, что максимум одновременно видимых ИСЗ приходится на 10. Минимум 1 декабря приходился на 8 спутников. В эксперименте 22-23 октября более 8 ИСЗ не наблюдалось ни разу. Следовательно, сооружения, блокирующие с юга сигналы спутников СРНС Навстар GPS при угле тени в 80° , могут вызывать не только значительные потери точности, но и прекращение нормальной работы приёмников.

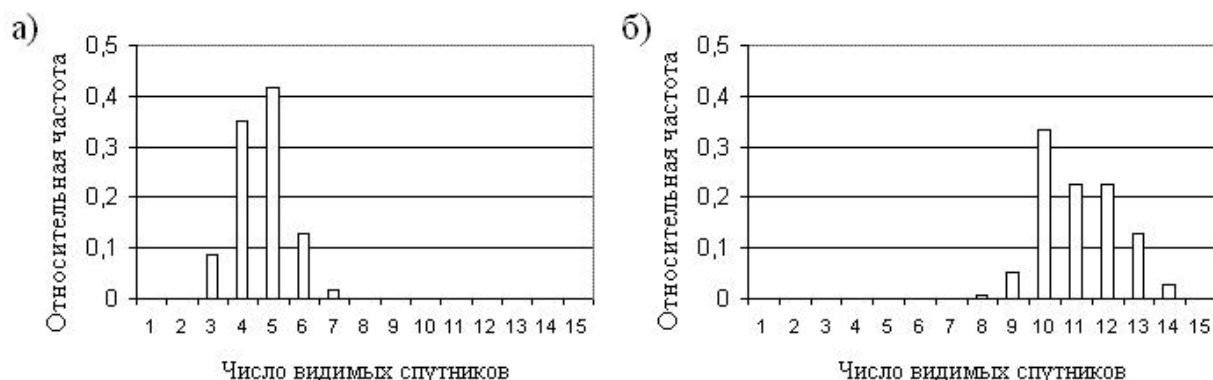


Рис. 3. Гистограммы распределения числа одновременно наблюдаемых спутников: а – в эксперименте 22-23 октября 2010 г.; б – в эксперименте 1 декабря 2010 года при отсутствии экранирующих объектов

Представление о точности полученных координат создают гистограммы распределений эмпирических плотностей вероятностей широт и долгот (рис. 4).

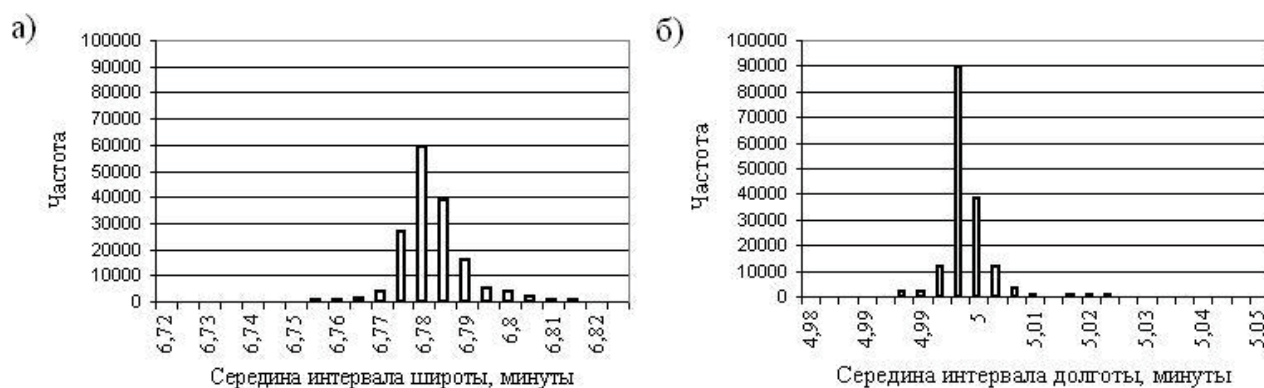


Рис. 4. Гистограммы распределения координат при угле тени 80°: а – гистограмма распределения широты; б – гистограмма распределения долготы

Ширина интервала гистограммы широты выбрана 0,005 мин, что соответствует 9,258 м. На рис. 4, а видно почти симметричное распределение с признаком скошенности в сторону больших значений широты, то есть к северу. Левое крыло гистограммы затянато гораздо больше относительно моды, но значение частот левого крыла малы по сравнению с частотами правого крыла.

Ширина интервала гистограммы долготы принималась равной 0,003 мин, что соответствует 4,069 м. На рис. 4, б видно превалирование частоты моды распределения долготы над частотами остальных интервалов. Гистограмма носит признаки положительной асимметрии с большим значением эксцесса. Сравнение гистограмм позволяет сделать вывод о большем рассеивании координат вдоль меридиана, чем по параллели.

Дальнейшая обработка полученного экспериментального материала сводилась к вычислению точечных оценок математических ожиданий, средних квадратических отклонений (СКО), размахов варьирования, асимметрий и эксцессов. Для расчётов применялся метод моментов.

Если считать определяемую GPS-приёмником широту φ непрерывной случайной величиной, то её математическое ожидание M_φ определится начальным моментом первого порядка [1]:

$$M_{\varphi} = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi f(\varphi) d\varphi, \quad (1)$$

где $f(\varphi)$ – плотность вероятности распределения широты.

Чтобы получить точечную оценку математического ожидания широты, были подсчитаны частоты n_i ($i = 1, 2, 3, \dots, k$), с которыми i -е значение широты φ_i встречалось в выборке, полученной в ходе наблюдений 22-23 октября 2010 г. С учётом известных n_i точечная оценка математического ожидания широты φ_{cp} вычислялась с помощью следующих формул:

$$\varphi_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k \varphi_i n_i, \quad N = \sum_{i=1}^k n_i. \quad (2)$$

Дисперсия случайной величины D_{φ} является центральным моментом второго порядка

$$D_{\varphi} = \int_{-\infty}^{\infty} (\varphi - M_{\varphi})^2 f(\varphi) d\varphi. \quad (3)$$

На практике в качестве меры точности применялась точечная оценка среднего квадратического отклонения s_{φ} , которая представляет собой корень квадратный из точечной оценки дисперсии S_{φ} :

$$S_{\varphi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k (\varphi_i - \varphi_{cp})^2 n_i. \quad (4)$$

Важной характеристикой распределения случайной величины является асимметрия A_{φ} . Асимметрия есть не что иное, как центральный момент третьего порядка, отнесённый к кубу корня квадратного из дисперсии:

$$A_{\varphi} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (\varphi - M_{\varphi})^3 f(\varphi) d\varphi}{(\sqrt{D_{\varphi}})^3}. \quad (5)$$

В процессе обработки полученных данных оценка асимметрии a_{φ} вычислялась по формуле

$$a_{\varphi} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^k (\varphi_i - \varphi_{cp})^3 n_i \right) / (\sqrt{S_{\varphi}})^3. \quad (6)$$

Наряду с асимметрией, при обработке полученного статистического материала вычислялся эксцесс распределения широты. Эксцесс необходим для грубой проверки близости распределения случайной величины к распределению Гаусса. Эксцесс E_{φ} является отношением центрального момента четвёртого порядка к квадрату дисперсии, уменьшенным на 3.

$$A_{\varphi} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (\varphi - M_{\varphi})^4 f(\varphi) d\varphi}{D_{\varphi}^2} - 3. \quad (7)$$

Чем ближе величина эксцесса к 0, тем выше вероятность того, что исследуемая случайная величина распределена по закону Гаусса. В данном исследовании оценка эксцесса e_φ вычислялась по следующей формуле:

$$e_\varphi = \left[\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^k (\varphi_i - \varphi_{cp})^4 n_i \right) / S_\varphi^2 \right] - 3. \quad (8)$$

Помимо дисперсии, для оценки рассеивания случайной величины φ в статистических исследованиях используется размах варьирования $\Delta\varphi$, как разность по абсолютной величине между максимальным зарегистрированным значением широты и минимальным.

Перечисленные статистические характеристики случайной величины определяемой приёмником GP-37 долготы вычислялись по формулам (1) – (8).

Величины СКО и размахов варьирования широт и долгот принято выражать в метрах. Чтобы перейти от угловой меры к линейной, необходимо величины СКО и размахи варьирования умножить на длины одной минуты меридиана l_m и параллели l_p в средней широте. Для этого воспользуемся простыми формулами вычисления l_m и l_p , полученными автором [4].

$$l_m = K_{11} - K_{22} \cos 2\varphi_{cp} + K_{33} \cos 4\varphi_{cp}, l_p = [C_1 - C_2 \cos 2\varphi_{cp} + C_3 \cos 4\varphi_{cp}] \cos \varphi_{cp}. \quad (9)$$

Коэффициенты формул (9), рассчитанные для референц-эллипсоида WGS-84, помещены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты для вычисления l_m и l_p по формулам (9)

K_{11}	K_{22}	K_{33}	C_1	C_2	C_3
1852,21549	9,33025	0,01936	1858,4416	3,12065	0,00389

Результаты обработки данных, полученных в ходе экспериментальных наблюдений 22-23 октября 2010 г., помещены в табл. 2.

Таблица 2

Статистические характеристики распределений координат GP-37 при угле тени 80° с юга

Статистическая характеристика	Широта	Долгота
1. Среднее, мин	6,784154	5,001279
2. Среднее квадратическое отклонение, мин	0,008455	0,003937
3. Среднее квадратическое отклонение, м	15,65	5,34
4. Минимальное значение, мин	6,72	4,977
5. Максимальное значение, мин	6,827	5,048
6. Размах варьирования, мин	0,107	0,071
7. Размах варьирования, м	198,12	96,31
8. Асимметрия	-0,1914	2,6961
9. Эксцесс	7,0459	20,2317
10. Объём выборки	161593	161593

Анализ полученных результатов уместно проводить, сравнивая содержимое табл. 2 с характеристиками точности GPS-приёмника GP-37 в экспериментальных наблюдениях в Усурийской астрофизической обсерватории (УАФО) ДВО РАН. Наблюдения в УАФО проводились автором летом и осенью 2005 г. при отсутствии предметов, блокирующих сигналы спутников. Характеристики точности приёмника GP-37 в наблюдениях в УАФО собраны в табл. 3 [5, 6].

Таблица 3

Характеристики точности приёмника GP-37 в экспериментах в УАФО

Статистическая характеристика	Лето 2005 г.		Осень 2005 г.	
	Широта	Долгота	Широта	Долгота
СКО, м	1,564	1,219	1,649	1,252
Размах варьирования, м	20,37	12,22	23,15	14,24
Асимметрия	-0,464	0,143	0,024	-0,287
Эксцесс	1,759	0,829	1,455	0,675

Сравнение СКО позволяет сделать вывод об увеличении случайной погрешности широты в 10 раз и долготы в 4,4 раза. СКО долготы при угле тени 80° могло быть и меньше, если бы не было здания, стоявшего к западу от места расположения антенны (см. рис. 2). При угле тени 80° размах варьирования вдоль меридиана увеличивается в 8,5 раза, а по параллели – в 6,7 раза. Как следует из табл. 3, при отсутствии препятствия сигналам спутников асимметрии распределения широты и долготы малы и знакопеременны. Неожиданно мала асимметрия распределения широты при угле тени 80° . От появления препятствия сигналам спутников значительно увеличилась только асимметрия долготы. Следует отметить увеличение эксцессов распределений. Эксцесс широты увеличился в 4 раза, а эксцесс долготы возрос с 0,829 до 20,2317 при появлении высокого препятствия. Этот факт прослеживается на гистограммах (см. рис. 4). Следовательно, при больших углах тени вид распределения получаемых координат нельзя принимать Гауссовским.

О том, как происходило рассеивание координат в эксперименте 22-23 октября 2010 г., можно судить по рис. 5. На нём точками нанесены обсервованные координаты антенны относительно средней широты и средней долготы. Координаты точек выбирались через 10 мин из всего полученного в течение двух суток массива наблюдений.

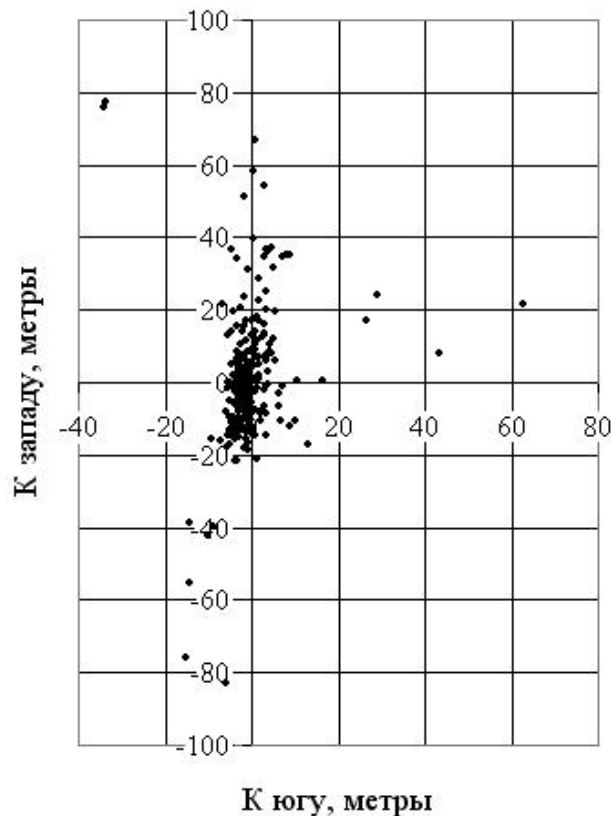


Рис. 5. Рассеивание координат при угле тени 80°

Перед началом экспериментальных наблюдений 22-23 октября 2010 г. автором независимым геодезическим способом были получены реальные координаты антенны с точностью $\pm 0,5$ м. Их динамические части составили $6,791'$ и $5,009'$ широты и долготы соответственно. Это позволило рассчитать отстояния в метрах среднего места антенны (см. первую строку табл. 2) от реального места. Смещения составили 12,68 м к югу и 10,47 м к западу. Следовательно, средние координаты антенны сместились в сторону объектов, блокирующих сигналы спутников. Несмотря на то, что отстоящее от антенны к западу здание имело значительно меньшие размеры, оно вызвало смещение, почти равное смещению к югу от более протяжённого строения.

Полученные результаты располагают сформулировать следующие выводы и предложения.

1. Перемещение с севера на юг GPS-приёмника в сторону высокого и протяжённого объекта, блокирующего сигналы спутника системы Навстар GPS, приводит к ухудшению точности определения координат. Рассеивание координат может достигать 200 м, а средняя квадратическая погрешность увеличивается в 10 раз.

2. Средние координаты смещаются в сторону препятствия сигналам спутников.

3. Когда высокий и протяжённый объект создаёт со стороны юга угол тени в 80° , то возникают ситуации кратковременного прекращения нормальной работы GPS-приёмника из-за нехватки спутников в зоне радиовидимости. В этом случае приёмник прекращает определять координаты. Такие ситуации можно преодолеть, если использовать мультисистемные приёмники СРНС. Но надо помнить о том, что при этом ухудшения точности избежать не удастся.

4. Экспериментальные наблюдения были выполнены в широте 43° . С увеличением широты продолжительность периодов прекращения нормальной работы GPS-приёмников будет увеличиваться при таком же угле тени.

5. Из результатов экспериментальных наблюдений следует, что приём дифференциальных поправок, транслируемых контрольно-корректирующими станциями в диапазоне от 283,5 до 325 кГц, в условиях высокой городской застройки затруднён.

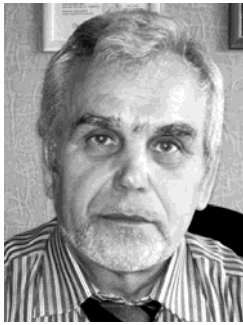
ЛИТЕРАТУРА

1. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962. – 564 с.
2. Кац, В. А. Погрешности приёмника Garmin GPS-128 при частичном затенении сигналов спутников / В. А. Кац, Ю. А. Комаровский // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010. – № 2. – С. 173-178.
3. Комаровский, Ю. А. Наблюдаемость спутников СРНС Навстар GPS / Ю. А. Комаровский // Вестник Морского государственного университета. Вып. 15. Серия: Судовождение. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2007. – С. 35-41.
4. Комаровский, Ю. А. Точные вычисления пройденных расстояний на земных эллипсоидах / Ю. А. Комаровский // Современные проблемы развития и методики преподавания естественных и точных наук: материалы Всерос. науч.-практ. конф. 16-18 декабря 2009 г. – Уссурийск: Изд-во УГПИ, 2009. – С. 154-161.
5. Комаровский, Ю. А. Влияние времени года на точность определения координат приёмником GP-37 / Ю. А. Комаровский // Судовождение – 2006: сб. науч. тр. – Новосибирск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2006. – С. 56-71.
6. Комаровский, Ю. А. Точность определения координат приёмником СРНС Навстар GPS Furuno GP-37 / Ю. А. Комаровский // «Морская экология-2005» (MAREC-2005): труды Междунар. науч.-практ. конф., 5-7 октября 2005 г. Т. 2. – Владивосток: МГУ им. адм. Г. И. Невельского, 2006. – С. 39-47.
7. Okuda S., Arai Y. The Position Accuracy of DGPS Affected by Propagation Characteristic on MF Beacon Wave. Proceedings of the 2011 International Meeting of the Institute of Navigation. January 24-26, 2011. San Diego, CA. - P. 718-724.

Котляров В. П., Воробьев А. А.
V. P. Kotlyarov, A. A. Vorobiev

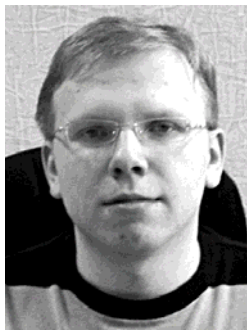
ИССЛЕДОВАНИЕ КРИПТОСТОЙКОСТИ МОДИФИКАЦИИ ШИФРА ГАММИРОВАНИЯ ПО ОПЕРАЦИИ ХОР ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОНТИНУАЛЬНОГО МНОЖЕСТВА

ANALYSIS OF MODIFIED XOR GAMMA CIPHER USING A CONTINUUM SET



Котляров Валерий Петрович – кандидат технических наук, профессор кафедры информационных систем, декан факультета компьютерных технологий Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, д. 27; +7(4217)59-46-59. E-mail: fct@knastu.ru

Mr. Valeriy P. Kotlyarov – Ph.D., Professor of the Department of Information Systems, Dean of the Faculty of Computer Technologies, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenina prospect, 681013 Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk region, Russian Federation; +7-(4217)-59-46-59. E-mail: fct@knastu.ru



Воробьев Антон Александрович – аспирант очной формы обучения (спец. 051318 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ») Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, д. 27; 8-909-845-58-72. E-mail: zeromem@mail.ru

Mr. Anton A. Vorobiev – PhD Candidate, discipline No. 051318 «Mathematical modelling, numerical methods and software packages», Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenina prospect, 681013 Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk region, Russian Federation; 8-909-845-58-72. E-mail: zeromem@mail.ru

Аннотация. В статье проводится оценка криптостойкости шифра гаммирования по модулю два к частотному криптоанализу с использованием решения о повышении криптостойкости шифра континуальным множеством. Показано изменение статистических характеристик графической и текстовой информации, а также повышение их энтропий при применении идеи со сферой Римана.

Summary. The paper deals with the assessment of the endurance of a gamma cipher algorithm at module two to frequency cryptanalysis using a continuum set as a solution for cipher endurance improvement. The change of the statistical characteristics of graphical and textual information, as well as the increase of their entropy due to application of the idea of the Riemann sphere, is shown.

Ключевые слова: криптография, сфера Римана, варьирование запятой, защита информации, гаммирование, криптоанализ.

Key words: cryptography, Riemann sphere, comma varying, data security, gamma algorithm, cryptanalysis.

УДК 003.26, 004.056.5

В работах [4; 6] получены уравнения биективного отображения комплексной величины на сферу Римана при помощи следующих формул:

$$x = \frac{4x_i R^2}{4R^2 + y_i^2 + x_i^2}, y = \frac{4y_i R^2}{4R^2 + y_i^2 + x_i^2}, z = 2R - \frac{8R^3}{4R^2 + y_i^2 + x_i^2}. \quad (1)$$

Выдвинута гипотеза о варьировании запятой, которая в совокупности с числами с плавающей точкой из континуального множества повышает вычислительную сложность атаки методом «грубая сила» до k раз, где k – возможные различные положения запятой.

Любопытно провести исследование криптостойкости шифра гаммирования по операции исключающего ИЛИ (строгая дизъюнкция) при использовании отображения (1) на сферу Римана и варьирования запятой к частотному криптоанализу.

Дешифрованию различных криптограмм помогает частотный анализ появления отдельных символов и их сочетаний [1]. Как показал К. Шеннон [7], вследствие несовершенства языка, наличия огромного количества синтаксических и грамматических правил, отдельные частоты появления символов варьируются в некоторых определенных пределах для каждого языка. Так, в частности, буква «о» считается наиболее употребляемой в русском языке после знаков препинания (см. табл. 1 [3]), в то время как «е» считается самой употребляемой в английском. Очевидно, что шифры подстановки и замены совершенно не влияют на частотное распределение тех или иных символов используемого алфавита. Этим фактом пользуются для определения наиболее вероятного лингвистического языка открытого текста по шифротексту путем подсчета частот вхождения каждого символа в текст и сравнением с эталонными таблицами. Каждая эталонная таблица [3] представляет собою частоты появления того или иного элемента алфавита для конкретного языка.

Таблица 1

Эталонная таблица частот букв в русском тексте

Буква	Частота	Буква	Частота	Буква	Частота	Буква	Частота
"_"	0.145	р	0.041	я	0.018	х	0.009
о	0.095	в	0.038	з	0.016	ж	0.007
е, ё	0.072	л	0.035	ы	0.016	ш	0.006
а	0.062	к	0.028	б	0.014	ю	0.006
и	0.062	м	0.026	ь,ъ	0.014	ц	0.004
н	0.053	д	0.025	г	0.013	щ	0.003
т	0.053	п	0.023	ч	0.012	э	0.003
с	0.045	у	0.021	й	0.010	ф	0.002

Указанные выше умозаключения могут быть распространены на произвольный алфавит, составляющий суть некоторого сообщения, так как, исходя из [7], неравномерность распределения вероятностей появления того или иного символа алфавита повышает информацию о криптосистеме, что, в свою очередь, вызывает положительную корреляцию с возможностью её компрометации.

Это утверждение вытекает непосредственно из предложенной К. Шенноном в 1948 г. формулы количества информации:

$$I = -\sum_{i=1}^K p_i \log_2(p_i), \quad (2)$$

где K – общее количество возможных состояний системы, p_i – вероятность проявления i -го состояния системы. При $p_i = 0$ полагают, что $p_i \log_2(p_i) = 0$. Количество информации выражается в двоичных битах.

Так в свою очередь каждая буква английского языка несет в среднем 1.3 двоичных бит информации [8].

Формула (2) является обобщением формулы, полученной ранее в 1928 г. американским инженером Р. Хартли. Он впервые ввел количественную характеристику информации при условии равной вероятности состояний системы:

$$I = \log_2 K, \quad (3)$$

где K – общее количество возможных состояний системы.

Но, исходя из теории информации [3], количество информации, приобретаемое при полном выяснении состояния некоторой физической системы X , равно энтропии этой системы, то есть степени неопределенности системы:

$$I = H(X). \quad (4)$$

Так как злоумышленнику тем сложнее подвергать компрометации криптосистему, чем она неопределеннее, то повышение энтропии криптосистемы может являться одним из показателей повышения её криптостойкости.

Покажем изменения энтропии системы при использовании криптографического алгоритма метода гаммирования с ключом K в 4 байта после применения идеи со сферой Римана, воспользовавшись элементами частотного анализа и формулой (2) для графического изображения и текстовой информации.

В качестве графического изображения Γ для анализа выбран рисунок в RAW формате (см. рис. 1). К нему была применена идея со сферой Римана с помощью инструмента ECV [5] (см. рис. 2), а результат R сохранен в виде дампа памяти без соответствующих заголовков (RAW формат).

Полученные массивы данных были подвергнуты частотному анализу.

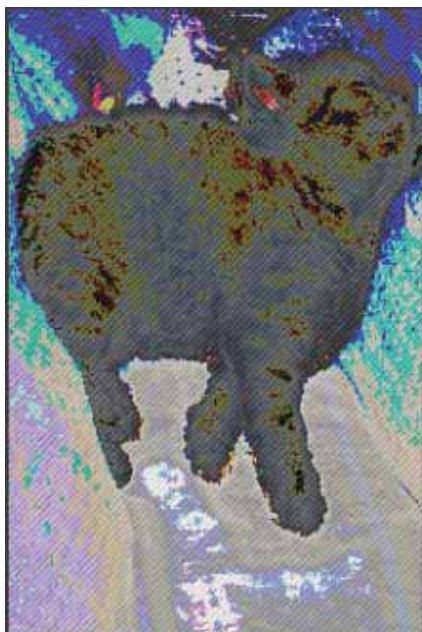


Рис. 1. Результат гаммирования с ключом в 4 байта

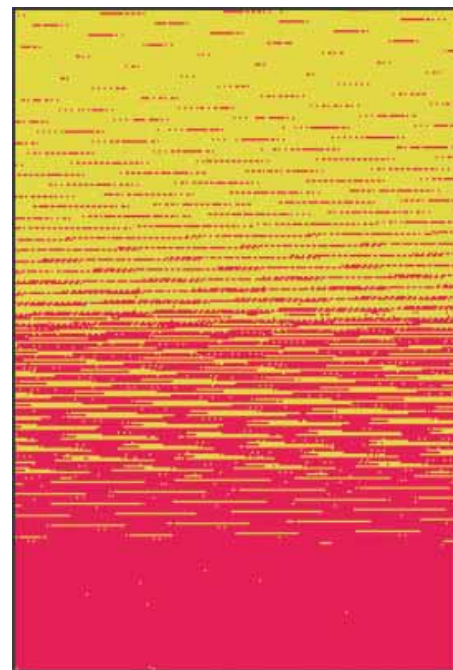


Рис. 2. Результат применения идеи со сферой Римана

Опишем алгоритм идеи со сферой Римана.

- 1) Пока входной поток данных X не пуст, выберем i -й элемент данных (байт) $a_i \in X$. Иначе – выход.
- 2) Выберем элемент ключа $k_j \in K \mid j = i(\bmod 4)$.
- 3) Составим комплексное число $q_i = (a_i, k_j)$.
- 4) Используя соотношения (1), вычислим тройку (x_i, y_i, z_i) по комплексной величине q_i .

5) Произведем последовательный вывод в поток P величин x_i, y_i, z_i ;

6) Перейдем к пункту 1.

Подставляя вместо входного и выходного потоков соответствующие массивы данных, получаем требуемый результат. Заметим, что данный алгоритм можно легко распространить на общий случай длины ключа $|K| > 4$.

График распределения частот для исходного изображения имеет стохастический характер (см. рис. 3), что позволяет выделить класс наиболее вероятных проявлений того или иного элемента данных. Соответственно, после применения идеи со сферой Римана распределение частот для конечного изображения приняло практически сглаженный вид (см. рис. 4).

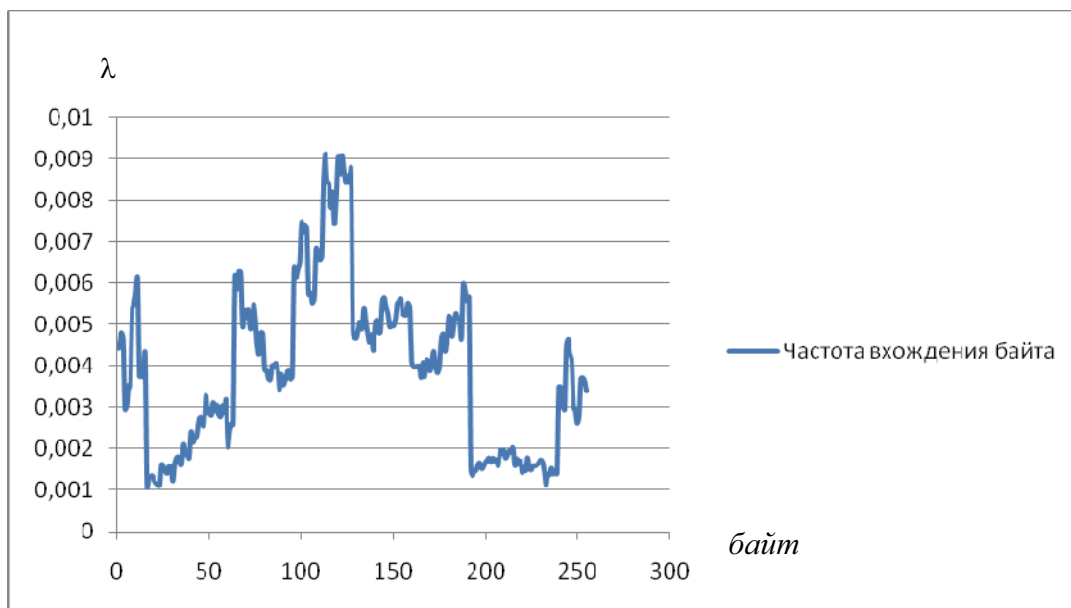


Рис. 3. Частота (λ) появления байта в потоке данных Γ при методе гаммирования по модулю два

Коэффициент корреляции k между частотным распределением исходных и конечных данных:

$$k = 0.104255. \quad (5)$$

Столь малое значение данного коэффициента позволяет говорить о достаточно сильном отличии начального набора данных от конечного набора, то есть об их малой корреляции. Наличие знака плюс объясняется прямо пропорциональной зависимостью между указанными массивами данных.

Энтропия $H(\Gamma)$ для исходных данных:

$$H(\Gamma) = 7.813, \quad (6)$$

Энтропия $H(R)$ для конечных данных:

$$H(R) = 6.848. \quad (7)$$

Соответственно имеем $H(\Gamma) > H(R)$, т.е. энтропия конечных данных (7) меньше, чем энтропия (6) исходных. Полученный результат является ожидаемым вследствие того, что любая естественная физическая система (фотография представима как мгновенное состояние некоторой естественной системы) имеет более высокую энтропию, чем энтропия её математической модели. Но из частотного распределения конечных данных (см. рис. 4)

очевидно, что сглаженность осложняет вероятностный анализ появления того или иного элемента данных.

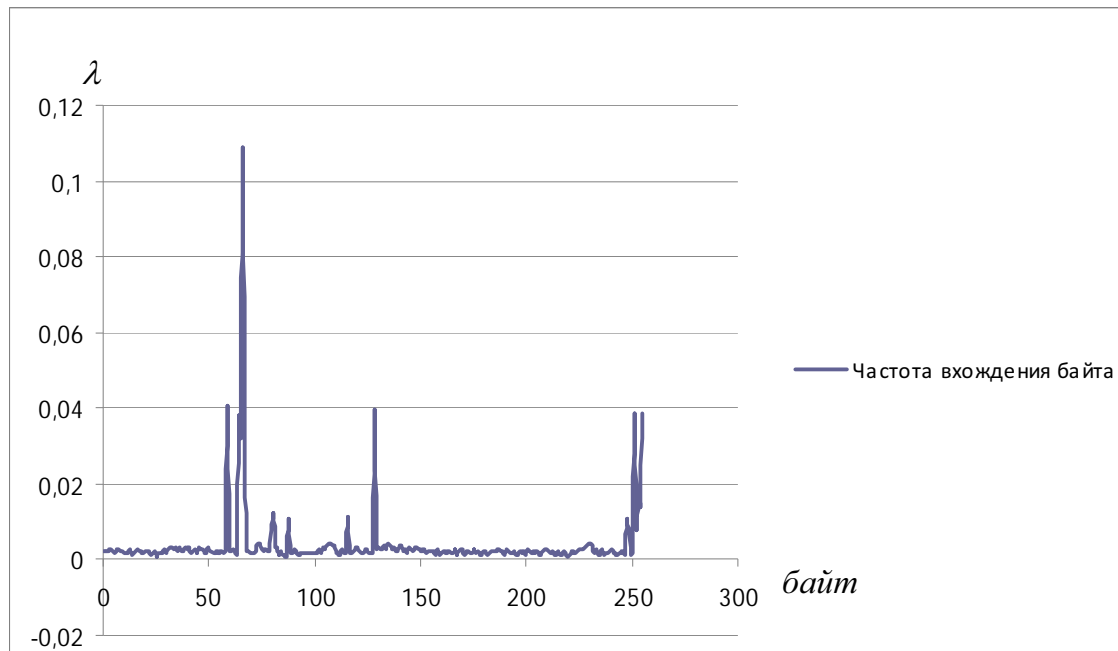


Рис. 4. Частота появления символа в потоке данных R при методе гаммирования по модулю два после применения отображения на сферу Римана

Опишем методику частотного анализа, используемую при получении значений (6) и (7), и применим ее для анализа некоторого английского текста до и после применения идеи со сферой Римана.

Для систем G и R были сформированы таблицы количества вхождения каждого байта методом, аналогичным при сортировке подсчетом.

Производя деление количества вхождения байта на общее количество байт для систем G и R , получим частоты появления каждого элемента данных в системе (см. рис. 3 и 4 соответственно).

Вычисление коэффициента корреляции (5) между массивами данных производилось при помощи встроенной в программный продукт Microsoft Excel 2007 функции «КОРЕЛ»[2].

Соответственно, вычисление энтропий (6) и (7) для каждой из систем выполнялось с использованием формулы (2) по полученным частотам при помощи встроенной математической функции «LOG».

В качестве текстовой информации T для анализа выберем английский текст:

«We send out a free English lesson by email most weeks. There is absolutely no charge and you can stop receiving them at any time, just by clicking on a link in the email. Just fill in this form with your name and email address. Pearson will immediately send you an email with a link to confirm you want to get our lessons. Click on that link and start receiving our free lessons».

Вычислим соответствующие показатели, аналогично формулам (5) – (7).

В результате имеем частотные распределения для исходных (см. рис. 5) и конечных (см. рис. 6) R' данных.

Соответствующие энтропии $H(T)$, $H(R')$ и коэффициент корреляции равны:

$$H(T) = 4.192, \quad (8)$$

$$H(R') = 6.713, \quad (9)$$

$$k = -0.00617. \quad (10)$$

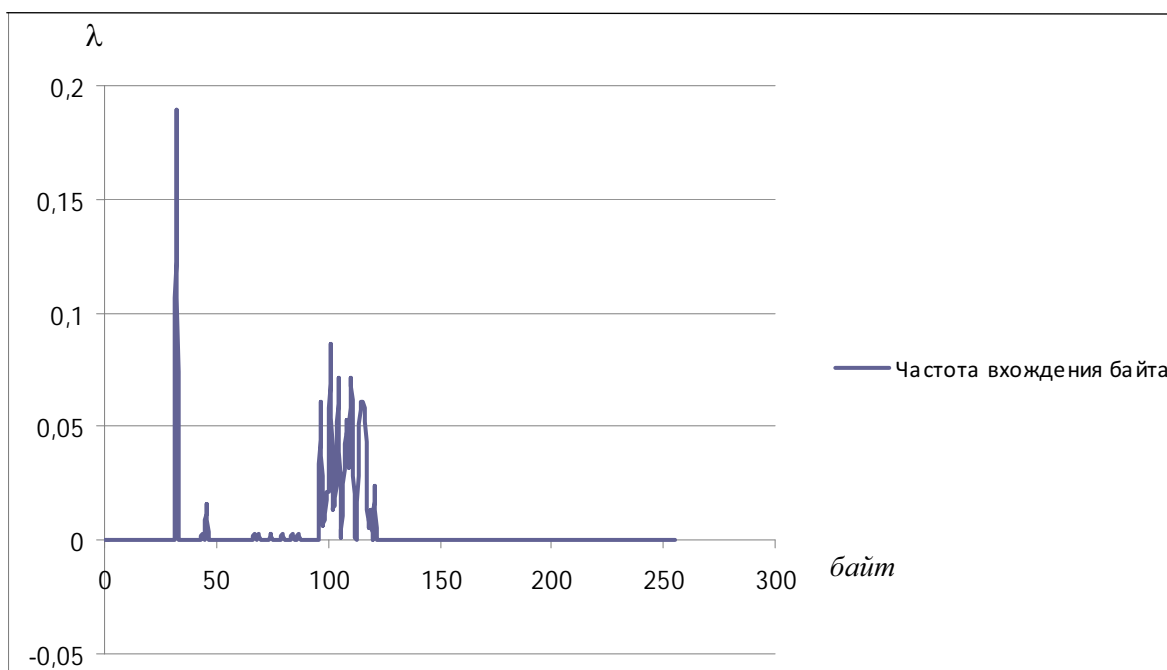


Рис. 5. Частота появления символа в потоке данных T при методе гаммирования по модулю два

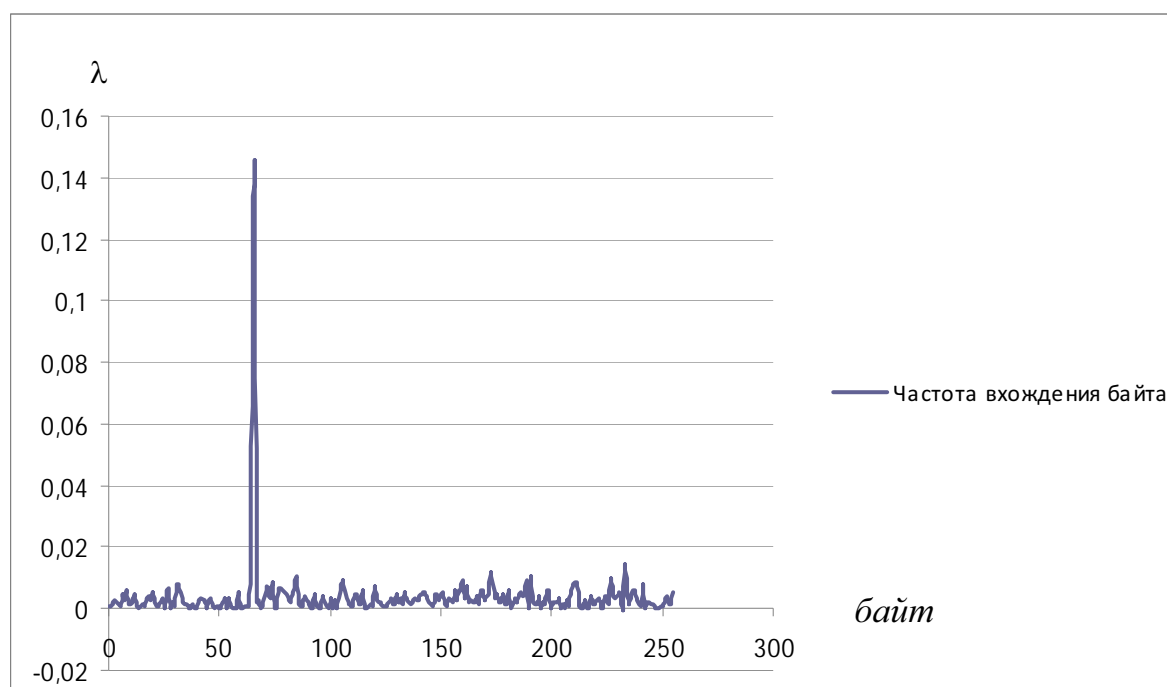


Рис. 6. Частота появления символа в потоке данных R' при методе гаммирования по модулю два после применения отображения на сферу Римана

Имеем $H(T) < H(R')$, т.е. энтропия конечных данных (9) больше, чем энтропия (8) исходных. Так как злоумышленник всегда стремится к полной компрометации криптосистемы, из соотношения (2) получаем, что злоумышленнику придется преодолеть большую энтропию, большую неопределенность в поведении системы после применения

идеи со сферой Римана, что и требовалось показать. Данный факт имеет огромное значение для текстовой информации, так как она содержит элементы неестественного, то есть неприродного характера, разработанные человеком, для которых методы частотного анализа являются более применимыми, нежели к потокам графических данных.

До этого момента, при использовании идеи со сферой Римана применялись числа с плавающей точкой с шестью знаками после запятой. Покажем, что повышение количества знаков также повышает энтропию исследуемых систем. Данный факт опытным путем подтверждает (косвенно) справедливость идеи о варьировании запятой предыдущей работы [6].

Повысив количество знаков до 15, а также подсчитав новые частотные характеристики, имеем следующие результаты.

Для потока R графической информации, исходя из нового частотного распределения (см. рис. 7), имеем энтропию

$$H_{15}(R) = 7.355. \quad (11)$$

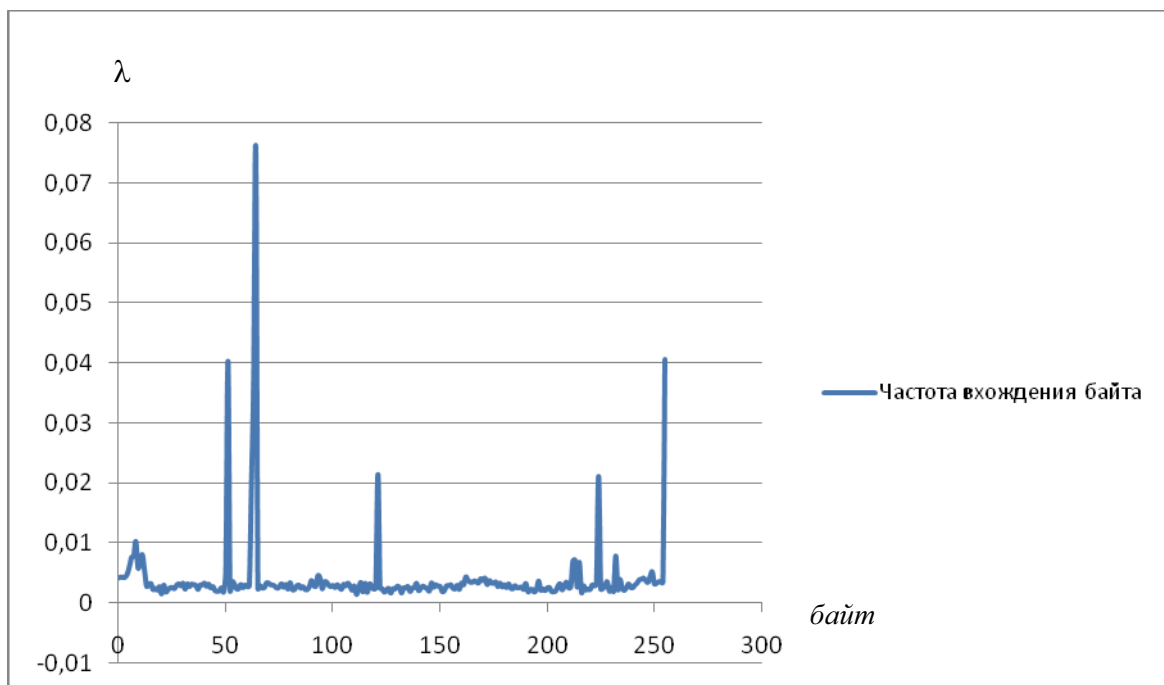


Рис. 7. Частота появления символа в потоке данных R при методе гаммирования по модулю два после применения отображения на сферу Римана (15 знаков)

Для потока R' текстовой информации, исходя из нового частотного распределения (см. рис. 8), имеем энтропию

$$H_{15}(R') = 7.281. \quad (12)$$

Коэффициент корреляции при использовании 15 знаков после запятой для графических данных и текстовой информации соответственно равны:

$$k = 0.020972, \quad (13)$$

$$k = -0.04054. \quad (14)$$

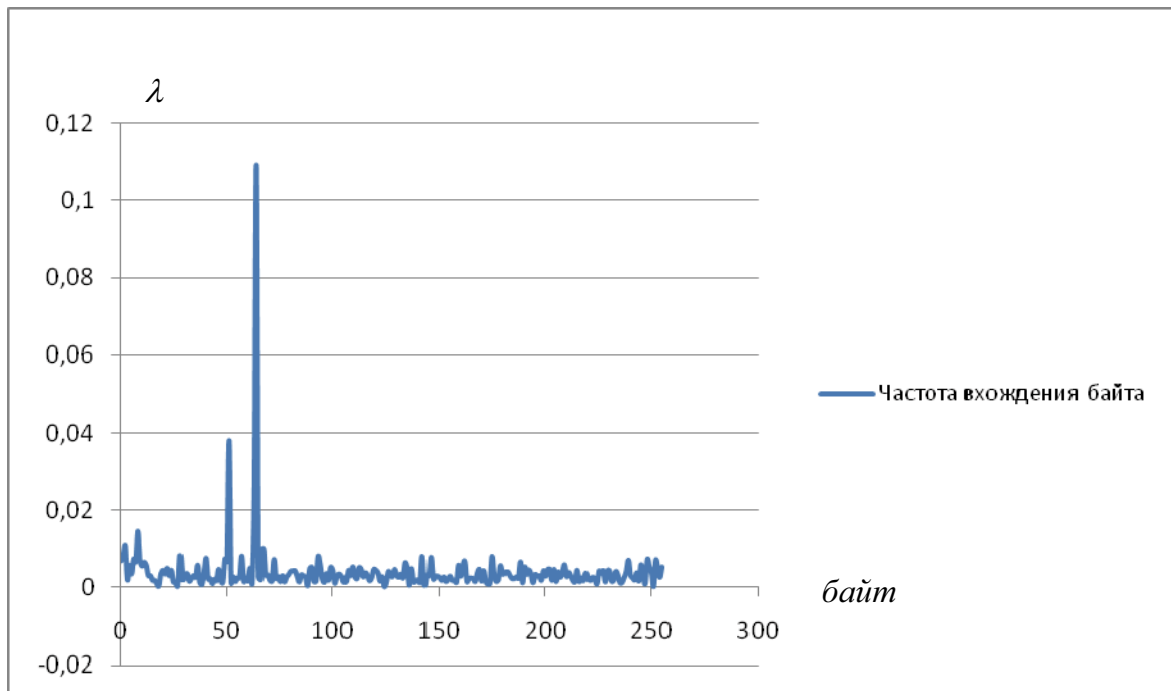


Рис. 8. Частота появления символа в потоке данных R' при методе гаммирования по модулю два после применения отображения на сферу Римана (15 знаков)

Используем полученные данные для построения кривой зависимости энтропии от числа используемых знаков (см. рис. 9), где в качестве значений при нуле знаков используются энтропии исходных данных.

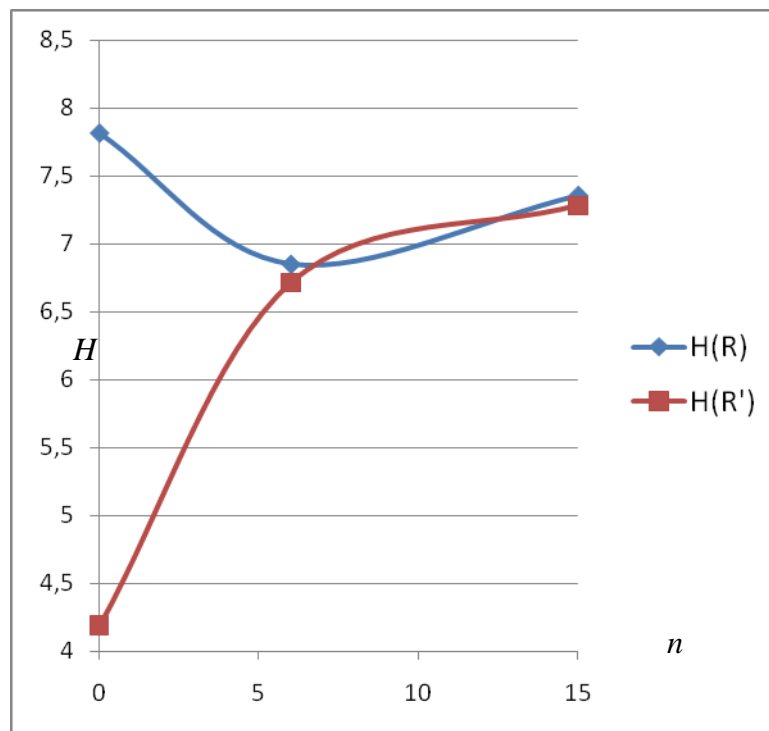


Рис. 9. Зависимость энтропии от числа используемых знаков (n)



Таким образом, можно сделать заключение о наличии прямо пропорциональной зависимости между количеством используемых знаков и энтропией, что опытным путем подтверждает справедливость идеи о варьировании запятой, – увеличение количества знаков после запятой приводит к повышению вычислительной сложности атаки методом «грубая сила».

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдошин, С. М. Криптоанализ: вчера, сегодня, завтра / С. М. Авдошин, А. А. Савельева // Открытые системы. – 2009. – № 3. – С. 22-26.
2. Васильев, А. Н. Научные вычисления в Microsoft Excel / А. Н. Васильев. – М.: Вильямс, 2004. – 512 с.
3. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей: учеб. для вузов / Е. С. Вентцель. – 8-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2002. – 575 с.
4. Воробьев, А. А. О проблеме взлома перебором и потенциальных решениях с помощью сферы Римана и варьирования запятой: доклад / А. А. Воробьев // Научная сессия ТУСУР–2010. – Томск: В–Спектр. – Ч. 3. – С. 230-235.
5. Воробьев, А. А. Визуализация процессов работы алгоритмов шифрования с дополнением преобразования сферой Римана / А. А. Воробьев // Открытый Дальневосточный конкурс программных средств студентов, аспирантов и специалистов «Программист-2010»: сб. докладов. – Владивосток: Дальневост. гос. ун-т, 2010. – С. 7-9.
6. Воробьев, А. А. О решениях повышения криптостойкости шифров с помощью континуального множества / А. А. Воробьев, В. П. Котляров // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2010. – № II–1(2). – С. 58-64
7. Shannon, C. E. A Mathematical Theory of Communication / C. E. Shannon // Bell System Technical Journal. – 1948. – Vol. 27, 28. – P. 379-423, 623-656.
8. Shannon, C. E. Prediction and Entropy of Printed English / C. E. Shannon // Bell Systems Technical Journal. – 1951. – Vol. 30. – P. 50-64.

Чье Ен Ун, Шейн А. Б.

РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ В ЗАДАЧАХ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Чье Ен Ун, Шейн А. Б.

Chye En Un, A. B. Shein

РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ В ЗАДАЧАХ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

**SOLVING STATE EQUATIONS AT ARBITRARY EFFECTS
IN CIRCUIT SIMULATION TASKS**

Чье Ен Ун – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации и системотехники Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: chye@ais.khstu.ru

Mr. Chye En Un – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Automation and System Engineering, the Pacific National University (Russia, Khabarovsk). E-mail: chye@ais.khstu.ru.

Шейн Александр Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники Чувашского государственного университета (Россия, Чебоксары); 428015, г. Чебоксары, Московский пр., 15.

Mr. Aleksandr B. Shein – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Industrial Electronics Department, the Chuvash State University (Russia, Cheboksary,), 15, Moskovsky pr., Cheboksary, 428015.

Аннотация. Основная трудность при решении уравнений состояния электронных устройств заключается в нахождении определенных интегралов при произвольных входных воздействиях. Предлагается метод решения уравнений состояния электронных устройств на основе аппроксимации функций внешних воздействий.

Summary. The main difficulty at the solution of the equations of a condition of electronic devices consists in finding certain integrals at any entrance influences. The method of the solution of the equations of a condition of electronic devices is offered on the basis of approximation of the functions of external influences.

Ключевые слова: проектирование электронных устройств, решение уравнений состояния, аппроксимация воздействий.

Key words: electronic design, solution of condition equations, approximation of external influences.

УДК 621.372.001.2: 314.21

Постановка задачи. В общем случае линейные нестационарные объекты n -го порядка в каждый момент времени t описываются матрично-векторными уравнениями:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)v(t); \quad (1)$$

$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)v(t), \quad (2)$$

где $A(t)$ – матрица размера $n \times n$, определяющая динамические свойства объекта; $B(t)$ – матрица размера $n \times m$, учитывающая влияние на объект задающих (входных) воздействий; $C(t)$ – матрица выхода размера $r \times n$; $D(t)$ – матрица входа размера $r \times m$; $x(t)$ – вектор переменных состояний объекта размера $n \times 1$; $v(t)$ – вектор внешних воздействий на объект размера $m \times 1$; $y(t)$ – выходной вектор размера $r \times 1$.

Уравнение (1) является уравнением состояния объекта (устройства), а уравнение (2) определяет выходные переменные $y(t)$ в зависимости от $x(t)$ и $v(t)$. Непосредственный способ определения реакции $x(t)$ объекта, описываемого уравнением (1) на входной сигнал $f(t) = B(t)v(t)$, $[n \times 1]$, состоит в реализации формулы

$$x(t) = \Phi^{-1}(t)\Phi(t_0)x(t_0) + \int_{t_0}^t \Phi^{-1}(t)\Phi(\tau)f(\tau)d\tau, \quad (3)$$

которая может быть получена по методу сопряженных систем или из уравнения

$$x(t) = W(t)W^{-1}(t_0)x(t_0) + \int_{t_0}^t W(t)W^{-1}(\tau)f(\tau)d\tau, \quad (4)$$

где $W(t)$ – матрица Вронского или матрица решений, которую нетрудно получить, например, с помощью метода вариации параметров, являющегося альтернативным по отношению к методу сопряженных систем. При этом в отличие от функции $W(t)$, определяемой из базиса исследуемой однородной системы, функция $\Phi(t)$ получается из базиса однородной сопряженной системы. Очевидно, что переходный процесс линейной системы определяется переходной функцией $\Phi(t, t_0) \equiv \Phi^{-1}(t)\Phi(t_0) = W(t)W^{-1}(t_0)$, осуществляющей линейное преобразование, которое переводит начальное состояние $x(t_0)$ системы в некоторое состояние для момента времени t , т.е. $x(t) = \Phi(t, t_0)x(t_0)$. Таким образом, равенства (3) и (4) могут быть записаны в единой форме [4]

$$x(t) = \Phi(t, t_0)x(t_0) + \int_{t_0}^t \Phi(t, \tau)f(\tau)d\tau. \quad (5)$$

Для стационарной системы (матрица A – постоянная) обобщенная переходная матрица переходит в ряд и представляет собой обычную матричную экспоненту

$$\Phi(t, t_0) \equiv E + (t-t_0)A + \frac{(t-t_0)^2}{2!}A^2 + \dots + \frac{(t-t_0)^i}{i!}A^i = \sum_{i=0}^{\infty} A^i \frac{(t-t_0)^i}{i!} = \exp[A(t-t_0)]. \quad (6)$$

Для нестационарной системы решение обусловлено двумя переменными, одной из которых является момент t_0 воздействия и другой – момент t наблюдения реакции. В силу этого интегралы свертывания обобщаются к интегралам совмещения [4].

При постоянных элементах матрицы A уравнение (5) принимает вид

$$x(t) = e^{A(t-t_0)}x(t_0) + e^{At} \int_{t_0}^t e^{-A\tau} f(\tau)d\tau. \quad (7)$$

Формула (7), представляющая решение системы уравнений (1) для случая стационарных схем электронных устройств, находит самое широкое применение в практике их проектирования, так как, в общем случае, переменные по времени параметры схем замещения реальных устройств могут быть представлены временными функциями, с помощью которых находятся конкретные значения параметров компонентов для любого момента t переходного процесса, протекающего в устройстве [1; 5]. Поскольку обычно решение осуществляется численными методами, то $x(t)$ и $y(t)$ определяются только при дискретных значениях t , например, при $t = t_0, t_0 + h, t_0 + 2h, \dots$, где h – некоторый, определенным образом выбранный, временной шаг. При этом значения параметров компонентов схемы и вектор входных воздействий $v(t)$ всегда можно представить в явном виде как функции от t или в виде выборочных значений, что делает задачу полностью определенной и разрешимой.

Поскольку предполагается, что входной вектор $v(t)$ известен для всех дискретных моментов $t = kh$, где k – целые числа ($k = 0, 1, 2, \dots$), то, в общем случае, для формул решения

уравнения (1) с «забеганием вперед» на интервал времени, равный Nh , где $N = 1, 2, \dots$, остается выявить связь между вектором переменных состояния $x((k + N)h)$, с одной стороны, и векторами $v(kh)$ и $x(kh)$, с другой. Такая связь обычно устанавливается посредством какого-либо разностного уравнения, и как только она установлена, можно последовательно вычислить значения вектора $x((k + N)h)$ для всех k при фиксированном значении N по известным значениям векторов $v(kh)$ и $x(kh)$.

В уравнении (7) положим $t_0 = kh$ и $t = (k + N)h$. Тогда имеем

$$x((k + N)h) = e^{NAh} x(kh) + e^{A(k+N)h} \int_{kh}^{(k+N)h} e^{-A\tau} Bv(\tau) d\tau. \quad (8)$$

При $N=1$ формула (8) принимает привычный вид [2]:

$$x((k + 1)h) = e^{Ah} x(kh) + e^{A(k+1)h} \int_{kh}^{(k+1)h} e^{-A\tau} Bv(\tau) d\tau. \quad (9)$$

Основная трудность реализации уравнений (8) и (9) в виде вычислительных алгоритмов заключается в нахождении определенного интеграла при произвольном входном воздействии $v(t)$. Если определенный интеграл в равенствах (8) и (9) найти точно, то в результате получим точное решение векторно-матричного уравнения (1).

Предлагается метод решения уравнений состояния электронных устройств на основе аппроксимации функций внешних воздействий в общих формулах решения многочленами, что позволяет находить определенный интеграл в этих формулах решения точно.

Решение задачи. Рассмотрим метод более подробно для случаев замены функции $v(t)$ непрерывными кусочно-постоянной, кусочно-линейной, кусочно-квадратичной и кусочно-кубической функциями [3].

Случай 1. Пусть $v(t)$ есть непрерывная кусочно-постоянная на каждом из временных интервалов, равных h , функция: $v(t) = v(kh)$ для $kh \leq t \leq (k + 1)h$, где $k = 0, 1, 2, \dots$. Тогда имеем

$$e^{A(k+1)h} \int_{kh}^{(k+1)h} e^{-A\tau} Bv(\tau) d\tau = (-E + e^{Ah}) A^{-1} Bv(kh).$$

Следовательно, уравнение (9) может быть представлено в виде

$$x((k + 1)h) = Fx(kh) + F_0 Bv(kh), \quad (10)$$

где $F = e^{Ah} = E + Ah + \frac{1}{2!}(Ah)^2 + \dots + \frac{1}{p!}(Ah)^p = \sum_{i=0}^p \frac{1}{i!}(Ah)^i$,

$$F_0 = (-E + e^{Ah})(Ah)^{-1} = \sum_{i=0}^p \frac{1}{(i+1)!}(Ah)^i = \sum_{i=0}^p \frac{1}{i!(i+1)}(Ah)^i = < \text{или} > \sum_{i=1}^p \frac{1}{i!}(hA)^{i-1}, (p \rightarrow \infty).$$

Случай 2. Пусть $v(t)$ есть непрерывная кусочно-линейная на каждом из временных интервалов функция: $v(t) = a_{0j} + a_{1j}t$, где $a_{0j} = \frac{t_{1j}v_{0j} - t_{0j}v_{1j}}{t_{1j} - t_{0j}}$, $a_{1j} = \frac{v_{1j} - v_{0j}}{t_{1j} - t_{0j}}$, $j = 1, 2, \dots$ – номер временного интервала. Полагая $t_{0j} = kh$, $t_{1j} = (k + 1)h$, $v_{0j} = v(kh)$ и $v_{1j} = v((k + 1)h)$, получим: $t_{1j} - t_{0j} = (k + 1)h - kh = h$. Тогда имеем

$$a_{0j} = (1 + k) \cdot v(kh) - k \cdot v((k + 1)h), \quad a_{1j} = \frac{v((k + 1)h) - v(kh)}{h}, \quad \text{где } k = j - 1.$$

Определим выражение $e^{A(k+1)h} \int_{kh}^{(k+1)h} e^{-A\tau} Bv(\tau) d\tau$, учитывая, что коэффициенты a_{0j} и a_{1j} являются постоянными величинами для каждого из временных интервалов. Для этого выполним следующие преобразования:

$$e^{A(k+1)h} \int_{kh}^{(k+1)h} e^{-A\tau} B(a_{0j} + a_{1j}\tau) d\tau = \\ = [e^{Ah}(-E + Ah) + E](Ah)^{-2} Bhv(kh) + [e^{Ah} - (E + Ah)](Ah)^{-2} Bhv((k+1)h).$$

Следовательно, если $v(t)$ непрерывная кусочно-линейная функция, то имеем

$$x((k+1)h) = Gx(kh) + G_0Bhv(kh) + G_1Bhv((k+1)h), \quad (11)$$

где $G = F = e^{Ah} = \sum_{i=0}^p \frac{1}{i!} (Ah)^i$, $G_0 = [e^{Ah}(-E + Ah) + E](Ah)^{-2} = \sum_{i=0}^p \frac{1}{i!(i+2)} (Ah)^i$,

$$G_1 = [e^{Ah} - (E + Ah)](Ah)^{-2} = \sum_{i=0}^p \frac{1}{(i+2)!} (Ah)^i, \quad (p \rightarrow \infty).$$

Нетрудно убедиться, что при $v((k+1)h) = v(kh)$ формула (11) переходит в формулу (10): $G_0Bhv(kh) + G_1Bhv((k+1)h) = (e^{Ah} - E)(Ah)^{-1} Bhv(kh)$. Следовательно, формулы (10) и (11) получены правильно.

Случай 3. Пусть $v(t)$ есть непрерывная кусочно-квадратичная на каждом из временных интервалов функция

$$v(t) = a_{0j} + a_{1j}t + a_{2j}t^2,$$

Где $a_{0j} = \frac{t_{1j}t_{2j}(t_{2j}-t_{1j})v_{0j} + t_{0j}t_{2j}(t_{0j}-t_{2j})v_{1j} + t_{0j}t_{1j}(t_{1j}-t_{0j})v_{2j}}{t_{2j}^2(t_{1j}-t_{0j}) + t_{1j}^2(t_{0j}-t_{2j}) + t_{0j}^2(t_{2j}-t_{1j})}$,

$$a_{1j} = \frac{(t_{1j}^2 - t_{2j}^2)v_{0j} + (t_{2j}^2 - t_{0j}^2)v_{1j} + (t_{0j}^2 - t_{1j}^2)v_{2j}}{t_{2j}^2(t_{1j}-t_{0j}) + t_{1j}^2(t_{0j}-t_{2j}) + t_{0j}^2(t_{2j}-t_{1j})},$$

$$a_{2j} = \frac{(t_{2j}-t_{1j})v_{0j} + (t_{0j}-t_{2j})v_{1j} + (t_{1j}-t_{0j})v_{2j}}{t_{2j}^2(t_{1j}-t_{0j}) + t_{1j}^2(t_{0j}-t_{2j}) + t_{0j}^2(t_{2j}-t_{1j})}.$$

Полагая $t_{0j} = kh$, $t_{1j} = (k+1)h$, $t_{2j} = (k+2)h$, $v_{0j} = v(kh)$, $v_{1j} = v((k+1)h)$, $v_{2j} = v((k+2)h)$, последовательно находим

$$t_{2j}^2(t_{1j}-t_{0j}) = (k^2 + 4k + 4)h^3, \quad t_{1j}^2(t_{0j}-t_{2j}) = -2(k^2 + 2k + 1)h^3, \quad t_{0j}^2(t_{2j}-t_{1j}) = k^2h^3, \\ t_{2j}^2(t_{1j}-t_{0j}) + t_{1j}^2(t_{0j}-t_{2j}) + t_{0j}^2(t_{2j}-t_{1j}) = 2h^3, \quad t_{1j}t_{2j}(t_{2j}-t_{1j}) = (k^2 + 3k + 2)h^3, \\ t_{0j}t_{2j}(t_{0j}-t_{2j}) = -2k(k+2)h^3, \quad t_{0j}t_{1j}(t_{1j}-t_{0j}) = k(k+1)h^3, \quad t_{1j}^2 - t_{2j}^2 = -(2k+3)h^2, \\ t_{2j}^2 - t_{0j}^2 = 4(k+1)h^2, \quad t_{0j}^2 - t_{1j}^2 = -(2k+1)h^2,$$

$$a_{0j} = \frac{1}{2} [(k+1)(k+2)v(kh) - 2k(k+2)v((k+1)h) + k(k+1)v((k+2)h)],$$

$$a_{1j} = \frac{1}{2h} [-(2k+3)v(kh) + 4(k+1)v((k+1)h) - 2(2k+1)v((k+2)h)],$$

$$a_{2j} = \frac{1}{2h^2} [v(kh) - 2v((k+1)h) + v((k+2)h)].$$

Используем полученные выражения для определения слагаемого $e^{A(k+2)h} \int_{kh}^{(k+2)h} e^{-A\tau} B v(\tau) d\tau$ в уравнении (8) при $N=2$. Для этого выполним следующие преобразования:

$$e^{A(k+2)h} \int_{kh}^{(k+2)h} e^{-A\tau} B v(\tau) d\tau = \left\{ (-E + e^{2Ah}) \left[E - \frac{3}{2}(Ah)^{-1} + (Ah)^{-2} \right] + [E - A(Ah)^{-1}] \right\} \times$$

$$\times A^{-1} B v(kh) + 2 \left\{ (-E + e^{2Ah}) [E - (Ah)^{-1}] + 2E \right\} (Ah)^{-1} A^{-1} B v((k+1)h) +$$

$$+ \left\{ (-E + e^{2Ah}) \left[-\frac{1}{2}E + (Ah)^{-1} \right] (Ah)^{-1} - [E + 2(Ah)^{-1}] \right\} A^{-1} B v((k+2)h).$$

В результате имеем:

$$x((k+2)h) = H x(kh) + H_0 B h v(kh) + H_1 B h v((k+1)h) + H_2 B h v((k+2)h), \quad (12)$$

где $H = e^{2Ah}$, $H_0 = \left\{ -\left[\frac{1}{2}E + (Ah)^{-1} \right] (Ah)^{-1} + e^{2Ah} \left[E - \frac{3}{2}(Ah)^{-1} + (Ah)^{-2} \right] \right\} (Ah)^{-1}$,

$$H_1 = 2 \left\{ [E + (Ah)^{-1}] + e^{2Ah} [E - (Ah)^{-1}] \right\} (Ah)^{-2},$$

$$H_2 = \left\{ -\left[E + \frac{3}{2}(Ah)^{-1} + (Ah)^{-2} \right] - e^{2Ah} \left[\frac{1}{2}E - (Ah)^{-1} \right] \right\} (Ah)^{-1}.$$

При $v(kn) = v((k+1)h) = v((k+2)h)$, т.е. при постоянном входном воздействии на объект, получим

$$H_0 B h v(kh) + H_1 B h v((k+1)h) + H_2 B h v((k+2)h) = (-E + e^{2Ah}) (Ah)^{-1} B h v(kh).$$

Нетрудно заметить, что формула для определения вектора неизвестных $x((k+2)h)$ при постоянном входном воздействии на объект имеет аналогичную формуле (10) структуру

$$x((k+2)h) = e^{2Ah} x(kh) + (-E + e^{2Ah}) (Ah)^{-1} B h v(kh). \quad (13)$$

Случай 4. Пусть $v(t)$ есть непрерывная кусочно-кубичная на каждом из временных интервалов функция $v(t) = a_{0j} + a_{1j}t + a_{2j}t^2 + a_{3j}t^3$,

где $a_{0j} = \frac{1}{6} \left[(k^3 + 6k^2 + 11k + 6)v(kh) - 3k(k^2 + 5k + 6)v((k+1)h) + \right.$

$$\left. + 3k(k^2 + 4k + 3)v((k+2)h) - k(k^2 + 3k + 2)v((k+3)h) \right],$$

$$a_{1j} = -\frac{1}{6h} \left[(3k^2 + 12k + 11)v(kh) - 3(3k^2 + 10k + 6)v((k+1)h) + \right.$$

$$\left. + 3(3k^2 + 8k + 3)v((k+2)h) - (3k^2 + 6k + 2)v((k+3)h) \right],$$

$$a_{2j} = \frac{1}{2h^2} [(k+2)v(kh) - (3k+5)v((k+1)h) + (3k+4)v((k+2)h) - (k+1)v((k+3)h)],$$

$$a_{3j} = -\frac{1}{6h^3} [v(kh) - 3v((k+1)h) + 3v((k+2)h) - v((k+3)h)].$$

Используем полученные коэффициенты для определения слагаемого $e^{A(k+3)h} \int_{kh}^{(k+3)h} e^{-A\tau} Bv(\tau) d\tau$ в уравнении (8) при $N=3$. Выполним следующие преобразования:

$$\begin{aligned} e^{A(k+3)h} \int_{kh}^{(k+3)h} e^{-A\tau} Bv(\tau) d\tau &= \left\{ (-E + e^{3Ah}) \left[E - \frac{11}{6}(Ah)^{-1} + 2(Ah)^{-2} - (Ah)^{-3} \right] + \right. \\ &+ \left. \left[E - \frac{3}{2}(Ah)^{-1} + 3(Ah)^{-2} \right] \right\} (Ah)^{-1} Bhv(kh) + \\ &+ 3 \left\{ (-E + e^{3Ah}) \left[E - \frac{5}{3}(Ah)^{-1} + (Ah)^{-2} \right] + \left[\frac{1}{2}E - 3(Ah)^{-1} \right] \right\} (Ah)^{-2} Bh \times \\ &\times v((k+1)h) + 3 \left\{ (-E + e^{3Ah}) \left[-\frac{1}{2}E + \frac{4}{3}(Ah)^{-1} - (Ah)^{-2} \right] + \right. \\ &+ \left. \left[\frac{1}{2}E + 3(Ah)^{-1} \right] \right\} (Ah)^{-2} Bhv((k+2)h) + \left\{ (-E + e^{3Ah}) \left[\frac{1}{3}E - (Ah)^{-1} + \right. \right. \\ &+ \left. \left. (Ah)^{-2} \right] (Ah)^{-1} - \left[E + \frac{3}{2}(Ah)^{-1} + 3(Ah)^{-2} \right] \right\} (Ah)^{-1} Bhv((k+3)h). \end{aligned}$$

В результате имеем

$$x((k+3)h) = Kx(kh) + K_0 Bhv(kh) + K_1 Bhv((k+1)h) + K_2 Bhv((k+2)h) + K_3 Bhv((k+3)h), \quad (14)$$

где $K = e^{3Ah}$,

$$K_0 = \left\{ \left[\frac{1}{3}E + (Ah)^{-1} + (Ah)^{-2} \right] (Ah)^{-1} + e^{3Ah} \left[E - \frac{11}{6}(Ah)^{-1} + 2(Ah)^{-2} - (Ah)^{-3} \right] \right\} (Ah)^{-1},$$

$$K_1 = 3 \left\{ - \left[\frac{1}{2}E + \frac{4}{3}(Ah)^{-1} + (Ah)^{-2} \right] + e^{3Ah} \left[E - \frac{5}{3}(Ah)^{-1} + (Ah)^{-2} \right] \right\} \times (Ah)^{-2}$$

$$K_2 = 3 \left\{ \left[E + \frac{5}{3}(Ah)^{-1} + (Ah)^{-2} \right] + e^{3Ah} \left[-\frac{1}{2}E + \frac{4}{3}(Ah)^{-1} - (Ah)^{-2} \right] \right\} (Ah)^{-2},$$

$$K_3 = \left\{ - \left[E + \frac{11}{6}(Ah)^{-1} + 2(Ah)^{-2} + (Ah)^{-3} \right] + e^{3Ah} \left[\frac{1}{3}E - (Ah)^{-1} + (Ah)^{-2} \right] (Ah)^{-1} \right\} (Ah)^{-1}.$$

Если $v(kh) = v((k+1)h) = v((k+2)h) = v((k+3)h)$, тогда имеем

$$(K_0 + K_1 + K_2 + K_3) Bhv(kh) = (-E + e^{3Ah}) (Ah)^{-1} Bhv(kh).$$

Следовательно, при постоянном входном воздействии на объект для случая $N=3$ можно записать:

$$x((k+3)h) = e^{3Ah} x(kh) + (-E + e^{3Ah}) (Ah)^{-1} Bhv(kh). \quad (15)$$

Чье Ен Ун, Шеин А. Б.

РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ В ЗАДАЧАХ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Распространяя подход, использованный для получения формул (10), (13) и (15), на случай замены функции $v(t)$ многочленом n -й степени ($n = N$) с учетом того, что потом воздействие на объект рассматривается как постоянная величина, нетрудно записать обобщенную формулу решения векторно-матричного уравнения (1)

$$x((k + N)h) = e^{NAh} x(kh) + (e^{NAh} - E)(Ah)^{-1} Bh v(kh). \quad (16)$$

Уравнение (16) позволяет получать информацию о векторе переменных состояния объекта с «забеганием вперед» на промежуток времени, равный Nh , где N – количество шагов «забегания вперед», что является большим преимуществом перед одношаговыми формулами расчета, но может быть и одношаговой формулой расчета, если $N=1$.

Таким образом, предлагаемый метод, позволяющий находить точные решения уравнений состояния электронных устройств, является простым, наглядным и удобным для реализации на ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Логунцов, С. В. Моделирование электрических режимов систем совмещенной передачи данных и энергии питания произвольной топологии / С. В. Логунцов, Чье Ен Ун // Информатика и системы управления. – 2008. – № 1 (15). – С. 55-62.
2. Чуа, Л. О. Машинный анализ электронных схем: алгоритмы и вычислительные методы / Л. О. Чуа, Лин Пен-Мин. – М.: Энергия, 1980. – 640 с.
3. Шеин, А. Б. Методы проектирования электронных устройств / А. Б. Шеин, Н. М. Лазарева. – Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 2010. – 456 с.
4. Яров, В. М. Алгоритм расчета переходного режима в тиристорных автономных инверторах / В. М. Яров, А. Б. Шеин, Е. С. Писчасова // Применение полупроводниковых приборов в преобразовательной технике. – Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 1983. – С. 65-79.
5. Paderin, A. The Computer Simulation of the Communication System that Combines Data and Power Down a Common Twiste Wire Pair / A. Paderin, Chye En Un // Journal of Harbin Institute of Technology (New Series). – Harbin, 2000. – Vol. 7. – PP. 81-83.

МАШИНОСТРОЕНИЕ
MECHANICAL ENGINEERING

Щелкунов Е. Б., Виноградов С. В., Щелкунова М. Е., Самар Е. В.
E. B. Schelkunov, S. V. Vinogradov, M. E. Schelkunova, E. V. Samar

МЕХАНИЗМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ В МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКАХ

PARALLEL STRUCTURE MECHANISMS IN METAL CUTTING MACHINES

Щелкунов Евгений Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktm@knastu.ru

Mr. Yevgeny B. Schelkunov – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktm@knastu.ru

Виноградов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sergwin72@rambler.ru

Mr. Sergey V. Vinogradov – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sergwin72@rambler.ru.

Щелкунова Марина Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Математическое обеспечение и применение ЭВМ» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmorevm@knastu.ru

Ms. Marina E. Schelkunov – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Computer Software and Computing, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmorevm@knastu.ru

Самар Елизавета Владимировна – магистр техники и технологии Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktm@knastu.ru

Ms. Yelizaveta V. Samar – Master of Engineering and Technology Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur) E-mail: ktm@knastu.ru

Аннотация. Приведены классификации механизмов с параллельной кинематикой и обзор представленных на рынке металлорежущих станков на базе механизмов с параллельной кинематикой.

Summary. The paper proposes a classification of parallel link mechanisms, and a review of the market of parallel link metal cutting machines.

Ключевые слова: станок с параллельной кинематикой, гексапод, трипод, линапод, гексаглайд, триглайд, пентапод, дельтапод, рабочее пространство.

Key words: parallel link machine tool, hexapod, tripod, linapod, hexaglide, triglide, pentapod, deltapod, workspace.

УДК 621.913

Впервые станок с параллельной кинематикой был представлен на выставке IMTS'94 в Чикаго. В настоящее время станки с параллельной кинематикой постепенно, но довольно быстро входят в состав оборудования, используемого во всех отраслях металлообрабатывающей промышленности.

Основными достоинствами таких станков являются:

- высокая точность позиционирования рабочего органа (РО);
- высокие скорости перемещения и ускорения РО;
- улучшенные массогабаритные параметры и низкая материалоемкость вследствие отсутствия традиционных направляющих и станины;
- сравнительно низкие затраты на обслуживание и ремонт;
- более высокая надежность вследствие отсутствия силовых зубчатых передач, силового гидропривода и системы централизованного смазывания;
- высокая степень унификации мехатронных узлов, обеспечивающая технологичность изготовления станка и его конструктивную гибкость.

Основным элементом этих станков является параллельный механизм, состоящий из неподвижного основания, подвижной платформы (РО) и связывающих их приводных штанг, соединенных с основанием и платформой с помощью шарниров.

Перемещение РО относительно обрабатываемой заготовки по любой из трех линейных и трех поворотных осей осуществляется путем согласованного изменения длин штанг с помощью системы ЧПУ. В металлорежущих станках таким РО является шпиндельный узел.

Траектория движения шпинделя формируется в системе координат детали, а его положение в любой точке траектории может быть задано тремя линейными координатами конца инструмента и двумя угловыми координатами, определяющими угол наклона оси инструмента.

На сегодняшний день механизмы параллельной кинематики (МПК) представлены широким разнообразием их исполнения. Механизмы параллельной структуры (МПС), применяемые в металлорежущих станках, можно классифицировать по следующим признакам: по виду штанг; по количеству штанг; по характеру расположения шарниров на платформе и основании; по расположению шпинделя и др.

По виду штанг разделение происходит:

- на механизмы со штангами управляемой переменной длины (бипод, трипод, пентапод, гексапод, «ножницы»);
- на механизмы со штангами постоянной длины (линапод, биглайд, триглайд, ортоглайд, гексаглайд, ротопод, «дельта», four-rod).

На рис. 1 приведена классификация МПК по виду и количеству штанг.

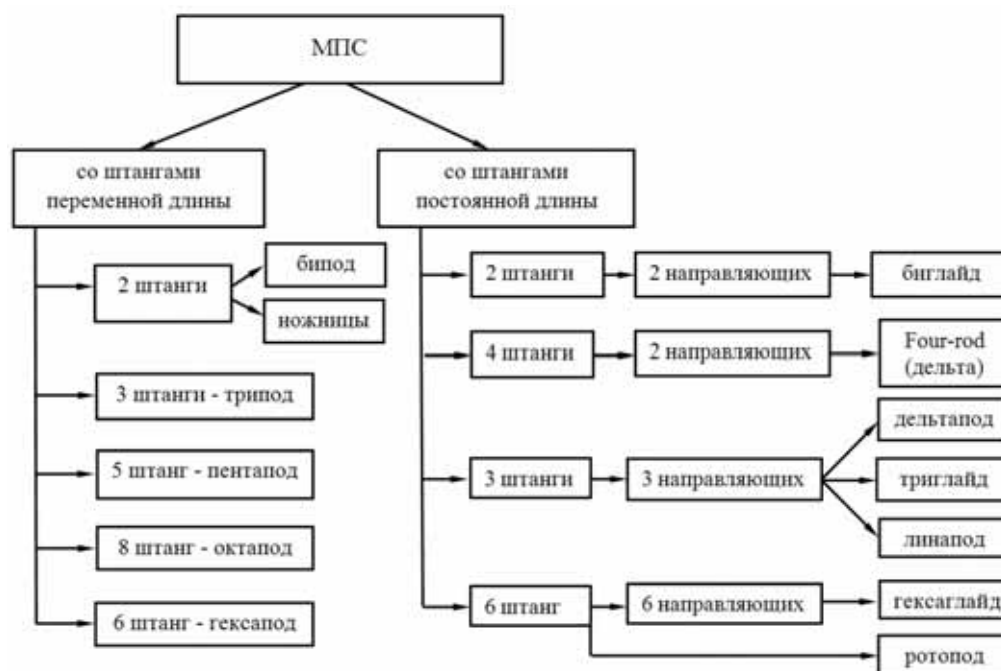


Рис. 1. Классификация МПК по виду и количеству штанг

Механизм трипод состоит из трех симметрично установленных телескопических штанг, связанных шарнирно одним концом с РО, а другим – с неподвижным основанием. Эти штанги приводятся от отдельных двигателей и работают на растяжение – сжатие. Дополнительная неприводная штанга расположена в центре. Она воспринимает изгибные деформации от инструментальной головки и поэтому должна иметь значительно большие размеры по сравнению с приводными штангами.

Среди триподов наиболее удачной разработкой является линейка станков Tricert фирмы Neos Robotics (Швеция), появившихся в 1992 г. Станки объединяют в себе функции как робота, так и станка.

Гексапод (от гекса – шесть) выполнен на базе шести механизмов поступательного перемещения.

На рис. 2 приведена типичная схема станка-гексапода.

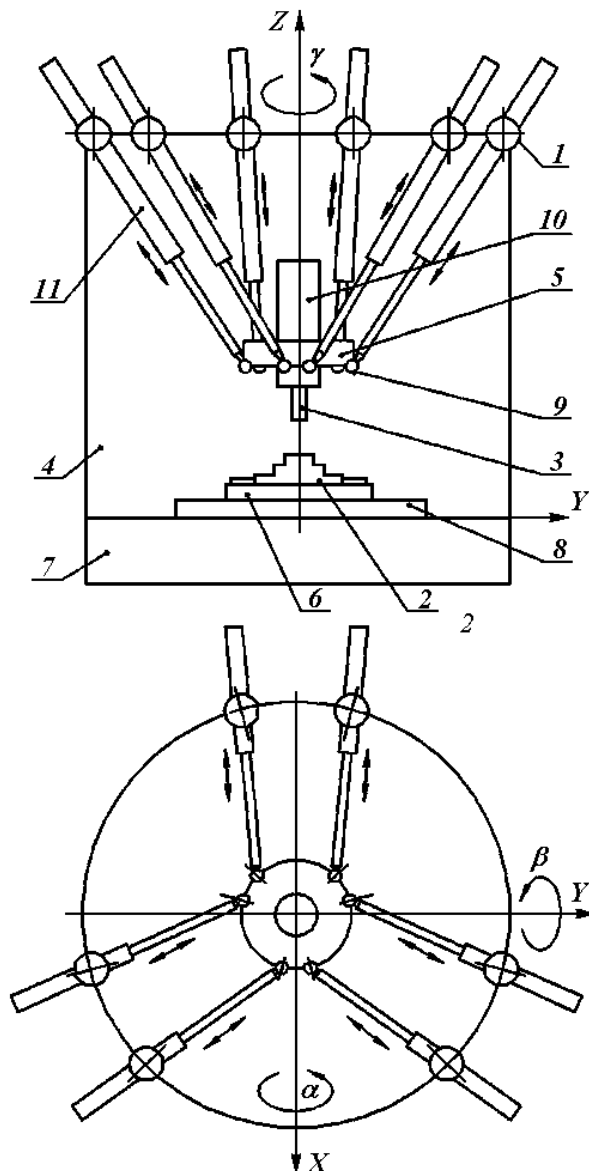


Рис. 2. Принципиальная схема станка-гексапода:

- 1 – шарнир основания; 2 – заготовка; 3 – инструмент; 4 – основание;
- 5 – платформа; 6 – приспособление; 7 – станина; 8 – стол;
- 9 – шарнир платформы; 10 – шпиндельный узел; 11 – штанги

Примером гексапода может служить, например, многоцелевой фрезерный станок OKUMA PM-600 (Япония).

Механизмы типа трипод и гексапод обладают высокой жесткостью. Их следует использовать в станках для высокоточной обработки деталей с точным позиционированием исполнительного органа. Триподы конструктивно проще гексаподов и более приспособлены к практическому применению. Гексаподы, оснащаемые шестью штангами, требуют значительно более сложного программного обеспечения [1].

Пентапод построен на основе трех основных и двух дополнительных штанг переменной длины. На рис. 3 показана компоновочная схема станка мод. «METROM Pentapod P800», представленного компанией Metrom в 2009 г. как абсолютно новый станок с параллельной кинематикой.

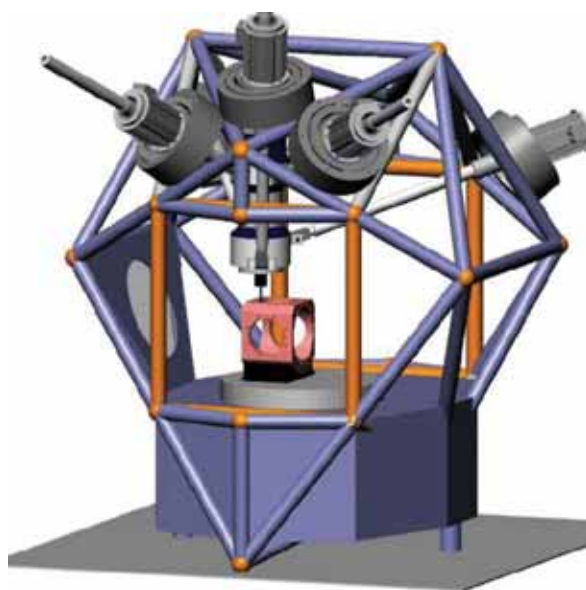


Рис. 3. Станок мод. «METROM Pentapod P800»

Каркас станка смонтирован в виде геометрической фигуры икосаэдр. Три верхних шарнира из пяти расположены на трех соседних гранях икосаэдра, а два шарнира – на удаленных от них гранях.

Шарниры платформы расположены на двух уровнях: три шарнира в непосредственной близости к инструменту, а два шарнира, наоборот, удалены. Такая компоновка обеспечивает исполнительному органу наклон на угол более 90° .

Отличительной чертой механизмов с постоянной длиной штанг является большой угол качания выходного звена и перемещение его только по одной координате. У большинства таких механизмов штанги шарнирно закреплены на каретках, перемещающихся по направляющим, расположение и количество которых может быть различным.

На рис. 4 приведены схемы гексаглайда и линапода.

У гексаглайда направляющие расположены в одной плоскости. Одним из первых данное техническое решение воплощено в совместной разработке Института машиностроения IWF (Германия) и Швейцарского федерального технологического института ETH в шести-координатном фрезерном станке, получившем название Hexaglide. Станок Hexaglide имеет шесть прямолинейных направляющих, расположенных параллельно друг другу в горизонтальной плоскости с ориентацией исполнительного органа к заготовке сверху вниз. Достоинством станка является возможность свободного доступа к рабочей зоне со всех сторон для удобства обслуживания, но «подвесная» компоновка предъявляет жесткие требования к металлоемкости конструкции и ограничения к рабочим усилиям при фрезеровании [1].

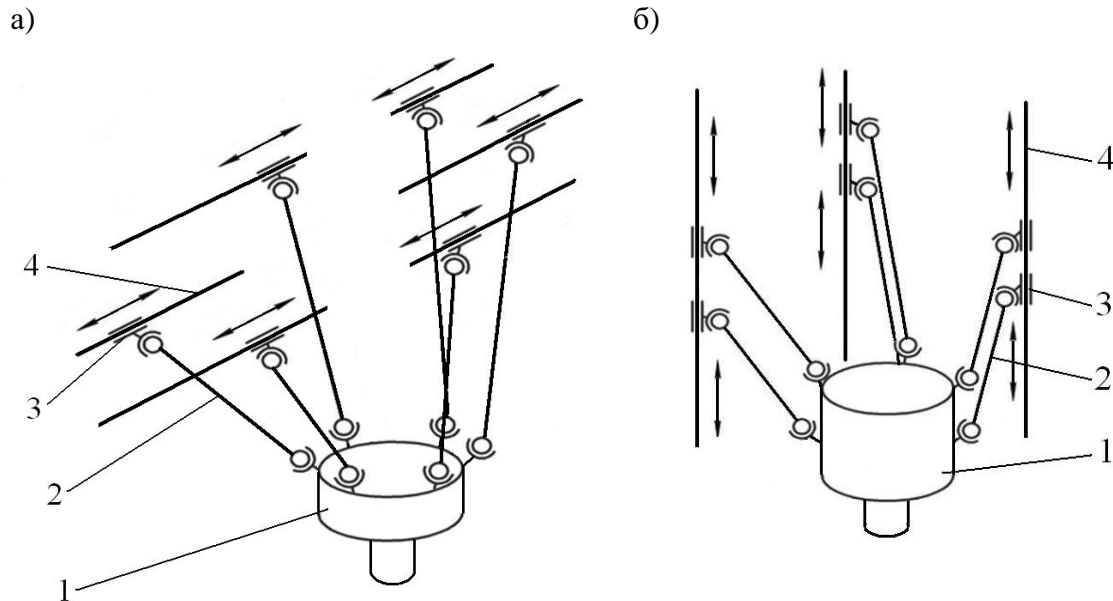


Рис. 4. Схемы механизмов с постоянной длиной штанг:
 а – гексаглайд; б – линапод;
 1 – платформа; 2 – штанга; 3 – каретка; 4 – направляющая

В отличие от гексаглайда у линапода направляющие размещены в разных плоскостях. В 2001 г. в Штутгартском университете был разработан шестикоординатный фрезерный станок Linapod вертикальной компоновки, который имел шесть отдельно управляемых штанг, опирающихся на три колонны с соосным перемещением по направляющим. Шесть штанг расположены вертикально по две на каждой колонне. Вертикальная компоновка станка Linapod обеспечивает повышенную жесткость конструкции за счет несущего основания в виде треугольной призмы [1].

Механизмы типа «дельта» (дельтапод) представляют собой замкнутую кинематическую цепь, состоящую из штанг постоянной длины, расположенных попарно параллельно и соединенных одним концом с платформой, несущей инструмент, а другим – с ведущим направляющим устройством или с ведущим поворотным устройством [2]. В металлорежущих станках применяются механизмы с ведущим направляющим устройством (см. рис. 5). У дельтапода на рис. 5 штанги расположены между каретками основания и подвижной платформой так же, как у линапода. Этот механизм был разработан фирмой Renault Automation (Франция) и использован в конструкции станка мод. Uganе SX. Дельта-механизмы обладают повышенной маневренностью и расширенной границей рабочей зоны, но сравнительно невысокой жесткостью.

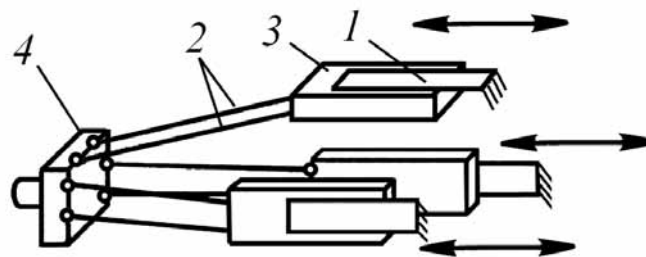


Рис. 5. Механизм «дельта»:
 1 – направляющая; 2 – штанга; 3 – каретка; 4 – платформа

Технические характеристики станка URANE SX в отношении скоростей координатных перемещений и ускорений превышают все известные модели станков с МПК.

На рис. 6 показаны возможные варианты расположения шарниров на платформе и основании гексаподов.

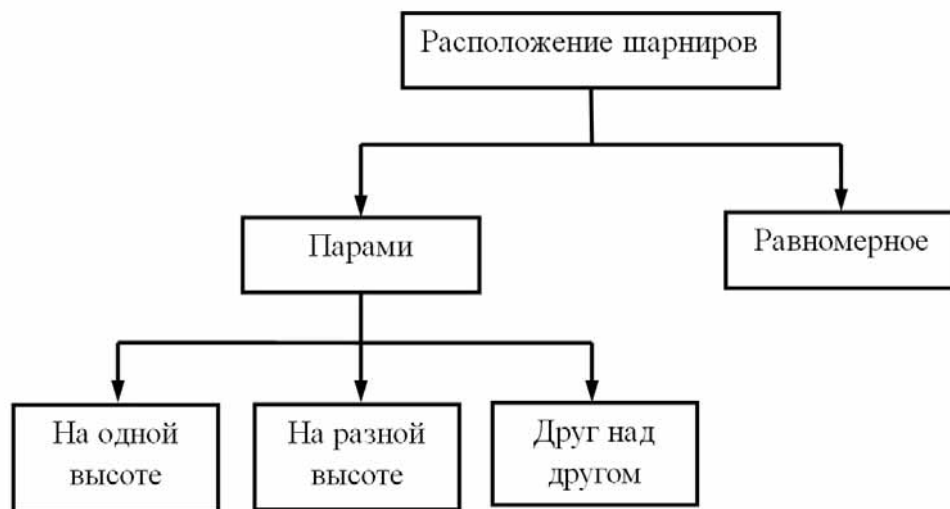


Рис. 6. Варианты расположения шарниров

На рис. 7 приведены упрощенные схемы наиболее распространенных вариантов компоновки.

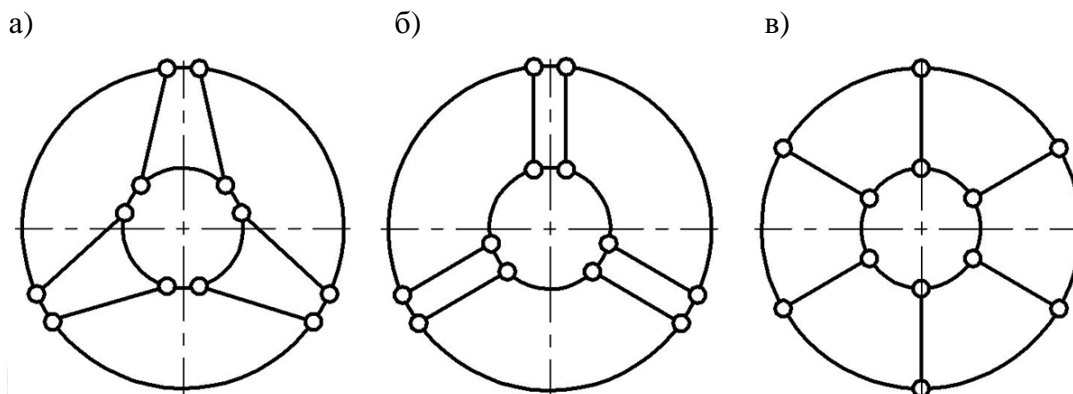


Рис. 7. Варианты компоновки (вид снизу):
а, б – попарно; в – равномерно

Компоновки на рис. 7, а, б применяются в большинстве металлорежущих станков-гексаподов. Равномерная компоновка (см. рис. 7, в) не нашла применения на практике из-за недостаточной жесткости. Однако данная компоновка широко применяется при расчетах и анализе кинематики и характеристик механизмов данного класса.

Примером расположения шарниров на одной высоте может служить станок OKUMA PM-600.

Примерами станков с расположением шарниров на разной высоте могут служить многоцелевой станок MIKROMAT 6X и токарный станок НОН1000. В станке мод. MIKROMAT 6X шарниры основания и платформы расположены на разной высоте. Шарниры основания станка НОН1000 расположены парами один над другим, а шарниры платформы – на одной высоте.

По расположению шпинделя различают механизмы:

- с внутренним расположением шпинделя относительно контура штанг;
- с внешним расположением шпинделя относительно контура штанг.

Первым отечественным станком с внутренним расположением шпинделя относительно замкнутого контура раздвижных штанг является опытный станок, разработанный в 1987 г. Новосибирским электротехническим институтом.

Все известные механизмы параллельной структуры построены на основе различных сочетаний штанг и шарниров. На рис. 8 приведены некоторые сочетания штанг с шарнирами, применяемые в металлорежущих станках [2].

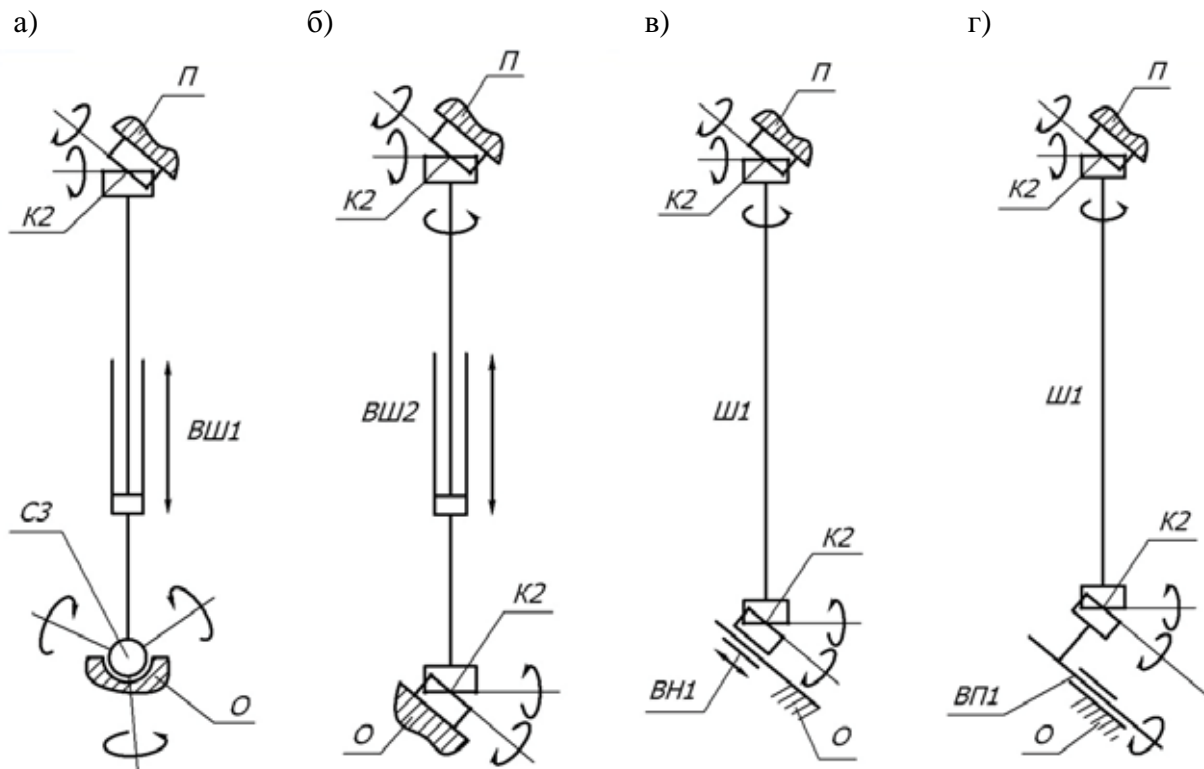


Рис. 8. Сочетания штанг с шарнирами:

О – основание; С3 – сферический шарнир с тремя степенями подвижности; ВШ1 – ведущая штанга с одной степенью подвижности; К2 – крестовый шарнир с двумя степенями подвижности; П – платформа

На рис. 8, а показана кинематическая цепь штанги металлорежущего оборудования фирмы Hoxel (США), построенная по формуле: О – С3 – ВШ1 – К2 – П.

На рис. 8, б показана кинематическая цепь штанги металлорежущего оборудования фирмы Neos Roboties (Швеция) и станка Фраунгоферовского института (Германия), соответствующая формуле: О – К2 – ведущая штанга с двумя степенями подвижности (ВШ2) – К2 – П.

На рис. 8, в штанга станка мод. Urane SX фирмы Renault Automation (Франция) соответствует формуле: О – ведущее направляющее устройство с одной степенью подвижности (ВН1) – К2 – вращающаяся штанга с одной степенью подвижности (Ш1) – К2 – П.

На рис. 8, г приведена кинематическая цепь штанги оборудования, разработанного фирмой ARIA (Швейцария), соответствующая формуле: О – ведущее поворотное устройство с одной степенью подвижности (ВП1) – К2 – Ш1 – К2 – П.

Использование рычажно-шарнирных механизмов в станках с параллельной кинематикой позволяет добиться значительной маневренности РО, но, в свою очередь, по сравнению со станками с традиционной прямоугольной системой координат существенно ограничивает размер рабочего пространства, выражаемого коэффициентом использования объема станка, определяемым как отношение общего объема станка к объему рабочей зоны.

В табл. 1 приведены усредненные данные по коэффициентам эффективности станков с прямоугольной системой координат и станков с параллельной кинематикой.

Таблица 1

Средние данные по коэффициентам эффективности станков с прямоугольной системой координат и станков с параллельной кинематикой

Станки с прямоугольной системой координат	Станки с параллельной кинематикой	
	Гексаподы	Триподы
Около 100	Около 250	Около 200

Увеличения объема рабочего пространства станков с параллельной кинематикой можно достичь применением агрегатно-модульного принципа компоновки станка, а также путем разделения необходимого числа степеней свободы РО между традиционной и параллельной структурами. Такую структуру принято называть гибридной. Примерами могут служить: совместная разработка Савеловского машиностроительного завода (СМЗ) и Национального института авиационных технологий (НИАТ) станок МЦ-2 и ГЕКСАМЕХ-1, станки моделей 6X и V100 фирмы MICROMAT (Германия) и др.

Примерами использования агрегатно-модульного принципа компоновки станков с параллельной кинематикой являются станки линейки Tricsept шведской фирмы Neos Robotics AB и «METROM Pentapod P800» компании Metrom.

Трипод мод. Tricsept TMC 845 выполнен в виде механического модуля с открытой архитектурой. У станка предусмотрено две боковые стойки, соединенные между собой траверсой. Между этими стойками находится модуль мод. Tricsept 805, который может быть установлен в трех компоновочных вариантах: вертикальном, под углом 45° и горизонтальном. Такая многовариантность позволяет приспособлять станок к выполнению самых разных задач обработки [3].

В станке мод. ГЕКСАМЕХ-1 использован параллельный механизм гексапод с перемещениями по осям $X = 800$ мм, $Y = 800$ мм, $Z = 700$ мм и стол с размерами 800×3000 мм для обработки длинномерных деталей, перемещающийся по оси X от отдельного привода. В данном случае использование перемещений стола относительно зоны доступа шпиндельного модуля позволяет увеличить обрабатываемую поверхность до размеров установленного на станке стола.

В МЦ-2 агрегаты с последовательной кинематикой позволяют осуществлять линейные перемещения по оси X (перемещение траверсы) и оси Y (перемещение каретки), а закрепленный на каретке $3Z$ модуль, выполненный на элементах параллельной кинематики, осуществляет перемещение шпинделя в направлении оси Z , а также повороты вокруг осей X и Y .

К гибридной структуре можно также отнести станки с управляемой формой рабочего пространства. Кафедрой металлорежущих станков и систем Кировоградского национального технического университета предложен станок-гексапод, схема которого представлена на рис. 9 [1].

Станок содержит неподвижную платформу 1, выполненную в виде плиты со столом 2, для размещения обрабатываемой детали, подвижную платформу 3 с РО 4, шесть штанг переменной длины, исходные элементы 5 которых шарнирно связаны с подвижной платформой 3, а корпуса 6 с помощью шарниров 7 – с неподвижной платформой 1, причем шарниры 7 могут перемещаться вдоль направляющих 8, размещенных на неподвижной платформе.

При одновременном изменении длин штанг происходит изменение положения РО в пространстве, ограниченном диапазоном ходов штанг. Для перемещения РО за пределами этого диапазона необходимо переместить шарниры основания вдоль направляющих. Длина перемещения каждого из шести шарниров зависит от необходимого направления увеличения рабочей зоны.

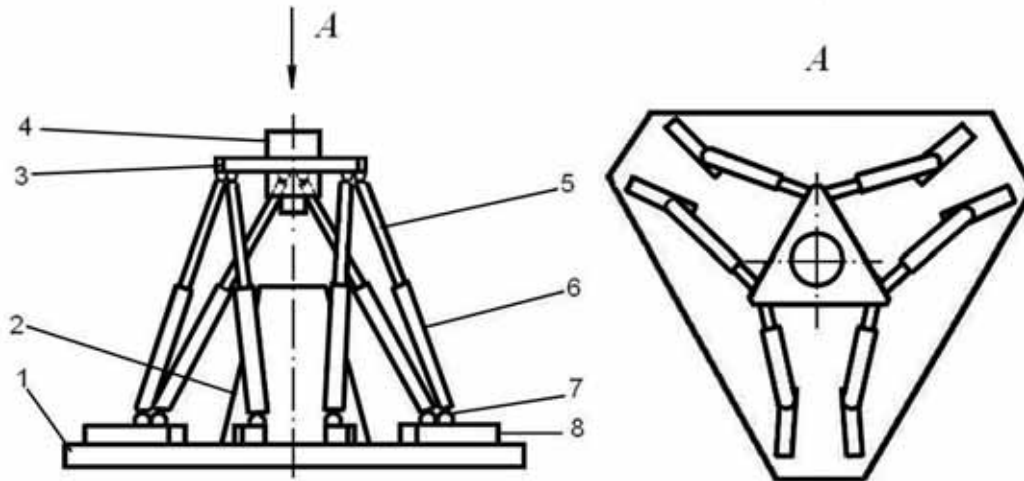


Рис. 9. Станок-гексапод с управляемой формой рабочего пространства:
 1 – неподвижная платформа; 2 – стол; 3 – подвижная платформа; 4 – РО;
 5 – шток штанги; 6 – корпус штанги; 7 – шарнир; 8 – направляющая

Другим подобным решением является трипод (см. рис. 10), разработанный на кафедре «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета [4].

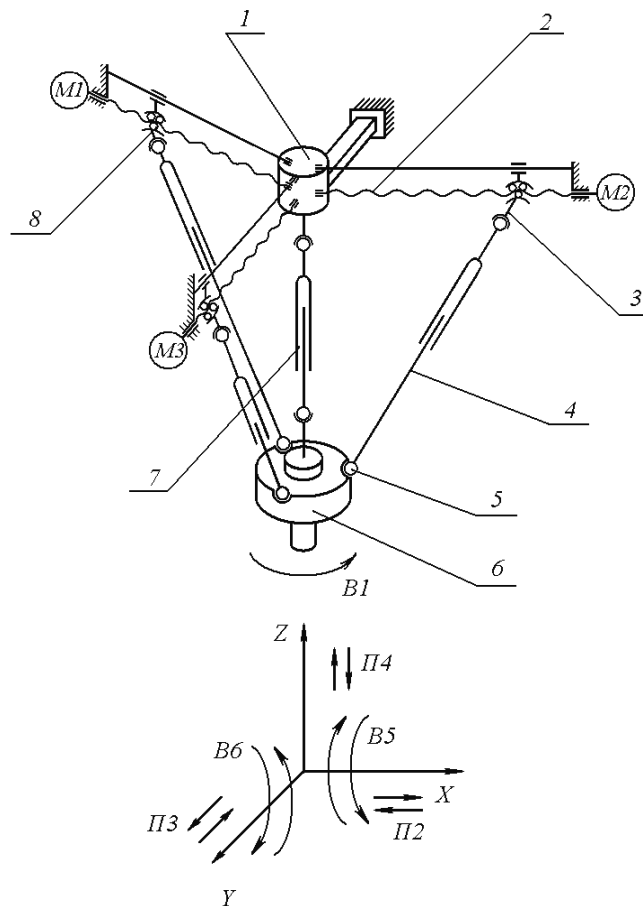


Рис. 10. Структурно-кинематическая схема параллельного механизма:
 1 – центральная часть основания; 2 – ходовой винт; 3 – верхний шарнир; 4 – приводная телескопическая штанга; 5 – нижний шарнир; 6 – нижняя платформа с инструментальной головкой;
 7 – центральная штанга; 8 – каретка; M1, M2, M3 – электродвигатели приводов кареток

Механизм содержит неподвижное основание, состоящее из центральной части 1 и трех ходовых винтов 2, расходящихся от центральной части лучами через каждые 120° , нижнюю платформу 6 и три телескопические приводные штанги 4, приводимые электродвигателями (на схеме не показаны). Приводные штанги 4 и центральная неприводная штанга 7 связывают основание и нижнюю платформу с помощью шарниров 3 и 5. Верхние шарниры 3 установлены на каретках 8, приводимых электродвигателями М1, М2, М3.

В станке объединены элементы, присущие механизмам с изменяемой длиной штанг и постоянной длиной штанг. От механизма с изменяемой длиной штанг здесь имеются приводные телескопические штанги 4 с двигателями (на схеме не показаны) и центральная штанга 7. От механизмов с постоянной длиной штанг имеются каретки 8 на направляющих.

В данной конструкции движения подвижной платформы могут реализовываться следующими способами:

- 1) путем изменения длин приводных телескопических штанг при фиксированном заданном положении верхних шарниров;
- 2) путем перемещения верхних шарниров приводных телескопических штанг при неизменных заданных длинах приводных телескопических штанг;
- 3) путем перемещения верхних шарниров приводных телескопических штанг вдоль ходовых винтов с одновременным изменением длин приводных штанг.

В данной статье приведена лишь незначительная часть примеров использования МПС в металлорежущих станках. Но даже приведенные примеры свидетельствуют о перспективности использования МПС в будущем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов, Ю. Н. Компоновки станков с механизмами параллельной структуры / Ю. Н. Кузнецов, Д. А. Дмитриев, Г. Е. Диневиц; под ред. Ю. Н. Кузнецова. – Киев-Херсон: ПП Вишемирский В.С., 2010. – 471 с.
2. Бушуев, В. В. Механизмы параллельной структуры в машиностроении / В. В. Бушуев, И. Г. Хольшев // СТИН. – 2001. – № 1. – С. 3-8.
3. Потапов, В. А. По материалам выставки ЕМО'2001 и зарубежной печати / В. А. Потапов, А. А. Воеводов // The parallel universe. V. Maier, American Machinist, 2001 V. 145, Nr. 8, P. 74-77. www.americanmachinist.com
4. Пат. RU 115276 B23Q1/00. Параллельный механизм / Щелкунов Е. Б., Щелкунова М. Е., Виноградов С. В., Самар Е. В. – № 2011134223/02; заявл. 15.08.11; опубл. 27.04.12.



Биленко С. В., Сариллов М. Ю., Бурдасов Е. Н., Маслацова А. Э.
S. V. Bilenko, M. Y. Sarilov, Y. N. Burdasov, A. E. Maslatsova

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ПРОШИВКИ ОТВЕРСТИЙ

COMPUTER SIMULATION OF THE PROCESSES OF ELECTRIC SPARK PIERCING

Биленко Сергей Владимирович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; +7 (4217) 241-230. E-mail: s.bilenko@knastu.ru.

Mr. Sergey V. Bilenko – Doctor of Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Str.; +7 (4217) 241-230. E-mail: s.bilenko@knastu.ru

Сариллов Михаил Юрьевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; +7 (4217) 241-134. E-mail: sarilov@knastu.ru.

Mr. Mikhail Y. Sarilov – Doctor of Engineering, Head of the Department of Chemical Production Machinery and Equipment, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Str.; +7 (4217) 241-134. E-mail: sarilov@knastu.ru

Бурдасов Евгений Николаевич – инженер кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; +7 (4217) 241-134. E-mail: kngg@knastu.ru.

Mr. Yevgeny N. Burdasov – Engineering Specialist, Department of Chemical Production Machinery and Equipment, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur), 681013, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Str.; +7 (4217) 241-134. E-mail: kngg@knastu.ru

Маслацова Александра Эдуардовна – инженер-технолог ОАО «Комсомольское-на-Амуре государственное производственное объединение им. Ю.А. Гагарина» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681018, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Советская, 1. E-mail: kukush86@mail.ru.

Ms. Alexandra E. Maslatsova – Process Control Engineer, JSC Yury Gagarin Aviation Plant in Komsomolsk-on-Amur (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681018, Russia, Komsomolsk-on-Amur, 1, Sovetskaya Str. E-mail: kukush86@mail.ru

Аннотация. Предложен метод исследования точности формообразования при электроэрозионной обработке путем создания компьютерной имитационной модели. Установлена зависимость между скоростью потока рабочей жидкости в межэлектродном зазоре и точностью формообразования при электроэрозионном прошивании отверстий.

Summary. A computer simulation method is proposed for checking the precision of forming processes during electrical discharge machining. A dependence is established between the rate of fluid flow in the interelectrode gap and the accuracy of forming processes during electro spark piercing.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, компьютерное моделирование, сеточная модель, электрический пробой, клеточные автоматы.

Key words: electric spark machining, computer simulation, grid model, electric breakdown, cellular automata.

УДК 621.9.048

Введение

Постоянное усложнение формы деталей, а как следствие, повышенные требования к их точности и надёжности, в машиностроении – неотъемлемая составляющая технического прогресса. Для повышения надежности требуется применение более прочных материалов, обработка которых классическими методами затруднена. К таким материалам относятся различные высокопрочные материалы, нержавеющей и жаропрочные стали, твердые и титановые сплавы, широко применяемые в авиа-, судостроительной, автомобильной, двигателестроительной и приборостроительной промышленности [1; 2]. А для повышения точности необходимо учитывать все значимые процессы, происходящие при обработке, что, в свою очередь, позволит снизить погрешность производства деталей. Вышеназванные требования можно выполнить благодаря использованию методов обработки, основанных на электрофизикохимических воздействиях. Одним из таких методов является электроэрозионная обработка (ЭЭО).

Особенностью ЭЭО является то, что обработка ведется импульсами тока, в результате чего происходит удаление материала заготовки. Данный метод обработки позволяет получать изделия практически любой конфигурации с требуемыми параметрами качества поверхностного слоя со значительно меньшими затратами, чем при механической обработке.

Одним из наиболее распространенных методов ЭЭО является метод электроэрозионной прошивки, обеспечивающий возможность изготовления глубоких отверстий различной конфигурации. При прошивании глубоких отверстий основной задачей является поддержание процесса и его интенсификация при значительном внедрении электрода-инструмента в заготовку, когда условия эвакуации продуктов обработки из межэлектродного промежутка затруднены [3]. При прошивании отверстия частицы продуктов эрозии, двигаясь между уже обработанной поверхностью детали и образующей поверхностью электрода-инструмента, вызывают дополнительные электрические разряды, что ведет к возникновению конусности. Для решения данной проблемы используют станки с автоматическим выводом электрода-инструмента (релаксацией) из отверстия для очистки его от продуктов эрозии, а также прокачку или отсос рабочей жидкости.

Следует отметить, что ЭЭО является сложным физическим процессом, экспериментальное исследование которого в значительной степени затруднено вследствие сложности внедрения измерительных приборов непосредственно в зону обработки. Однако процесс ЭЭО можно представить в виде совокупности отдельных процессов, протекание которых подчиняется известным физическим законам, каждый из которых можно описать с помощью математических моделей. Поэтому одним из перспективных методов исследования ЭЭО является имитационное компьютерное моделирование, основанное на математических моделях физических процессов, происходящих в зоне обработки.

1 Имитационное компьютерное моделирование процесса ЭЭО

Моделирование процесса ЭЭО производится в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 1.

Этапы имитационного компьютерного моделирования процесса ЭЭО:

1. Назначаются размеры рабочей области и ячейки сетки, задаются технологические параметры процесса ЭЭО, затем на основании этих данных строится сеточная модель рабочей области.

2. Используя сеточную модель, производится расчет напряженности электрического поля в ячейках сетки в зависимости от текущего положения электродов и концентрации продуктов эрозии в рабочей жидкости.

3. Рассчитывается электрическая прочность локальных участков рабочей жидкости, в зависимости от концентрации содержащихся в них продуктов обработки, и производится

проверка возможности возникновения электрического пробоя между электродом-инструментом (ЭИ) и электродом-заготовкой (ЭЗ).

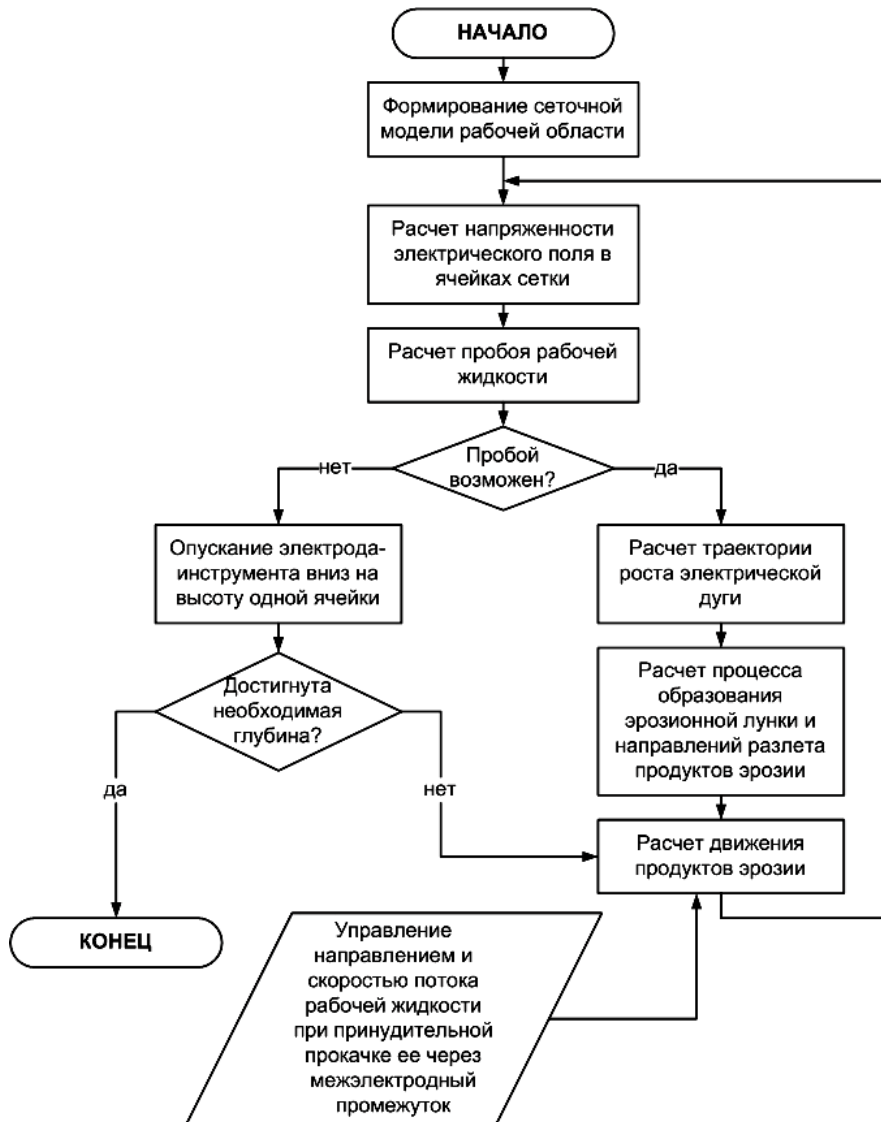


Рис. 1. Алгоритм компьютерного моделирования процесса ЭЭО

4. Если для данного положения электродов и концентрации продуктов эрозии пробой межэлектродного промежутка возможен, то рассчитывается траектория образования электрической дуги.

5. В местах соприкосновения дуги с электродами формируются эрозийные лунки и рассчитываются направления разлета продуктов эрозии, образовавшихся в лунках.

6. С учетом вновь образовавшихся продуктов обработки производится глобальный расчет движения всех продуктов эрозии в рабочей жидкости. При этом в случае использования принудительной прокачки рабочей жидкости всем частицам продуктов эрозии придается импульс, направление которого совпадает с направлением прокачки.

7. Затем снова производится расчет напряженности электрического поля в ячейках сетки в зависимости от текущей концентрации продуктов эрозии, и процесс моделирования итерационно повторяется.

8. Если в процессе ЭЭО межэлектродный зазор увеличился настолько, что образование электрической дуги становится невозможно, то происходит опускание электрода-инструмента вниз на высоту одной ячейки сеточной модели.

9. Если на этом этапе достигнута заданная глубина прошиваемого отверстия или же достигнуто «дно» сеточной модели, то процесс моделирования прекращается.

10. Если заданная глубина прошиваемого отверстия не достигнута, то работа компьютерной модели продолжается. Следует отметить, что процесс опускания электрода-инструмента сопряжен с дополнительным приложением импульса к частичкам продуктов обработки, взвешенным в рабочей жидкости, поэтому после этого этапа необходимо снова произвести глобальный расчет движения продуктов эрозии в рабочей жидкости.

Для реализации предложенного алгоритма имитационного компьютерного моделирования процесса ЭЭО был разработан комплекс математических моделей сопряженных физических процессов при единичном электрическом разряде, включающий в себя модель распределения электрических потенциалов в зоне обработки, модель пробоя межэлектродного промежутка (МЭП), модель движения продуктов эрозии в межэлектродном зазоре.

2 Сеточная модель распределения электрических потенциалов в рабочей области

Для построения сеточной модели рабочей области задается диаметр электрода-инструмента $D_{и}$, глубина прошиваемого отверстия $H_о$ (см. рис. 2), тип рабочей жидкости (РЖ) и напряжение, подаваемое на электроды. Исходя из электрических свойств используемой РЖ и напряжения импульсов, рассчитывается номинальный (для чистой РЖ) размер МЭП $h_{мэп}$:

$$h_{мэп} = \frac{U_u}{E_{np}}, \quad (1)$$

где U_u – напряжение импульса, В; E_{np} – электрическая прочность незагрязненной РЖ, В/м.

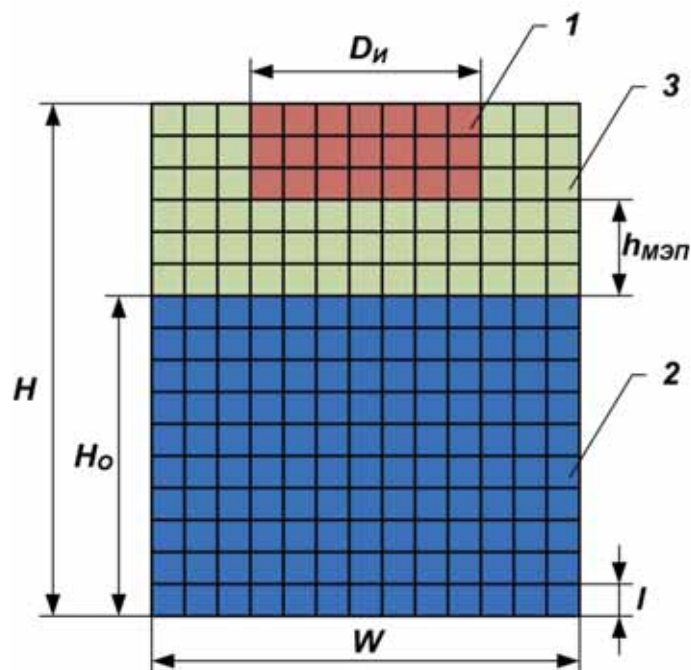


Рис. 2. Сеточная модель рабочей области: 1 – электрод-инструмент; 2 – электрод-заготовка; 3 – рабочая жидкость

Исходя из рассчитанного $h_{МЭП}$, выбирается размер ячейки сетки l таким образом, чтобы МЭП укладывался в целое число ячеек сетки и составлял не менее трех ячеек. При использовании в качестве РЖ керосина и напряжении импульсов, равном 200 В, размер ячейки сетки выбирается в интервале от 1 до 10 мкм и размер МЭП составляет от 3 до 28 ячеек.

На основании геометрических размеров электродов $D_{И}$, $H_{О}$ и величины МЭП задаются ширина W и высота H сеточной модели, выраженные в количестве ячеек.

Расчет электростатического поля в зоне обработки производится методом конечных разностей. При этом непосредственно для расчета электрических потенциалов ячеек используется метод резистивных сеток, где в качестве сопротивлений выступают величины, обратные диэлектрическим проницаемостям ячеек сетки. Для ячеек, соответствующих электродам, диэлектрическая проницаемость принимается равной большому конечному числу.

Пример распределения электрических потенциалов в зоне обработки до начала расчета и после завершения вычисления электростатического поля приведен на рис. 3.

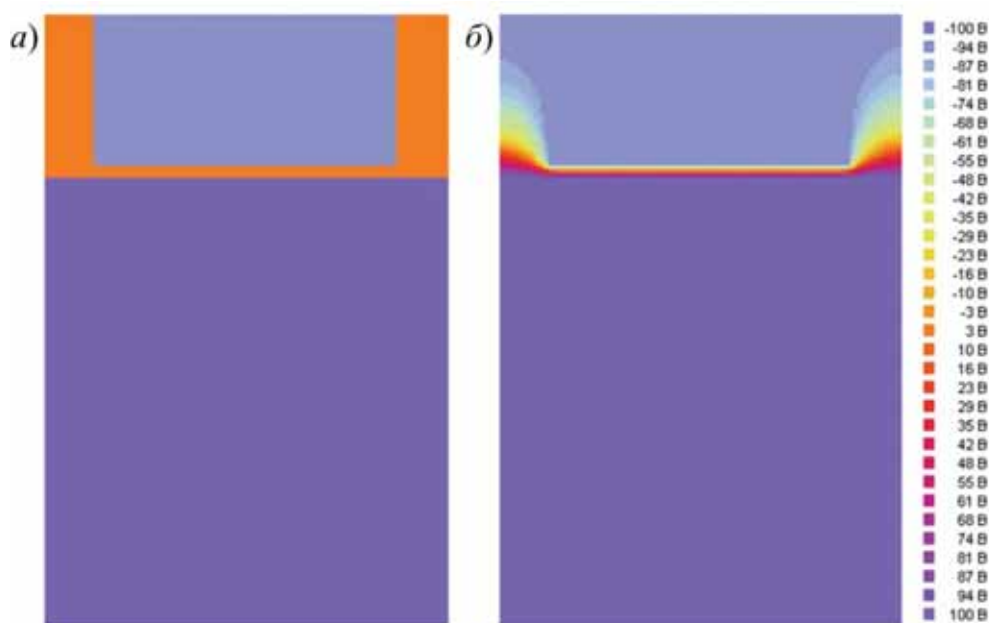


Рис. 3. Распределение электрических потенциалов в зоне обработки:

а – до начала расчета электростатического поля;

б – после вычисления электростатического поля

3 Модель пробоя межэлектродного промежутка

После расчета электростатического поля происходит расчет пробоя локальных участков РЖ. Для этого вычисляется электрическая прочность ячеек МЭП. В данной модели каждая ячейка РЖ может быть загрязнена продуктами эрозии, причем концентрация загрязнения может составлять от 0 до 100 % (см. рис. 4).

Принимая допущение, что продукты эрозии являются частицами проводника, и их наличие в РЖ уменьшает линейные размеры той области ячейки, которая занята диэлектриком, введем в модель линейную зависимость электрической прочности ячейки от концентрации K_3 продуктов эрозии в ней:

$$E_{пр.з} = E_{пр} \left(1 - \frac{K_3}{100\%} \right), \quad (2)$$

где $E_{пр.з}$ – напряженность пробоя ячейки РЖ, загрязненной продуктами эрозии, В/м; $E_{пр}$ – номинальная напряженность пробоя чистой РЖ, В/м.

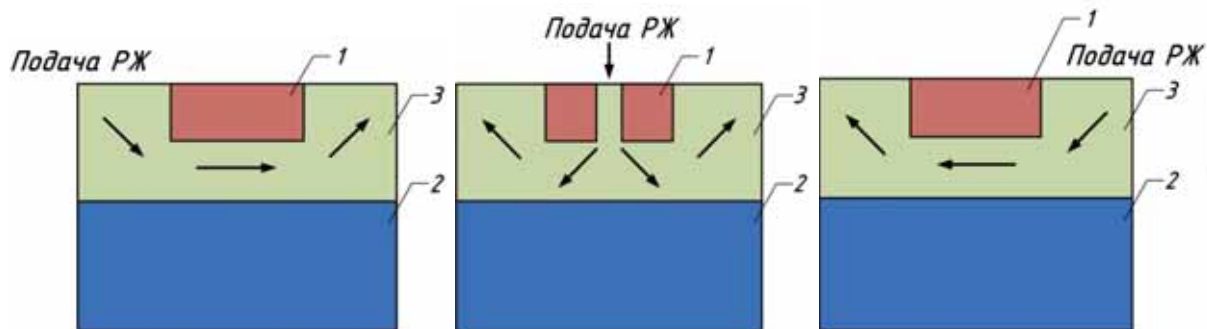


Рис. 4. Направления движения рабочей жидкости при различных режимах принудительной прокачки: 1 – электрод-инструмент; 2 – электрод-заготовка; 3 – рабочая жидкость

С учетом (2) определяется напряженность электрического поля для ячеек РЖ.

Полученная математическая модель пробоя межэлектродного промежутка имеет вид:

$$\begin{cases} h_{МЭП} \approx h_{пр} = \frac{U_u}{E_{пр}}; \\ E_{пр.з} = E_{пр} \left(1 - \frac{K_3}{100\%} \right), \end{cases}$$

где $h_{МЭП}$ – номинальный размер МЭП, м; $h_{пр}$ – размер пробиваемого МЭП, м; U_u – напряжение импульса, В; $E_{пр}$ – номинальная напряженность пробоя чистой РЖ, В/м; $E_{пр.з}$ – напряженность пробоя РЖ, загрязненной продуктами эрозии, В/м; K_3 – концентрация продуктов эрозии в РЖ в процентах.

Следует отметить, что наибольшая напряженность электрического поля наблюдается на углах ЭИ. Если для какой-либо ячейки напряженность электрического поля больше, чем напряженность пробоя, то разряд в МЭП возможен, и происходит расчет траектории образования электрической дуги.

В данной компьютерной модели эрозионные лунки в ЭЗ образуются после каждого разряда, а в ЭИ – с вероятностью, равной коэффициенту относительного износа инструмента. То есть, если в модели задан коэффициент относительного износа ЭИ, равный 6 %, то эрозионная лунка будет образовываться в среднем после попадания $1/0,06 \approx 16$ разрядов в одну и ту же ячейку ЭИ.

4 Модель движения продуктов эрозии в межэлектродном зазоре

Для имитации движения продуктов эрозии в РЖ в данной компьютерной модели используется клеточно-автоматная модель FHP-EP (erosion products). Модель FHP-EP базируется на клеточно-автоматной модели потока FHP-MP [4], в которой допускается более одной частицы в клетке с равными векторами скорости. Модель FHP-MP является обобщением классической модели на булевых векторах FHP (Frish, Hasslacher, Pomeau) [5].

Для имитации прокачки РЖ через МЭП в данной компьютерной модели также используется клеточно-автоматная модель FHP-EP. Каждой частице продуктов эрозии придается дополнительный импульс в соответствии с направлением прокачки РЖ.

После каждой операции расчета движения продуктов эрозии цикл работы компьютерной модели повторяется. То есть происходит новый расчет электростатического поля в зоне обработки с учетом появления новой эрозионной лунки и нового положения продуктов эрозии, а затем производится новый расчет пробоя РЖ.

Если при расчете пробоя выяснится, что пробой невозможен, вследствие слишком большого расстояния между электродами, то модель произведет опускание ЭИ вниз на высо-

ту одной ячейки сеточной модели. При этом частицам продуктов эрозии, расположенным непосредственно под ЭИ, будет придан дополнительный импульс, направленный вниз, и модель выполнит соответствующую операцию расчета движения продуктов эрозии.

5 Эксперименты и их обсуждение

Для исследования влияния скорости потока РЖ в МЭЗ на точность формообразования при ЭЭО была проведена серия компьютерных экспериментов. В качестве изменяемого параметра использовалась скорость V потока РЖ в МЭЗ при постоянных значениях напряжения U , подаваемого на электроды. Рабочая среда – керосин, напряжение 160 В, режимы принудительной прокачки – «прокачка РЖ вправо» и «прокачка РЖ через ЭИ». Для упрощения расчета канал в инструменте принимался бесконечно узким.

Погрешность формообразования вычислялась по формуле

$$\Delta = \frac{S_{\text{факт}} - S_{\text{ном}}}{S_{\text{ном}}},$$

где $S_{\text{факт}}$ – количество фактически удаленного материала со стенок прошиваемого отверстия; $S_{\text{ном}}$ – номинальное (расчетное) количество материала, которое должно быть удалено со стенок прошиваемого отверстия.

Величина $S_{\text{ном}}$ рассчитывается следующим образом:

$$S_{\text{ном}} = 2h \cdot \delta,$$

где h – высота прошиваемого отверстия; δ – расчетная величина пробивного зазора.

Величина $S_{\text{факт}}$ вычисляется по имитационной модели путем подсчета ячеек фактически удаленного материала.

Результаты компьютерных экспериментов приведены в табл. 1, графики полученных зависимостей $f = \Delta(V)$ представлены на рис. 5.

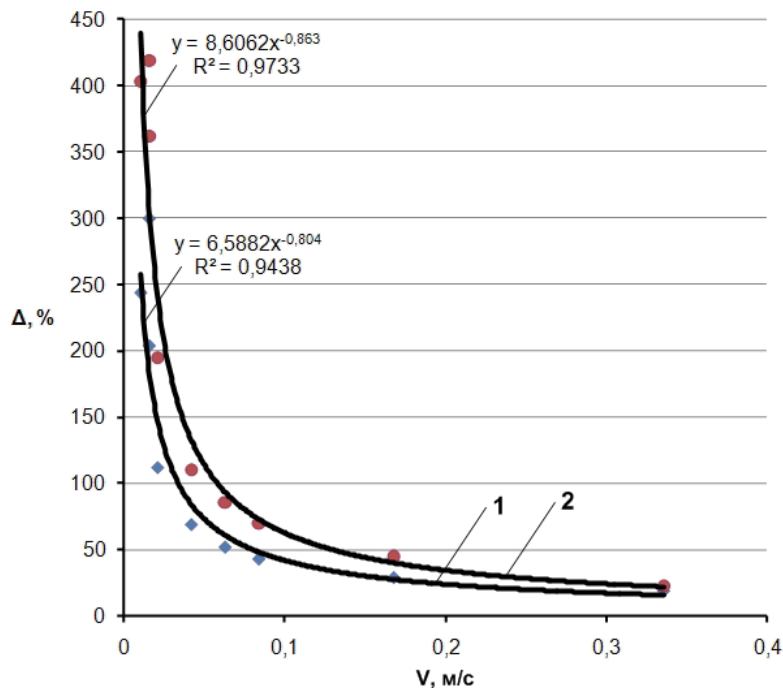


Рис. 5. Зависимость погрешности формообразования Δ от скорости V потока рабочей жидкости в межэлектродном зазоре: 1 – режим «прокачка РЖ вправо»; 2 – режим «прокачка РЖ через ЭИ»

Таблица 1

Результаты компьютерных экспериментов

$V, м/с$	0,005	0,01	0,016	0,021	0,042	0,063	0,084	0,168	0,336
$U, В$	Погрешность формообразования Δ , %								
Прокачка РЖ вправо									
160	300	244	204	112	69	52	43	29	19
Прокачка РЖ через ЭИ									
160	419	403	362	195	110	86	70	45	23

Анализ графиков показывает, что зависимость погрешности формообразования Δ от скорости V потока РЖ носит степенной характер вида $\Delta = aV^b$, где a и b – эмпирические коэффициенты. Причем степенной характер этой зависимости прослеживается очень четко – среднеквадратичное отклонение от степенного закона составляет 2,5 % для режима «прокачки РЖ через ЭИ» и 5,5 % для режима «прокачка РЖ вправо».

Заключение

Проведенные компьютерные эксперименты подтвердили адекватность разработанной имитационной модели процесса ЭЭО. Погрешность между экспериментальными и полученными с помощью модели результатами не превысила 6 %.

В результате имитационного моделирования процесса образования единичных разрядов в межэлектродном промежутке установлено, что происходит повышенный износ электрода-инструмента на углах в связи с концентрацией в этих местах силовых линий напряженности электрического поля.

При имитационном моделировании процесса образования продуктов эрозии в результате каждого единичного разряда установлено, что суммарное действие износа электрода-инструмента и продуктов эрозии изменяет величину межэлектродного зазора, и как следствие, форму и размеры обрабатываемого отверстия.

Зависимость погрешности формообразования Δ при ЭЭО от скорости V потока рабочей жидкости в МЭМ носит степенной характер вида $\Delta = aV^b$, где a и b – эмпирические коэффициенты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Размерная электрическая обработка металлов / Б. А. Артамонов [и др.]; под ред. А. В. Глазкова. – М.: Высш. шк., 1978. – 336 с.
2. Зингерман, А. С. Электрическая обработка металлов / А. С. Зингерман. – Л.: Машгиз, 1958. – 26 с.
3. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. В 2 т. Т. 1. Обработка материалов с применением инструмента / Б. А. Артамонов, Ю. С. Волков, В. И. Дрожалова [и др.]; под ред. В. П. Смоленцева. – М.: Высш. шк., 1983. – 247 с.
4. Медведев, Ю. Г. Моделирование потоков жидкости решетчатым газом с кратными векторами скорости частиц / Ю. Г. Медведев // Материалы международной конференции «Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах» (г. Казань, 17-19 ноября 2008 г.) – Казань, 2008.
5. Frisch, U. Lattice-Gas automata for Navier-Stokes equations / U. Frisch, B. Hasslacher, Y. Pomeau // Phys. Rev. Lett. – 1986. – № 56. – P. 1505.

Бахматов П. В.
P. V. Bakhmatov

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ
НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**ANALYTICAL EVALUATION PROCESS FORMATION OF THE PERMANENT CON-
NECTION OF CONSTRUCTION MATERIALS**



Бахматов Павел Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология сварочного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: bp_1@mail.ru.

Mr. Pavel V. Bakhmatov, PhD., assistant professor of «Welding Technology» Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: bp_1@mail.ru

Аннотация. В статье проведен подробный анализ дефектов сварных соединений конструкций при использовании различных способов сварки, установлены причины их появления.

Summary. The article gives a detailed analysis of the defects of welded joints of structures using different methods of welding, set the cause.

Ключевые слова: сварка, порообразование, разделительные операции, конструкционные материалы, механические свойства, дефектный поверхностный слой, газосодержание, коэффициент использования металла.

Key words: welding, pore formation, separation operations, construction materials, mechanical properties, the defective surface layer, gas content, metal recovery

УДК 621.791.947.2

В ходе технологических операций сварки различных конструкционных материалов разнообразными способами сварки велика вероятность появления проблем, связанных с изменением механических свойств по отношению к основному металлу, возникновением напряжений и деформаций, а вместе с тем и структурной неоднородности, образованием дефектов различной этимологии. В работе проведены анализ дефектов при производстве сварных конструкций с целью определения причин их появления и перспектива дальнейших исследований для поиска возможностей их устранения.

Методика проведения исследований

Анализ технологичности изготовления, свойств и дефектов проводили по результатам входного и технологического контроля материалов и деталей, изготовленных сваркой плавлением и оценкой возможности изготовления деталей, получение которых связано с высокой трудоемкостью и малым коэффициентом использования металла (КИМ) (фрезерование, штамповка) диффузионной сваркой и сваркой трением с перемешиванием (СТП).

Сварка титановых конструкций летательных аппаратов. Статистическому анализу подвергались результаты контроля при дефектоскопии 57242 мест в сварных швах панели центроплана, деталей хвостовой части фюзеляжа, защитного устройства и др. Толщина соединяемых заготовок не превышала 6 мм и 3880 мест 24 видов шпангоутов, 188 мест лонжеронов и других деталей толщинами от 6 до 200 мм.

Основными видами сварных соединений в изготавливаемых по серийной технологии конструкциях были стыковые и тавровые. Использовались следующие виды сварки: автома-

Бахматов П. В.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

тическая аргонодуговая сварка неплавящимся электродом, сварка погруженным вольфрамовым электродом и электронно-лучевая сварка (ААрДЭС, СПВЭ и ЭЛС). ААрДЭС стыковых и тавровых соединений листовых заготовок в серийном производстве осуществляется на специальных стапелях (УСПО-2,6) автоматом АДСВ-6 с применением в качестве защиты аргона высшей очистки, присадочной проволоки ВТ1-00 и неплавящегося вольфрамового электрода диаметром от 1,6 до 3 мм. СПВЭ заготовок из штамповок сплава ВТ20 осуществлялась на специализированной сварочной установке типа ГСПД-1М, изготовленной предприятием АО «Электромеханика» (г. Ржев). ЭЛС в вакууме в серийном производстве осуществлялась на установке ЭЛУ-21.

Качество сварных соединений контролировалось: визуально-оптическим осмотром, испытаниями механических свойств, анализом содержания примесей газов, рентгеноскопией, капиллярной дефектоскопией и др. Кроме того, осуществлялся 100-процентный контроль защитных газов аргона и гелия (проверялся каждый баллон) на содержание влаги и примесей газов в них.

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ результатов испытаний сварных соединений панелей показывает, что их механические свойства – предел прочности и угол изгиба – находятся в пределах допуска требований ОСТ 1.90000-70 для основного металла ($\sigma_b = 980 \dots 1060$ МПа и угол загиба $30 \dots 50^\circ$). Из сопоставления результатов анализа испытаний механических свойств основного металла и сварных соединений видно, что прочность сварного соединения на 8...12 % меньше прочности основного металла.

Анализ результатов испытания механических свойств сварных соединений штамповок показывает, что предел прочности и ударная вязкость соответствуют требованиям для сварных конструкций (950 МПа и ударную вязкость 60 Дж/см^2), т.е. укладываются в допустимые пределы для основного металла. Ударная вязкость металла зоны сплавления для большинства соединений – 45 Дж/см^2 , а металла шва составляет 55 Дж/см^2 . Причем после ЭЛС наблюдается снижение ударной вязкости в 1,5...2 раза по сравнению со сваркой погруженным неплавящимся электродом.

По результатам механических испытаний образцов металла шва по ГОСТ 6996-66 установлено, что пределы прочности и текучести идентичны как для основного металла, так и для металла шва, значения относительного сужения и удлинения укладываются в нормы для основного металла (ОСТ 1.90000-70). Незначительное снижение удлинения и сужения металла шва по сравнению с основным металлом объясняется развитием химической структурной неоднородности в сварном шве.

Содержание водорода, азота, кислорода у большинства сварных соединений соответствует требованиям ОСТ 1.90013-71 и составляет: водорода – 0,0025 %, азота – 0,03 %, кислорода – 0,045 %.

Анализ дефектов и недостатков различных способов сварки.

Сварка ААрДЭС. 37 % от общего количества дефектов – визуально обнаруженные: подрезы – 14 %; характерный для тавровых соединений дефект – неоформленная галтель – 12 %; включения меди (подплавление оснастки) – 8 %; непровары – 3 %.

Рентгеноскопия сварных соединений деталей выявила 2,2 % дефектов из 57242 мест контроля. Поры – наиболее встречаемый из внутренних дефектов (43 %), диаметр одиночных пор 0,1...2,0 мм. Обнаруживаются цепочки пор, образующие почти сплошную линию; несплавления составляют – 12 %, размер несплавлений – 0,8...10 мм; вольфрамовые включения – 9 %, диаметр вольфрамовых включений – 1,1...4,5 мм; трещины – 6 %, глубина трещин – 1,5...11 мм. Отдельные дефекты имеют размер от 38 до 80 мм. Несплавления, трещины, как правило, располагаются в конце сварных швов.

Снижение пористости в сварных швах – одна из важнейших проблем, стоящих при изготовлении конструкций из титановых сплавов: количество контролируемых мест в конструкции – 15...180 и в случае дефектности хотя бы одного места необходима доработка детали (исправление дефекта), что увеличивает трудоемкость изготовления конструкции, а в отдельных случаях и невозможно.



СПВЭ. Общий уровень дефектности не превышает 2 %, а в зависимости от сечения свариваемых заготовок колеблется от 0,5 до 1,0 %. Анализ дефектов выявленных рентгенографией сварных соединений (3880 контрольных мест) установил основные дефекты: поры, непровар – нерасплавленная вставка (минимальный уровень дефектности), вольфрамовые включения (наибольший уровень дефектности). Дефекты располагаются преимущественно в центральной зоне металла шва. Размер пор и вольфрамовых включений составляет ~ 2 мм, нерасплавленная вставка (непровар) ~ 4 мм.

При сварке за один проход дефектов почти в 2 раза меньше, чем при сварке в два прохода. Дефектов в ОШЗ и ЗТВ не обнаруживается.

Анализ уровня дефектности при СПВЭ показывает, что образование нерасплавленной вставки (непровара) связано с малой глубиной проплавления за один проход, а вольфрамовые включения – с низкой стойкостью вольфрамовых электродов.

ЭЛС. Анализ дефектов сварных соединений, выполненных ЭЛС, выявленных рентгенографией 2188 мест показал, что обнаруживаются дефекты: поры, непровар, несплавления, подрезы, общий уровень которых не превышает 1,2 % от общего числа проверенных мест. Размеры дефектов колеблются: поры, цепочки пор 0,5...3 мм, непровар, несплавления-0,5...4 мм, подрезы 1...7 мм. Дефекты непровар, несплавления, подрезы характеризуют формирование усиления и корня шва при ЭЛС. Отступления от проектных размеров и формы отдельных элементов или всего изделия, вызванные его деформацией в процессе сварки, также относятся к дефектам.

Холодные трещины (ХТ) относятся к числу опасных и распространенных дефектов в сварных конструкциях из титановых сплавов. Технологическими причинами возникновения ХТ могут быть нарушения технологии сварки, термообработки, изготовления полуфабрикатов и т.п. Сложность конструкции, а также локальный нагрев и неравномерное распределения металла при сварке способствуют возникновению сварочных напряжений, коробления и возникновению холодных трещин, появляющихся лишь по истечении некоторого времени.

Результаты анализа дефектов швов показывают, что холодные трещины составляют 2...4 % от общего числа дефектов, возникают преимущественно в тавровых соединениях в зоне окончания сварного шва, длина трещин колеблется от 0,5 до 10 мм.

Электрошлаковая сварка (ЭШС). Недостатками электрошлаковой сварки являются:

- производство сварки только в вертикальном или в близком к вертикальному положению (отклонение от вертикали не более 30°) свариваемых плоскостей;
- недопустимость остановки электрошлакового процесса до окончания сварки. В случае вынужденной остановки в сварном шве возникает дефект. В таком случае сварной шов подвергают ремонту или полностью удаляют и вновь заваривают;
- непровары – наиболее наблюдаемые дефекты при ЭШС (локализуется по двум или одной кромке, встречаются местные непровары у поверхности соединяемых элементов или посередине шва). Малая ширина шва, связанная с низким напряжением или высокой скоростью сварки, вызывает непровар по двум кромкам. Непровар по одной кромке происходит по причине неточного перемещения электрода по оси соединения, что вызывает смещение шва на одну из кромок с отсутствием оплавления второй кромки. При увеличении расстояния от конечного положения электрода до ползуна и при малой продолжительности остановки электрода в конечном положении возникает непровар у поверхности свариваемых деталей. Непровар по середине деталей по их толщине при сварке двумя подвижными электродами является следствием излишне большого расстояния между последними или «виляния» конца электрода из-за его перегрева. Участок шва с непроваром, размеры которого превышают нормативно установленные, должен быть удален и заварен заново;
- необходимость изготовления и установки перед сваркой технологических деталей (планки, «стартовые карманы», формирующие устройства и др.);
- крупнозернистая структура в металле шва и зоне термического влияния и связанная с этим низкая ударная вязкость металла сварного соединения при отрицательных температу-

рах. При ЭШС структура металла швов может характеризоваться наличием зоны 1 крупных столбчатых кристаллов (см. рис. 1, а), которые растут в направлении, обратном отводу тепла, зоны 2 тонких столбчатых кристаллов, характеризуемой меньшей величиной зерна и несколько большим их отклонением в сторону теплового центра, и зоны 3 равноосных кристаллов, располагающейся посередине шва. Строение швов зависит от способа ЭШС, химического состава металла шва и режима сварки. Повышение содержания в шве углерода и марганца увеличивает, а уменьшение интенсивности теплоотвода, наоборот, уменьшает ширину зоны.

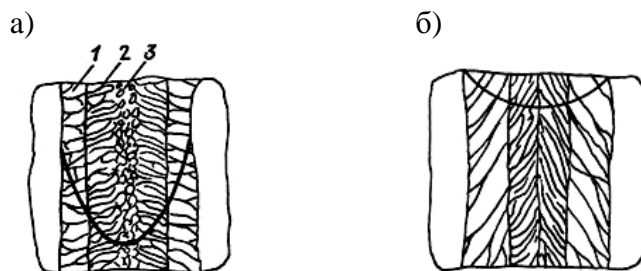


Рис. 1. Схема строения структур металла шва при ЭШС

При сварке проволочными электродами могут быть только первые две зоны (см. рис. 1, б) или какая-либо одна из них. Металл швов, имеющих структуру зоны 2, имеет пониженную стойкость против кристаллизационных трещин. Медленное охлаждение швов при ЭШС в интервале температур фазовых превращений способствует тому, что их структура характеризуется грубым ферритно-перлитным строением с утолщенной оторочкой феррита по границам кристаллов. Термический цикл околошовной зоны при ЭШС характеризуется ее длительным нагревом и выдержкой при температурах перегрева и медленным охлаждением. Поэтому в ней могут образовываться грубые видманштеттовы структуры, которые по мере удаления от линии сплавления сменяются нормализованной мелкозернистой структурой. В зоне перегрева может наблюдаться падение ударной вязкости, что устраняется последующей термической обработкой (нормализация с отпуском). Термический цикл ЭШС, способствуя распаду аустенита в области перлитного и промежуточного превращений, благоприятен при сварке низколегированных сталей, так как способствует подавлению образования закалочных структур.

Термический цикл, которому подвергался металл в отдельном участке ЗТВ при сварке, является основным фактором, определяющим конечную структуру его металла после окончания сварки. Решающими факторами термического цикла сварки являются максимальная температура, достигаемая металлом в рассматриваемом объекте, и скорость его охлаждения. Ширина и конечная структура различных участков зоны термического влияния определяются способом и режимом сварки, составом и толщиной основного металла.

Из перечисленных недостатков наиболее влиятельным на надежность сварных конструкций является образование крупного зерна в шве и околошовной зоне вследствие замедленного нагрева и охлаждения. Для устранения этой проблемы на практике, в основном, проводят термическую обработку: нормализацию или отжиг. Этот метод не всегда осуществим в виду того, что изделия, сваренные ЭШС, крупногабаритные: добиться равномерного нагрева по всему сварному соединению невозможно. Имеется возможность воздействия как кратковременными [1], так и постоянными электромагнитными импульсами [2] на расплавленный металл, что обеспечивает измельчение структуры и подавление ликвации, а перемешиватель для кристаллизатора МНЛЗ уникален своим принципом действия – он создает акустическую волну, воздействующую на фронт кристаллизации вдоль всей глубины жидкометаллической лунки.

Перечисленные методы улучшают качество металла, но не способствуют получению мелкозернистой структуры. Проблема увеличения механических свойств не решена, поэтому необходимо изыскать возможность измельчения зерна пластической деформацией в области



предпревращений, т.е. одновременной деформации расплавленного и кристаллизующегося металла.

Диффузионная сварка. Изготовление корпуса замка, шайбы, обгонной муфты и других деталей методом штамповки имеет ряд недостатков: низкий коэффициент использования металла (0,06-0,58), высокая трудоемкость их изготовления, существуют ограничения по форме и размерам изготавливаемых заготовок.

В связи с этим необходимо проводить поиск и исследование способов, позволяющих существенно сократить технологический цикл изготовления изделий, повысить КИМ до 1,0, снизить энергоемкость технологических операций, тем самым повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции. К таким способам, в частности, можно отнести и диффузионную сварку, которая имеет ряд недостатков: дорогостоящее оборудование, ограничены размеры изготавливаемых деталей, необходимо создавать и постоянно поддерживать вакуумирование, усилие сдавливания и температуру, что достаточно затратно по времени и электроэнергии.

Сварка трением с перемешиванием. Фрезерование – единственный технологический процесс создания оребренных панелей летательных аппаратов, выполненных из высокопрочных алюминиевых сплавов, в ходе которого основная масса металла заготовки преобразуется в стружку (процент использования металла – 2-3).

Оребренные панели после фрезерования подвергаются формообразованию путем натяжки на специальные эталоны. На эту операцию также даются значительные технологические припуски. С целью уменьшения материалоемкости используют приваренные контактной сваркой технологические пластины, которые зачастую не выдерживают прилагаемых нагрузок. Переход к сварке панелей позволил бы не только значительно уменьшить материалоемкость производства, но и снизить энерго- и трудозатраты при их изготовлении.

Известно [3], что свариваемость высокопрочных алюминиевых сплавов при сварке плавлением неудовлетворительная из-за склонности образования горячих трещин. Кроме того, сварное соединение обладает повышенной хрупкостью и пониженной коррозионной стойкостью.

Наиболее перспективным методом для решения указанной проблемы является способ сварки трением с перемешиванием (СТП) [3]. Но и он не лишен недостатков: существенно снижаются механические свойства сварных соединений непосредственно после СТП. Поэтому следует активизировать научные изыскания механизма формирования сварного соединения при СТП, предварительных, сопутствующих и последующих СТП операций.

Выводы:

1. Общими, наиболее опасными дефектами, для всех видов сварки являются холодные трещины и поры. Единственной особенностью для СПВЭ является формирование пористости в зоне нерасплавленной проставки и вольфрамовые включения. Исследования причин и механизма образования пор, появления трещин, вольфрамовых включений и мер по их исключению – одна из важнейших задач.

2. Проблема увеличения механических свойств после ЭШС не решена, поэтому необходимо изыскать возможность измельчения зерна пластической деформацией в области предпревращений, т.е. одновременной деформации расплавленного и кристаллизующегося металла.

3. Необходимо проводить поиск и исследование способов диффузионной сварки, позволяющих существенно сократить технологический цикл изготовления изделий, повысить КИМ до 1,0, снизить энергоемкость технологических операций, тем самым повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции по отношению к штамповке.

4. Следует проводить научные изыскания механизма формирования сварного соединения при СТП, предварительных, сопутствующих и последующих СТП операций с целью повышения механические свойства сварных соединений непосредственно после СТП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ри, Э. Х. Электронно-микроскопическое исследование и микрорентгеноспектральный анализ бронзы, облученной в жидком состоянии наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) / Э. Х. Ри, С. В. Дорофеев, Хосен Ри // Литейщик России. – 2007. – № 7. – С. 33-36.
2. Гарнье, М. Возможности и перспективы электромагнитной обработки материалов / М. Гарнье // Магнитная гидродинамика. – 1996. – Т. 32. – № 2. – С. 131-140.
3. Штрикман, М. М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений. Ч. 2. Совершенствование инструмента и технологических схем сварки / М. М. Штрикман // Сварочное производство. – 2007. – № 10. – С. 25-32.

Бахматов П. В.

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТЫКУЕМЫХ КРОМОК НА МЕХАНИЗМ ПОРООБРАЗОВАНИЯ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Бахматов П. В.

P. V. Bakhmatov

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТЫКУЕМЫХ КРОМОК НА МЕХАНИЗМ ПОРООБРАЗОВАНИЯ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

THE IMPACT OF THE NATURE OF SURFACE BUILDING OF DOCKED EDGES ON THE MECHANISM OF PORE FORMATION OF THE EDGES AN ON THE PROPERTIES OF THE WELD METAL IN FUSION WELDING OF TITANIUM ALLOYS



Бахматов Павел Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология сварочного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: bp_1@mail.ru.

Mr. Pavel V. Bakhmatov – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Welding Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: bp_1@mail.ru

Аннотация. Наиболее вероятный дефект сварных соединений титановых сплавов – поры. Установлено, что на порообразование оказывает существенное влияние природа формирования структуры поверхностного слоя соединяемых кромок. Глубина разрыхленного поверхностного слоя влияет на интенсивность и экстенсивность адсорбционной способности загрязнений и соответственно на термически активируемый процесс твердофазного взаимодействия перед фронтом расплавленной ванны и уровень дефектности (пористости) в сварном шве. Следовательно, параметр шероховатости (Ra, Rz), используемый в производстве, не в полной мере характеризует качество сформированной поверхности раздела. Изменения дефектности поверхностного слоя заготовок от вида технологических операций раскроя и обработки и соответственно уровня дефектности (пористости) позволяют выбрать приемлемый метод для раскроя и обработки заготовок под сварку.

Summary. The most probable defect in welded joints of titanium alloys are pores in them. It is established that the nature of the formation of surface structure of connected edges has a significant impact on pore formation. The depth of a loosened surface layer affects the intensity and extent of adsorption capacity of contamination, and consequently on the process of thermally activated solid-phase interaction at the edge of the molten bath, and on the level of defects (porosity) in the weld. Consequently, the roughness parameter (Ra, Rz) used in production, does not fully characterize the quality of the formed interface. Changes in the surface layer's defect level in blanks depending on the type of cutting and machining and thus on the level of defects (porosity) allow us to select an acceptable method for cutting and machining of blanks to be welded.

Ключевые слова: сварка плавлением, шероховатость, порообразование, титановые сплавы, механические свойства, газосодержание, дефектный слой, разделительные операции.

Key words: Fusion welding, surface roughness, pore formation, titanium alloys, mechanical properties, gas content, defective layer, separation operations.

УДК 621.791.947.2

В многочисленных публикациях отечественных и зарубежных авторов приведен анализ отдельных технологических операций, влияющих на процессы порообразования. В настоящей работе делается попытка систематизации технологических операций по степени влияния их на механизм порообразования, формирования макро- и микроструктуры и свойства металла шва при сварке плавлением титановых сплавов.

Методика проведения исследований

Исследования проводились на заготовках из среднепрочного титанового сплава ВТ20. Заготовки раскраивались различными методами. Автоматическую аргодуговую сварку листовых заготовок размерами 600×100×2 мм выполняли автоматом АДСВ-6 с применением стенда УСПО-2,6. Для защиты использовали аргон высшей очистки. Электронно-лучевую сварку (ЭЛС) и сварку погруженным вольфрамовым электродом (СПВЭ) проводили на образцах имитаторах размером 200×300 мм различной толщины на установках соответственно КЛ-138 и ГСПД-1М. Исследование качества поверхности образцов, изменение макро- и микроструктуры, химического состава и механических свойств проводили по методике, приведенной в работе [2]. После сварки заготовки подвергали рентгенографии на аппарате РАП-150/300. Размеры пор оценивались с точностью до 0,05 мм.

Результаты исследований и их обсуждение

Как видно из данных статистического анализа дефектов сварных титановых конструкций (см. рис. 1), выявленных при рентгенографии 57242 мест сварных соединений, выполненных ААрдЭС (толщины 0,5...6,0 мм), 3880 мест сварных соединений – СПВЭ (толщины 24...64 мм), 2188 мест сварных соединений ЭЛС (толщины 18...64 мм), основным дефектом в металле шва являются поры, за исключением СПВЭ, где основным дефектом являются вольфрамовые включения.

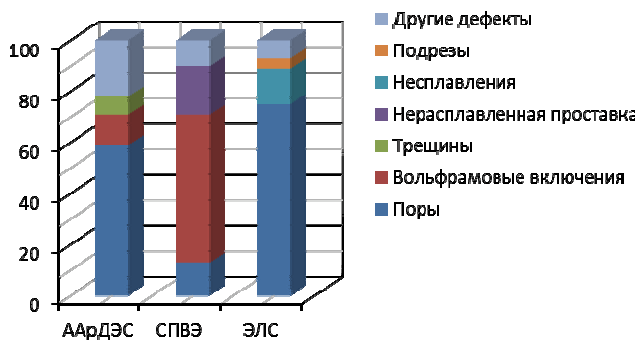


Рис. 1. Гистограмма количественного распределения основных внутренних дефектов в % от общего числа дефектов. Общий процент брака для каждого вида сварки составлял не более 1 % от общего количества проверенных мест

Существует множество версий о вероятном источнике пор и механизме их образования [1], но наиболее достоверной гипотезой, теоретически и практически неоднократно подтверждаемой, является теория В.В. Редчица и Г.Д. Никифорова.

Известно [1, 2], что по природе формирования кромок раздела виды раскроя можно подразделить на формирование рельефа кромки: I – разрушением, II – травлением; III – плавлением.

Сравнительные исследования химического состава и газонасыщения поверхности и сердцевины заготовки показали, что все виды раскроя приводят к изменению химического состава и газонасыщения поверхности по сравнению с основным металлом. Минимальные изменения наблюдаются при ГЛР заготовок в среде азота и аргона (допустимые требованиям ТУ).

Формирование поверхностного слоя образцов определяется операциями технологического цикла их изготовления. При этом формируется определенный, свойственный каждому методу обработки, макро-, микро-, субмикрорельеф обработанной поверхности, характеризующийся стандартными параметрами поверхности. Основными являются высотные характеристики и среди них наиболее предпочтителен параметр Ra, т.к. для его определения используется большое число точек реального профиля. Кроме того, параметр шероховатости (Ra, Rz) не в полной мере характеризует качество сформированной поверхности раздела, необходимо учитывать глубину разрыхленного слоя с образованием в нем макро-, микро- и субмикротрещин и глубину растравливания, особенно по границам зерен. Помимо адсорбционного процесса веществ, во множестве капиллярных углублений и полостей шероховатой поверхности может протекать процесс капиллярной конденсации влаги. Вероятность капиллярной

Бахматов П. В.

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТЫКУЕМЫХ КРОМОК НА МЕХАНИЗМ ПОРООБРАЗОВАНИЯ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

конденсации влаги увеличивается с уменьшением температуры конденсации, и она особенно велика при переносе охлажденных деталей в теплую среду.

Дефектность поверхностного слоя образцов оказывает существенное влияние на конденсацию влаги, определяемую анализом содержания водорода в поверхностном слое в сравнении с содержанием водорода в металле. Максимальное содержание водорода, более 0,05 % в поверхностном слое, причем независимо от дефектности после внесения холодных образцов в тепло.

Выдержка образцов в атмосферных условиях приводит к испарению конденсированной влаги с поверхности, причем, чем дефектнее поверхность образца, тем медленнее испарение конденсированной влаги с поверхности, тем большее содержание водорода в поверхностном слое.

Обезвоживание поверхности образцов спиртом позволяет полностью удалить поверхностно конденсированную влагу только для бездефектных образцов, у которых содержание водорода с поверхности при этом становится одинаково с содержанием водорода в металле. Разница в содержании водорода с поверхности и в сердцевине увеличивается с увеличением дефектности поверхностного слоя.

Учитывая факт [3], что удаление капиллярно-конденсированной влаги с дефектной поверхности представляет определенные сложности, с достаточной степенью точности можно утверждать, что разница в значениях содержания водорода в основном металле и в поверхностном слое объясняется наличием капиллярно-конденсированной влаги в дефектном слое, причем, чем дефектнее слой выше, тем больше в нем содержание водорода.

Максимальной активационной способностью к капиллярной конденсированной влаги обладает поверхность образцов, образованная разрушением – рубкой на гильотинных ножницах; травлением – электроэрозионной обработкой; плавлением – газопламенной резкой.

Процесс твердофазного взаимодействия соединяемых кромок перед фронтом расплавленной ванны представляет сложный многоступенчатый характер. Высокосконцентрированный источник электродугового разряда или электронного луча в доли секунды приводит к разогреву кромок до температуры, намного превышающей плавление металла. При этом происходит мгновенное тепловое расширение газов и металла, вызывающее поперечные сжимающие напряжения, превышающие предел текучести металла, перед фронтом расплавленной ванны.

Анализ сварочных деформаций по расчетной модели температурных полей при сварке тонких пластин встык из стали марки Ст3 позволяет выявить направление действия внутренних напряжений и оценить изменение геометрии деталей [4].

Расчетные данные остаточных деформаций удовлетворительно согласуются с данными экспериментальных исследований.

Как видно из данных рис. 2, в процессе сварки и особенно в процессе охлаждения наблюдается интенсивный процесс перемещения фиксированных точек, свидетельствующих о возникновении и распространении деформации пластин. Верхняя кривая отражает характер деформирования пластины от действия сжимающих напряжений в момент окончания сварки. При охлаждении наблюдается деформация пластины в результате перехода сжимающих напряжений в растягивающие. Максимальные значения пластических деформаций наблюдаются в центре пластины.

Происходит термически активируемый процесс микропластической деформации металла, интенсифицирующий образование физического контакта и выброс из зоны взаимодействия расширяющихся газов и в том числе поверхностно конденсированной влаги (зона автономной очистки), т.е. наблюдается процесс самоочищения стыкуемых поверхностей (см. рис. 3).

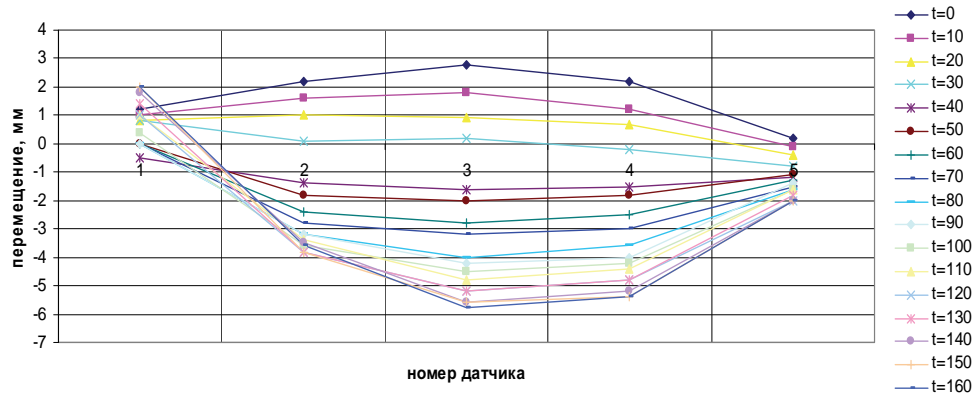


Рис. 2. Диаграмма кинетики деформаций при стыковой сварке

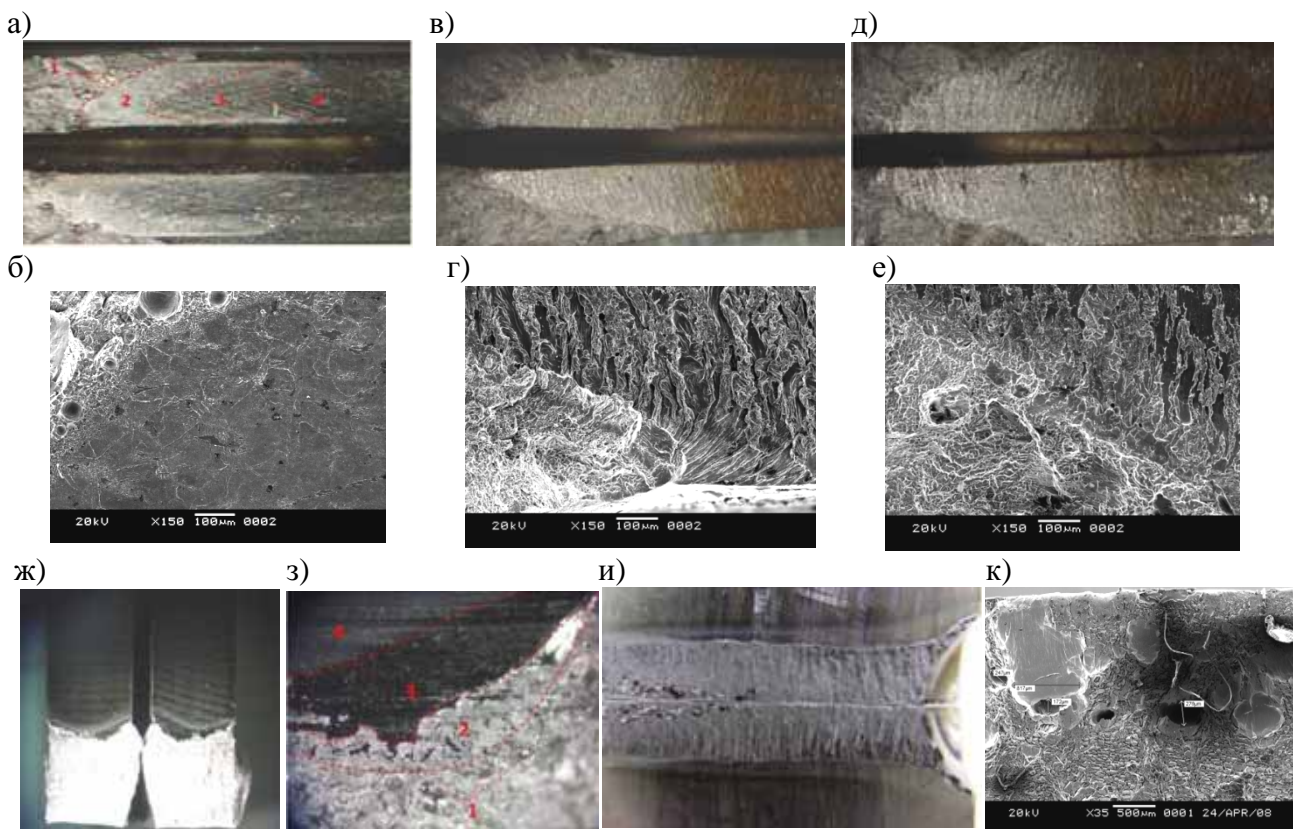


Рис. 3. Фрактограммы поверхности вскрытого излома перед фронтом расплавленной ванны сварных образцов из сплава ВТ20 после раскроя, обработки и сварки: фрезерование, обезвоживание спиртом, ААрДЭС – (а, б); ГЛР в азоте, ААрДЭС – (в, г); ГЛР в азоте + резка на гильотинных ножницах, ААрДЭС – (д, е); фрезерование, обезвоживание спиртом, ЭЛС – образцы толщиной 8 мм – (ж, з), образцы толщиной 30 мм – (и, к)

В зоне, приближающейся к расплавленной ванне, происходит активация контактных поверхностей, образование активных центров: происходит валентное межатомное взаимодействие, при котором между атомами соединяемых поверхностей образуются химические связи, т.е. наблюдается процесс схватывания. В дальнейшем наступает объемное взаимодействие, т.е. развитие взаимодействия происходит как в плоскости контакта (образование прочных химических связей), так и в объеме зоны контакта. Несомненно, рельеф поверхности, особенно высота выступов, будут влиять на формирование твердофазного соединения, т.е. на наличие возможного числа активных центров или их площади, и, в конечном счете, на формирование замкнутых полостей, заполненных капиллярно-конденсированной влагой.

Бахматов П. В.

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТЫКУЕМЫХ КРОМОК НА МЕХАНИЗМ ПОРООБРАЗОВАНИЯ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Замкнутые полости попадают в расплавленный металл, где происходит мгновенное испарение влаги и расширение газов, что вызывает формирование газовых пузырьков и, в конечном итоге, пор (см. рис. 3 а, з, (1)), удаление [4] которых зависит от их количества, размеров, времени всплытия и удаления из расплава, т.е. времени существования расплавленной ванны или пузырьковой дегазации ванны.

Перед фронтом расплавленной ванны (см. рис. 3) образуется не только зона диффузионной сварки (см. рис. 3 а, з, (2)), но и зона контактирования (см. рис. 3 а, з, (3)) (зона автономной очистки), ограниченная верхней и нижней кромками соединяемых деталей, имеющей выход в направлении сварки к обработанной поверхности (см. рис. 3 а, з, (4)), по которому происходит устранение продуктов диссоциации оксидно-нитридных пленок и загрязнений, за счет избыточного давления расширяющихся при нагреве продуктов, испарения поверхностно-конденсированной влаги. Удаление капиллярно-конденсированных загрязнений в этой зоне не происходит.

Технологические операции, образующие поверхность кромки разрушением в широком диапазоне, изменяют уровень дефектности: максимального количества пор раскрой на гильотинных ножницах – 14-25 %, минимальный уровень обкатка роликами – 0,01-0 %. Фрезерование на порядок уменьшает пористость в сварном шве заготовок, на два порядка пластическое деформирование фрезерованной поверхности обкаткой.

Технологические операции, образующие поверхность кромок травлением, характеризуются высоким уровнем дефектности, особенно электроэрозионное разделение (10-16 %).

Технологические операции, образующие поверхность кромок плавлением, несмотря на то, что параметры шероховатости Ra, Rz поверхности имеют высокие значения, приводят практически к нулевому значению уровня дефектности (см. рис. 4).

Высокая твердость и жаропрочность регулярно чередующихся кромок каналов заготовки после ГЛР по сравнению с ответной заготовкой, раскроенной на ножницах гильотинного типа, способствует их повторению на поверхности второй заготовки под действием сжимающих напряжений перед фронтом расплавленной ванны, что обеспечивает отсутствие порообразования.

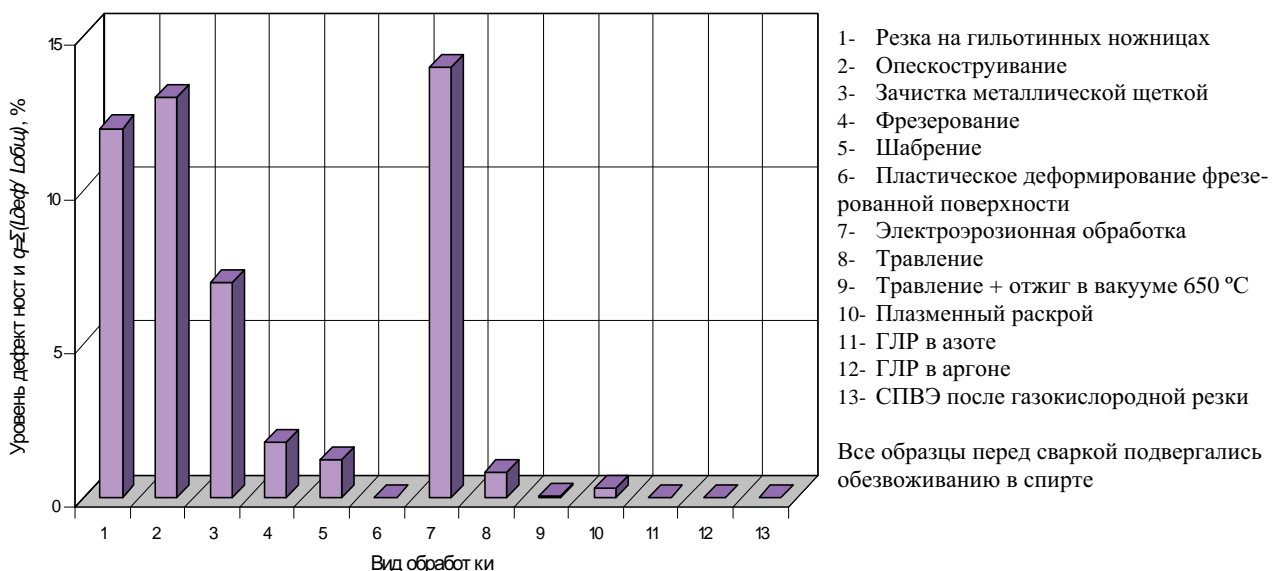


Рис. 4. Влияние операций раскроя заготовок и вида обработки после раскроя на распределение уровня дефектности

Наличие на поверхности присадочной проволоки дефектного слоя в виде макро-, микро- и субмикротрещин и задиров (надрывов), независимо от тщательности подготовки поверхности стыкуемых заготовок под сварку, в любом случае приведет к образованию пор.

Наибольшее газонасыщение наблюдается в сварном шве заготовок с грубой микрогеометрией и наибольшей деградацией поверхностного слоя.

В зоне сплавления сварного шва наблюдается наибольшее количество газовых примесей (O_2, H_2, N_2), наименьшее – в центре металла шва, что отвечает условиям порообразования, их содержание находится в допустимых пределах для данного сплава. Характер распределения примесей водорода для ЭЛС в металле шва ниже содержания водорода в основном металле, как в случае ААрДЭС.

Существенное влияние на порообразование оказывает процесс пузырьковой дегазации ванны. Существует некоторое пороговое значение толщины свариваемых заготовок, при котором происходит резкое снижение количества пор, что связано с временем существования расплавленной ванны, соизмеримым с временем пузырьковой дегазации. Однако чем дольше существует сварочная ванна, тем интенсивнее растет размер зерна металла шва, что приводит к снижению механических свойств.

Интенсификация процесса перемешивания расплавленного металла в сварочной ванне при сварке погруженным вольфрамовым электродом с тороидальной заточкой [5] позволяет получать беспористые швы на титановых заготовках, раскромоченных различными методами и даже газокислородной резкой.

Исследованиями механических свойств, химического состава и газонасыщения металла шва установлено, что химический состав, механические свойства для всех видов раскромки соответствуют требованиям нормативной документации, предъявляемым к деталям ответственного назначения.

Результаты исследований удовлетворительно согласуются с данными, полученными другими исследователями, и объясняются высокоэффективным саморафинированием металла шва в процессе сварки [6]. Таким образом, установлена принципиальная возможность получения качественного металла шва в соединении при СПВЭ по необработанным кромкам, подготовленным различными методами резки, особенно, после плазменной и гидроабразивной, а газокислородная резка может быть использована для СПВЭ деталей оснастки.

Выводы:

1. Все виды раскромки заготовок приводят не только к изменению химического состава и газонасыщению поверхности раздела, а и к формированию определенного, свойственного каждому методу обработки макро-, микро-, субмикрорельефу обработанной поверхности, характеризуемой стандартным параметром шероховатости, который не в полной мере пригоден для оценки качества сформированной поверхности раздела, поскольку не учитывает глубину разрыхленного слоя с образованием в нем макро-, микро-, субмикротрещин и глубину растравления по границам зерен.

2. Сформированная поверхность макро-, микрорельефа и глубина подповерхностного микро-, субмикродфектного слоя при изготовлении заготовок по разному влияют на адсорбционную способность загрязнений. Спектральный анализ содержания водорода в поверхностном слое позволяет с высокой степенью точность оценить, как поверхностную конденсацию, так и капиллярно-конденсированную влагу, при этом обнаруживается, что тем дефектнее поверхность заготовки, тем большее количество конденсированной влаги, тем большее содержание водорода. Обезвоживание поверхности заготовок спиртом позволяет удалять только поверхностно-конденсированную влагу, что особенно заметно для бездефектной поверхности заготовок. Максимальной активационной способностью к капиллярной конденсации влаги обладает поверхность заготовок образованная разрушением – рубкой на гильотинных ножницах; травлением – электроэрозионной обработкой; плавлением – газопламенной резкой.

3. Процесс твердофазного взаимодействия соединяемых кромок перед фронтом расплавленной ванны, термически активируемый концентрированными источниками энергии (ААрДЭС, СПВЭ, ЭЛС), идет в несколько стадий:

Бахматов П. В.

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТЫКУЕМЫХ КРОМОК НА МЕХАНИЗМ ПОРООБРАЗОВАНИЯ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

- мгновенный разогрев приводит к тепловому расширению газов и металла, вызывающий поперечные сжимающие напряжения, превышающие предел текучести металла и выброс из зоны взаимодействия расширяющих газов;

- термически активируемый процесс микропластической деформации и автономная очистка металла интенсифицируют образование физического контакта, наблюдается процесс схватывания;

- развитие твердофазного взаимодействия происходит как в плоскости контакта, так и в объеме зоны контакта, что приводит к формированию замкнутых полостей, заполненных капиллярно-конденсированной влагой, которые переходят в расплав и образуют поры.

4. Природа формирования структуры поверхностного слоя соединяемых кромок оказывает влияние на глубину разрыхленного поверхностного слоя, на интенсивность и экстенсивность адсорбционной способности загрязнений, и соответственно на термически активируемый процесс твердофазного взаимодействия перед фронтом расплавленной ванны и уровень дефектности (пористости) в сварном шве, который составляет от 0 до 25 % для поверхности, образованной разрушением (все виды механической обработки, максимальные значения для резки на гильотинных ножницах и минимальные пластическим деформированием фрезерованной поверхности) и поверхности, образованной травлением (максимальные значения для электроэрозионной обработки); нулевой уровень дефектности для поверхности образованной плавлением (исключение газопламенный раскрой).

5. Интенсификация процесса перемешивания расплавленного металла в сварочной ванне при СПВЭ с тороидальной формой позволяет получить беспористые швы со свойствами, идентичными свойствам основного металла на заготовках из титановых сплавов, раскрытых различными методами и даже газокислородной резкой.

6. Изменения дефектности поверхностного слоя заготовок от вида технологических операций раскроя и обработки и соответственно уровня дефектности (пористости) позволяют выбирать приемлемый метод для раскроя и обработки заготовок под сварку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пористость при сварке цветных металлов / В. В. Редчиц, В. А. Фролов, В. А. Казаков, В. И. Лукин. – М.: Издательский центр «Технология машиностроения», 2002. – 448 с.
2. Муравьев, В. И. Проблемы порообразования в сварных швах титановых сплавов / В. И. Муравьев // МиТОМ. – 2005. – № 7. – С. 30-37.
3. Матвеевко, Д. В. Исследование зависимости уровня дефектности шва и свойств сварных титановых конструкций от вида раскроя заготовок под сварку / Д. В. Матвеевко, В. И. Муравьев // Сварка и Диагностика. – 2011. – №1. – С. 26-30.
4. Муравьев, В. И. Расчет остаточных деформация по тепловым полям при сварке тонких пластин встык / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, А. А. Дебеляк // Сварочное производство. – 2012. – № 2. – С. 21-25.
5. Процессы упорядочения структурной неоднородности конструкционных материалов при изготовлении изделий / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, Б. И. Долотов, Р. А. Физулаков, А. В. Фролов // Ученые записки КнАГТУ. – 2011. – № I-1(5). – С. 43-54.
6. Долотов, Б. И. Поведение вольфрамовых электродов при сварке на форсированных режимах / Б. И. Долотов, П. В. Бахматов, А. А. Дебеляк // Прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в машиностроении: сб. ст. – Вып. 3. – Ч. 2. – Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН, 2009. – С. 102-106.



**Куделько А. Р., Марьин Б. Н., Лиманкин В. В., Марьин С. Б., Шпилев А.М.,
Быченко В. Н., Шпорт В. И.**
**A. R. Kudelko, B. N. Maryin, V. V. Limankin, S. B. Maryin, A. M. Shpilev,
V. N. Bychenko, V. I. Shport**

**СОЗДАНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БАЗОВОЙ КАФЕДРЫ
ВУЗА НА ПРЕДПРИЯТИИ КАК ОДИН ИЗ ФАКТОРОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

**SETTING UP AND SUPPORTING A UNIVERSITY'S PRIMARY DEPARTMENTS
AT PRODUCTION PLANTS AS ONE OF THE FACTORS OF PRODUCTION PROCESS
ENHANCEMENT**

Куделько Анатолий Романович – кандидат технических наук, профессор, первый проректор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: prorektor-1@knastu.ru.

Mr. Anatoly R. Kudelko – Ph.D. in Engineering, Professor, First Vice-Rector, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kef@knastu.ru;

Марьин Борис Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: maryinsb@mail.ru.

Mr. Boris N. Maryin – Doctor of Engineering, Professor of the Department of Foundry Industrial Machinery/Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: maryinsb@mail.ru.

Лиманкин Владимир Васильевич – доцент, генеральный директор УО ООО «Сибирско-Амурский металл» (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: amurmetal@amurmetal.ru.

Mr. Vladimir V. Limankin – Associate Professor, Director General of ООО «Sibirsko-Amursky Metall» (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: amurmetal@amurmetal.ru.

Марьин Сергей Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: maryinsb@mail.ru.

Mr. Sergey B. Maryin – PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Foundry Industrial Machinery/Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: maryinsb@mail.ru.

Шпилев Анатолий Михайлович – доктор технических наук, профессор, ректор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: rector@knastu.ru.

Mr. Anatoly M. Shpilev – Doctor of Engineering, Professor, Rector of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: rector@knastu.ru.

Быченко Владимир Николаевич – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: industry@adm.khv.

Mr. Vladimir N. Bychenko – PhD Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: industry@adm.khv.

Шпорт Вячеслав Иванович – доктор технических наук, профессор, научный руководитель сети базовых кафедр на Дальнем Востоке, (Россия, Хабаровск). E-mail: main@adm.khv.ru.

Mr. Vyacheslav I. Shport – Doctor of Engineering, Professor, Academic Supervisor of a network of primary university departments in the Far East of Russia (Russia, Khabarovsk). E-mail: main@adm.khv.ru.

Куделько А. Р., Марьин Б. Н., Лиманкин В. В., Марьин С. Б., Шпилев А.М., Быченко В. Н., Шпорт В. И. СОЗДАНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БАЗОВОЙ КАФЕДРЫ ВУЗА НА ПРЕДПРИЯТИИ КАК ОДИН ИЗ ФАКТОРОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Аннотация. На базовых кафедрах Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, созданных на ряде ведущих предприятиях города, разработаны мероприятия по комплексной интенсификации технологических процессов обработки металлов давлением (ОМД).

Summary. Primary departments of Komsomolsk-on-Amur State Technical University that were set up at several leading production plants of the city have developed and proposed measures for comprehensive enhancement of production processes of metal forming.

Ключевые слова: базовые кафедры, комплексная интенсификация, технологические процессы, обработка металлов давлением.

Key words: primary departments, comprehensive enhancement, production processes, metal forming.

УДК 621.7

Переход с 2011 г. на уровневую систему высшего профессионального образования с реализацией требований федеральных государственных образовательных стандартов к структуре, содержанию, условиям реализации и результатам подготовки выпускников вуза, определяет необходимость совершенствования и развития сферы, форм и технологий участия работодателей в подготовке студентов, совместной деятельности вуза с хозяйствующими субъектами экономики, бизнеса, научной и социально-культурной сфер региона.

Одним из путей разрешения представленных проблем является создание и обеспечение функционирования базовых кафедр вуза на предприятиях, в организациях, учреждениях – потенциальных работодателей будущих выпускников вуза.

Так, первый опыт функционирования базовых кафедр Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (КнАГТУ) «Технология обработки металлов давлением металлургических и машиностроительных предприятий» и «Комплексное кадровое обеспечение металлургического предприятия», созданных в 2011 г. на базе соответственно ООО «Спецстройиндустрия. Металлургический завод по изготовлению художественных изделий из металла» и ОАО «Амурметалл» г. Комсомольск-на-Амуре, показал, что в рамках совместной деятельности университета и предприятия в структуре базовой кафедры целесообразна реализация следующих компонентов научно-образовательного процесса:

- согласование и целесообразная корректировка структуры и содержания дисциплин, курсов, модулей профессионального и других циклов, всех видов практик образовательных программ;
- определение, формирование технологий и условий реализации и реализация на базовой кафедре (на предприятии) отдельных компонентов учебного плана, связанных, прежде всего, с практической подготовкой студентов: практические занятия, лабораторные практикумы и их фрагменты по ряду дисциплин профессионального цикла;
- формирование и реализация тематики курсового и дипломного проектирования, научно-исследовательской работы студентов, ориентированной на разрешение проблемных, узких мест предприятий;
- обучение рабочим профессиям по профилю основной образовательной программы студентов первого и второго курсов;
- стажировка преподавателей КнАГТУ на предприятиях, в том числе с целью согласования и подготовки и реализации перечисленных выше направлений совместной деятельности;
- подготовка и издание учебных пособий и учебно-методической документации, необходимой для реализации образовательного процесса на базовой кафедре;
- чтение постановочных, проблемных, обзорных лекций по отдельным дисциплинам профессионального цикла ведущими специалистами предприятий;

- проведение совместных прикладных научно-исследовательских работ и разработок, направленных на разрешение существующих, выявленных проблем, на интенсификацию реализуемых на предприятии технологических процессов.

При этом следует отметить, что в части последнего компонента перечисленных направлений совместной деятельности КНАГТУ и предприятий достигнуты представленные ниже отдельные результаты совместной научно-исследовательской деятельности.

К ним относятся:

1. Исследования по перспективам использования энергии расширения льда при деформировании заготовок.

В работе [1] рассмотрена возможность:

- создания наполнителя, состоящего из воды и демпфирующих элементов, при замораживании которого его объемное расширение не приводило бы к формоизменению трубы до начала ее гибки;

- возможность использования энергии расширения льда для формоизменения заготовок.

С этой целью были проведены эксперименты с трубными заготовками из сплава Д16, диаметрами 28 и 45 мм и толщиной стенки 1,5 мм, которые заполняли разными наполнителями и затем заключали в бандаж в подводном положении. Между бандажом и концами трубы устанавливались прокладки для устранения возможной течи наполнителя из-за негерметичности сборки. Конструкция экспериментальной установки показана на рис.1.



Рис. 1. Экспериментальная установка

В работе также исследовали возможность использования энергии расширения льда при его охлаждении для формирования листовых заготовок.

Эта технология также относится к энерго- и ресурсосберегающим, так как для ее осуществления не требуется затрат электроэнергии, дорогостоящего оборудования и сложной оснастки, а только использование природной энергии расширения льда за счет естественных низких температур. С помощью этой технологии относительно просто можно изготавливать детали самых разнообразных форм и размеров. Такой метод обработки металлов давлением наиболее успешно может применяться в регионах с холодным климатом.

Для исследования возможностей предлагаемой технологии была изготовлена технологическая оснастка (см. рис. 2), которую можно использовать для получения деталей из листовых заготовок.



Рис. 2. Технологическая оснастка для деформирования льдом листовых заготовок



Рис. 3. Опытный образец, изготовленный по разработанной технологии.

Работоспособность нового подхода продемонстрирована на рис. 3, где представлен результат деформирования листовой заготовки с помощью предложенной технологии.

Выполненная работа показала целесообразность дальнейших экспериментально-теоретических исследований для разработки энерго- и ресурсосберегающих технологий формоизменения заготовок в машиностроении.

2. Исследования изменения структуры листовых заготовок из стали марки 10ХСНД с жаростойким покрытием при их прокатке.

При прокатке листовых заготовок, осуществляемой при высоких температурах и степенях пластической деформации, образуется окалина, которая ухудшает качество и товарный вид обработанной поверхности. Существуют различные способы устранения образования окалины при нагреве исходной заготовки и удаления самой окалины после нагрева [2], в том числе нанесение жаростойких покрытий, в частности алюминия методом электродуговой металлизации.

Разработана методика исследования, и полученные результаты позволили получить характер распределения параметра организационной структуры Q_c , показанный на рис. 4.

На рис. 5 приведены кривые распределения параметра организации структуры Q_c после горячей прокатки образцов без покрытия (кривая 1) и с коррозионно-защитным алюминиевым покрытием (кривые 2, 3, 4). Видно, что наличие на поверхности самого покрытия ощутимо проявляется на микроструктуре материала, а это, в свою очередь, приводит к изменению характера распределения показателя Q_c .

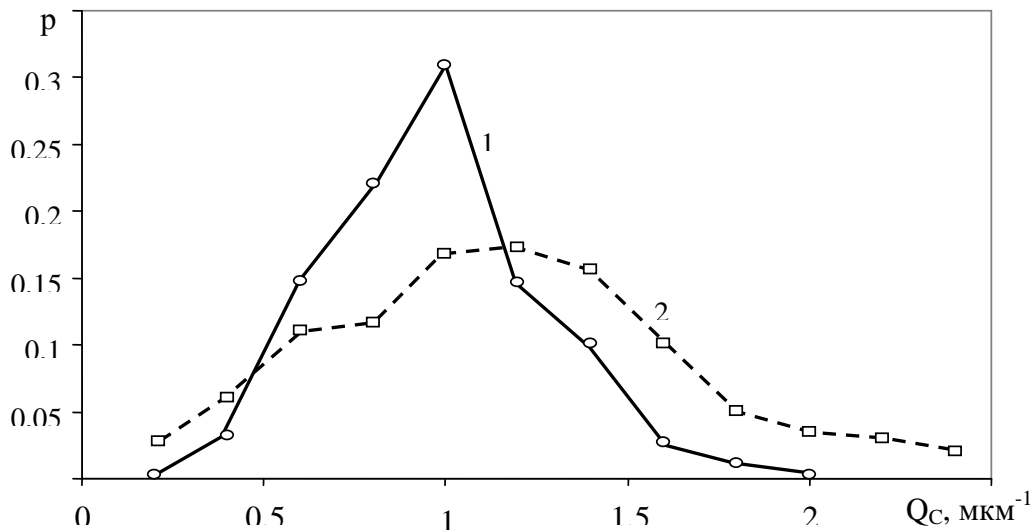


Рис. 4. Распределение параметра организации структуры:
1 – в исходном состоянии; 2 – после горячей прокатки

Защитные жаростойкие покрытия, применяемые при горячей прокатке, не только снижают активность окалинообразования, но и влияют на характер контактного взаимодействия заготовки с валками. Установлено, что разрушение защитного покрытия при прокатке приводит к образованию мелкодисперсных частиц, которые во фрикционном процессе между деформируемым материалом и валком проявляют себя как твердая смазка, снижая коэффициент трения и стимулируя формирование более равновесной микроструктуры материала после прокатки.

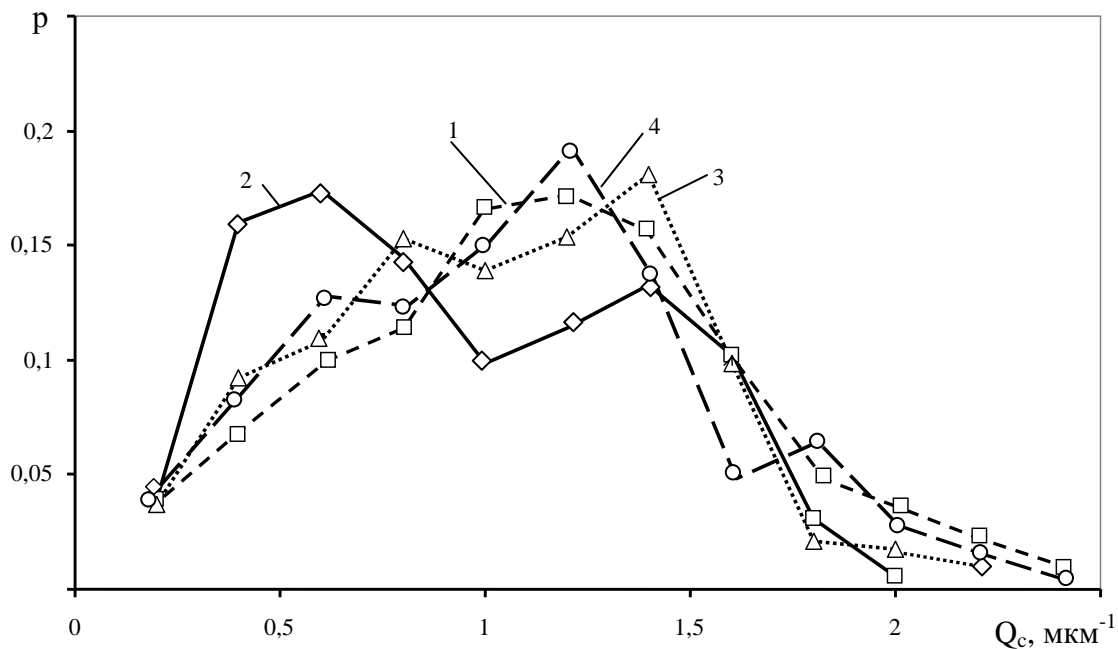


Рис. 5. Распределение параметра организации структуры Q_c после прокатки:
1 – без покрытия; 2 – алюминиевое покрытие, очистка эпиламом; 3 – алюминиевое покрытие, очистка ацетоном; 4 – алюминиевое покрытие, очистка этиловым спиртом

3. Исследования по термической интенсификации технологии производства арматуры для железобетонных изделий [3].

Значение металлургии в развитии промышленности, и строительства в частности, огромно. Особенно это актуально там, где применяется большое количество железобетонных изделий. Железобетон является основным конструкционным материалом в капитальном строительстве, при этом ежегодное потребление арматурной стали и закладных деталей достигает десятков миллионов тонн, а удельный расход металла на 1 м³ железобетона составляет в среднем 70 кг. Используемый в железобетонных изделиях металл практически не возвращается в виде лома и поэтому не подлежит возврату в производство из металлофонда страны. В связи с этим необходимо экономно расходовать сталь за счет увеличения её прочности. Особенно эффективно использование арматурных сталей в изделиях, конструкциях и сооружениях из предварительно напряженного железобетона, получающих все более широкое применение. Так, применение упрочненной арматуры и проволоки с прочностью 600 – 1300 МПа за счет повышения расчетных сопротивлений позволяет снизить расход металла на 20 – 55 %.

При этом для ускоренного охлаждения раскатов в потоке прокатного стана применяют устройства, позволяющие регулировать скорость охлаждения в широких пределах: душирующие установки, форсунки, щелевые охладители, спрейеры и т.п. Для сортовой прокатки наиболее целесообразным является применение спрейеров (см. рис. 6).

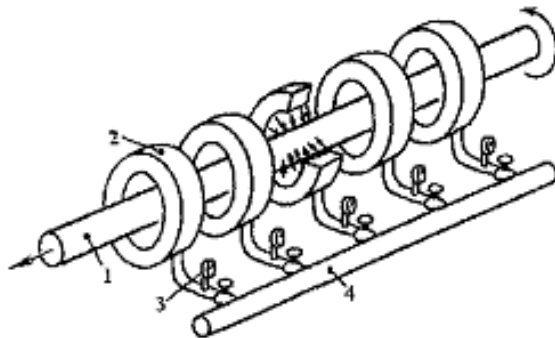


Рис. 6. Секционный спрейер:

- 1 – охлаждаемое изделие; 2 – секция спрейера;
3 – манометр; 4 – магистральный водопровод

Как правило, спрейер состоит из нескольких секций. На внутренней поверхности секции находятся форсунки, через которые под давлением подается вода. Меняя число задействованных секций и давление воды в подающей системе, можно регулировать скорость и температуру конца охлаждения. В последнее время широкое применение получили вращающиеся спрейеры, в которых каждая секция имеет вращающийся элемент с форсунками. Такое устройство обеспечивает большую равномерность охлаждения металла.

4. Исследования технологических методов обеспечения долговечности болтовых соединений.

Обеспечение высоких ресурсных показателей является одной из основных задач при создании современных пассажирских и транспортных самолетов. Отказы вследствие повреждений планера самолета в общей сумме отказов составляют 12 – 30 % [4]. Надежность и долговечность авиационных конструкций в значительной степени определяются усталостной прочностью наиболее ответственных деталей и элементов конструкции планера. В процессе эксплуатации разрушения возникают, главным образом, в местах возникновения очагов концентрации напряжений.

Основными конструктивно-технологическими параметрами, оказывающими влияние на ресурс болтовых соединений, являются:

- характер посадки болта в отверстие;
- упрочняющая обработка отверстий под болты;
- осевая стяжка пакета в результате свинчивания болтового соединения;
- точность и стабильность технологических процессов выполнения соединений.

Результаты испытаний образцов из алюминиевого сплава В95Т со свободными дорнированными отверстиями диаметром 8 мм показали, что дорнирование отверстий с натягом 3,0 – 3,5 % повышает долговечность образцов примерно в 3 – 5 раз.

Приведенные вышеуказанные экспериментальные исследования проводились на испытательной машине МИК40у (см. рис. 7) в лаборатории «Обработка металлов давлением» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета.



Рис. 7. Испытательная машина МИК40у

Достоинствами процесса дорнирования отверстий являются:

- снижение шероховатости поверхности отверстий;
- простота конструкции дорнов и, соответственно, их низкая стоимость;
- отсутствие влияния субъективного фактора на качество дорнированных отверстий.

К недостаткам процесса дорнирования отверстий следует отнести:

- отклонения диаметров отверстий после дорнирования из-за корсетности (не менее предельных отклонений по Н9);
- необходимость применения специализированного пневмогидравлического механизированного инструмента.

Также необходимо отметить и то, что в 2012 г. студент Маценко В.В. защитил дипломный проект на тему «Технология сортовой прокатки» с оценкой «отлично» и получил диплом инженера ОМД с отличием, а ряд специалистов с вышеуказанных предприятий учатся в аспирантуре КнАГТУ.

Для совершенствования и целесообразности дальнейшей совместной деятельности КнАГТУ и вышеуказанных предприятий необходимо в настоящее время изменить приоритеты в деятельности. В основу должна быть положена научно-техническая деятельность, кото-

Куделько А. Р., Марьин Б. Н., Лиманкин В. В., Марьин С. Б., Шпилев А.М., Быченко В. Н., Шпорт В. И. СОЗДАНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БАЗОВОЙ КАФЕДРЫ ВУЗА НА ПРЕДПРИЯТИИ КАК ОДИН ИЗ ФАКТОРОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

рая была определена в ходе первого года совместной работы. Кроме того, первоочередным заданием должно быть обеспечение проведения совместных фундаментальных и прикладных НИР, адресная подготовка высококвалифицированных специалистов и специалистов высшей квалификации и их мониторинг по согласованию с работодателем по соответствующим профилям деятельности металлургической промышленности и профориентационной работы в школах, лицеях, колледжах и техникумах г. Комсомольска-на-Амуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перспективы использования энергии расширения льда при деформировании заготовок / В. М. Козин, Б. Н. Марьин, С. Б. Марьин, Н. А. Попова, О. А. Грачева, Jun Yao // *Металлургия машиностроения*. – 2011. – № 6. – С. 32-35.
2. Исследование изменения структуры листовых заготовок из стали 10ХСНД с жаростойким покрытием при их прокатке / В. А. Ким, Б. Н. Марьин, С. Б. Марьин, А. А. Шпилева, В. В. Сухоплюев // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2008. – № 3. – С. 13-16.
3. Интенсификация технологии производства арматуры для железобетонных изделий / В. В. Лиманкин, Б. Н. Марьин, В. А. Ким, С. Б. Марьин, С. А. Хохлов // *Ученые записки КнАГТУ. Науки о природе и технике*. – 2011. - №2-1(6). – С. 71-75.
4. Марьин Б.Н., Сысоев О.Е., Быченко В.Н., Саблин П.А., Шпорт Р.В./ *Технологические методы обеспечения долговечности болтовых соединений*// *Ученые записки – КнАГТУ « Науки о природе и технике*. – 2012. – № 1-1(9). – С. 57-64.
5. Пат. 95571. Штамп для формовки листовых заготовок / Марьин Б. Н., Шпорт В. И., Евстигнеев А. И., Быченко В. Н., Волков К. В., Марьин С. Б.; заявл. 17.02.2010; опубл. 10.10.2010. Бюл. № 19.
6. Пат. РФ № 96801. Рабочее тело для передачи усилия при раздаче полых и трубчатых заготовок / Марьин С. Б., Марьин Б. Н., Козин В. М., Шпорт В. И.; заявл. 24.03.2010; опубл. 20.08.2010. Бюл. № 23.
7. Пат. РФ № 2339477. Способ гибки труб с наполнителем / Козин В. М., Одинокоев В. И., Тимашев С. А., Марьин Б. Н., Козин М. В.; заявл. 21.09.2006; опубл. 27.11.2008. Бюл. № 33.

Погорелова А. В., Козин В. М.
A. V. Pogorelova, V. M. Kozin

**ДВИЖЕНИЕ ТОНКОГО ТЕЛА ПОД ПЛАСТИНОЙ В ЖИДКОСТИ
КОНЕЧНОЙ ГЛУБИНЫ**

SLENDER BODY MOTION BELOW A PLATE IN A FINITE-DEPTH FLUID

Погорелова Александра Владимировна – старший научный сотрудник Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: milova@yandex.ru.

Alexandra V. Pogorelova – Senior Researcher, Institute for Machine Engineering and Metallurgy of the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: milova@yandex.ru

Козин Виктор Михайлович – профессор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kozinvictor@rambler.ru.

Victor M. Kozin – Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kozinvictor@rambler.ru

Аннотация. Работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованиям прямолинейного нестационарного движения тонкого твердого тела, погруженного в жидкость конечной глубины под плавающей ледяной пластиной. Получено хорошее согласование теоретических и экспериментальных результатов по максимальному прогибу пластины для различных глубин погружения тела, глубин водоема и скоростей движения.

Summary. The paper deals with the theoretical and experimental investigation of the straight unsteady motion of a slender solid body submerged into the liquid of finite depth below a floating ice plate. Good agreement between theoretical and experimental results regarding the values of the plate maximum deflections for various submergence depths, water depth and velocities is obtained.

Ключевые слова: погруженное тело, пластина Эйлера-Бернулли, вертикальное перемещение, изгибно-гравитационные волны.

Key words: submerged body; Euler-Bernoulli plate; vertical deflection; flexural-gravity waves.

УДК 532.59+539.3

Использование подводных судов в ледовых условиях может привести к необходимости их всплытия из-под льда. Для безопасного всплытия судна ледяной покров предварительно может быть разрушен или ослаблен трещинами, появляющимися вследствие возбуждения в нем изгибно-гравитационных волн при движении подводного судна вблизи поверхности раздела лед-вода. Возможность разрушения ледяного покрова посредством возбуждения изгибно-гравитационных волн от движущегося подводного судна была рассмотрена в работе [2] для бесконечно глубокой жидкости. Цель данной работы – проанализировать влияние глубины водоема на возможность разрушения ледяного покрова посредством движения субмарины вблизи поверхности раздела лед-вода.

Рассматривается бесконечная упругая пластина (толщиной h и плотностью ρ_1), плавающая на поверхности жидкости глубиной H . В жидкости на глубине d движется тонкое тело со скоростью $u(t)$. Совмещенная с телом система координат $Oxuz$ располагается следующим образом: плоскость xOy совпадает с невозмущенной поверхностью раздела лед-вода, ось x направлена вдоль движения тела, ось z – вертикально вверх. Предполагается, что жидкость несжимаема, плотность ρ_2 , движение жидкости потенциальное.

Предположим, что задача о движении тонкого почти осесимметричного тела под плавающей пластиной в жидкости конечной глубины может быть решена посредством замены тела системой источник-сток, ориентированной параллельно движению. Аналогично [2],

обтекание тонкого тела областью жидкости $-H < z < 0$, ограниченной свободной поверхностью $z = 0$ и дном водоема $z = -H$, мы рассмотрим посредством обтекания точечного источника мощности $q > 0$ в точке $(L_q, 0, -d)$, точечного стока мощности $-q < 0$ в точке $(-L_q, 0, -d)$, трех мнимых источников мощности $q > 0$ в точках $(L_q, 0, -2H+d)$, $(-L_q, 0, d)$ и $(-L_q, 0, -2H-d)$ и трех мнимых стоков мощности $-q < 0$ в точках $(-L_q, 0, -2H+d)$, $(L_q, 0, d)$ и $(L_q, 0, -2H-d)$ (рис. 1). Диаметр твердого тела приближенно равен $2R$, а его длина равна $2L$. Заметим, что, так как тело не осесимметричное, то R – характерный размер центрального сечения, и величина R вычисляется из уравнения $\pi R^2 = \Omega$, где Ω – площадь центрального поперечного сечения.

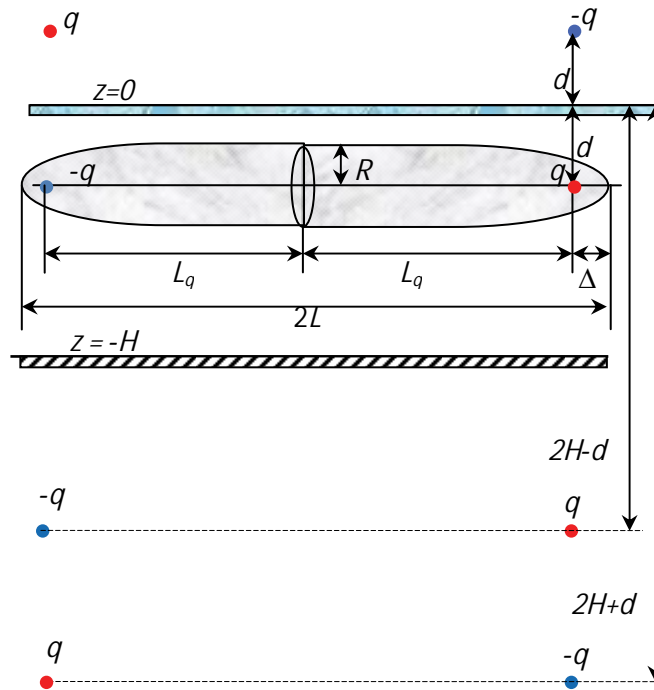


Рис. 1. Схема обтекания системы источник-сток равномерным потоком жидкости конечной глубины со свободной поверхностью

Введем безразмерные переменные: $\delta = \Delta / L$, $r = R / L$, $\chi = d / L$, $\gamma = H / L$. По аналогии с работой [3] для малых r можно получить следующие асимптотические разложения для значений q и δ :

$$q \approx \pi R^2 \left(1 + \frac{r^2}{2} (1 + C) + \dots \right), \quad \delta \approx \frac{r}{2} \left(1 + \frac{r^2}{4} \left(\frac{7}{8} + C + \frac{1}{8} B \right) + \dots \right), \quad (1)$$

$$C = -\frac{1}{(4\chi^2 + 1)^{3/2}} - \frac{1}{(4\gamma^2 + 1)^{3/2}} + \frac{1}{(4(\gamma - \chi)^2 + 1)^{3/2}},$$

$$B = \frac{1}{(\chi^2 + 1)^{3/2}} + \frac{1}{(\gamma^2 + 1)^{3/2}} - \frac{1}{((\gamma - \chi)^2 + 1)^{3/2}}.$$

Таким образом, получены формулы, с помощью которых можно по заданным характеристическим размерам тела (длине и площади поперечного сечения) вычислить мощность источника и стока и расстояние между ними при замене тонкого тела системой источник-сток.

Воспользуемся полученными ранее в работе [4] формулами для расчета прогиба плавающей пластины $\zeta(x, y, t)$ при движении источника в жидкости конечной глубины:

$$\zeta(x, y, t) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{\infty} \frac{\exp(-k\chi_0 + ik(x \cos \theta + y \sin \theta))}{1 + \varepsilon \eta^3 k^4} \times$$

$$\times \left[\exp(\sigma s) \left(\eta \rho \cos(\sqrt{\beta} t) \dot{u} \Big|_{t=0} + \int_0^t f_2(\tau) \cos(\sqrt{\beta}(t - \tau)) d\tau \right) + \eta \rho (\sigma u^2(t) - \dot{u}(t)) m \right] k dk, \quad (2)$$

$$f_2(k, \theta, \tau) = \exp(-\sigma s(\tau)) \left\{ \dot{u} (1 + \varepsilon \eta^3 k^4) m_1 + (\ddot{u} - 3u \dot{u} \sigma + u^3 \sigma^2) \eta \rho m \right\},$$

$$m = 1 + \exp(k\chi_0 - 2k\gamma_0) \sinh h(k\chi_0) \left(1 - \frac{1}{k\eta\rho} \right), \quad m_1 = 1 + \exp(k\chi_0 - 2k\gamma_0) \sinh(k\chi_0),$$

$$\gamma_0 = \frac{H}{L_0}, \quad \varepsilon = \frac{E}{12(1-\nu^2)\rho_2 g L_0}, \quad \rho = \frac{\rho_1}{\rho_2}, \quad \eta = \frac{h}{L_0}, \quad \sigma = ik \cos \theta,$$

$$\chi_0 = \frac{d}{L_0}, \quad \beta = \frac{(1 + \varepsilon \eta^3 k^4) k \tanh(k\gamma_0)}{1 + k\eta\rho \tanh(k\gamma_0)}$$

где $L_0 = \sqrt{g_0}$ – характерный масштаб для обезразмеривания задачи; ν – коэффициент Пуассона.

Используя формулы (1) и (2), можно теоретически рассчитать высоту прогиба ледяного покрова при движении под ним в жидкости конечной глубины тонкого почти осесимметричного тела по заданным размерам тела, его скорости движения, глубине водоема и глубине погружения.

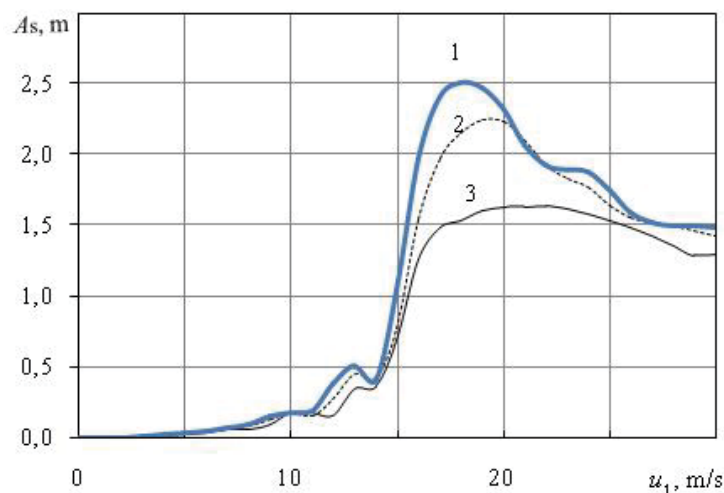


Рис. 2. Теоретически рассчитанные значения максимальной высоты волны при равномерном движении тонкого тела ($2L = 105$, $r = 1/9$) на глубине $d = 40$ м под ледяным покровом толщиной 1 м для разных глубин водоема: кривая 1 – $H = 55$ м; кривая 2 – $H = 65$ м; кривая 3 – $H = \infty$

Для апробации теоретических результатов были проведены экспериментальные исследования движения модели подводного судна (в масштабе 1/500) под неразрушаемым ледяным покровом в бассейне размерами $5,2 \times 1,8 \times 0,8$ м. В качестве ледяного покрова использовалась полимерная пластина с параметрами $h = 0,002$ м, $E = 10^7$ Н/м², $\rho_1 = 1200$ кг/м³, $\nu = 0,4$, которая при пересчете на натуру моделировала ледяную пластину толщиной 1 м с модулем Юнга $E = 5 \times 10^9$ Н/м². Для того чтобы полимерная пластина не тонула, она укладывалась на тонкую полиэтиленовую пленку. Модель подводного судна длиной $2L = 210$ см, соответствующая в масштабе 1/500 субмарине с водоизмещением 12 000 т, приводилась в движение динамометрической буксировочной системой. Скорость буксировки изменялась путем соответствующего изменения силы тока, подаваемого на электродвигатели, и измерялась секундомером. После разгона модель выходила на равномерное движение с заданной скоростью u_1 . Вертикальные перемещения пластины фиксировались бесконтактными инфра-

красными датчиками, подключенными к компьютеру. Параметры модельных изгибно-гравитационных волн пересчитывались на натурные значения в соответствии с методикой [1]. Анализировалось влияние заглубления и скорости модели на максимальные прогибы пластины.

Результаты расчета по формулам (1) и (2) максимальной высоты волны при равномерном движении тела со скоростью u_1 после начального ускорения представлены на рис. 2. Видно, что уменьшение глубины водоема приводит к росту высоты волны.

Результаты экспериментальных исследований, пересчитанные на натуру, показаны на рис. 3. Видно, что экспериментальные и теоретические результаты дают хорошее качественное совпадение.

Сравнение рис. 2 и рис. 3 позволяет сделать вывод, что максимальные значения высоты волны возможны только при движении судна со скоростями большими, чем u_{\min} – минимальная фазовая скорость распространения изгибно-гравитационных волн для глубокой воды $u_{\min} = 2(Dg^3/27\rho_2)^{1/8}$. При движении судна со скоростями меньшими, чем u_{\min} , высота волны прогиба настолько мала, что при экспериментальных модельных исследованиях ее очень сложно зафиксировать специальным оборудованием.

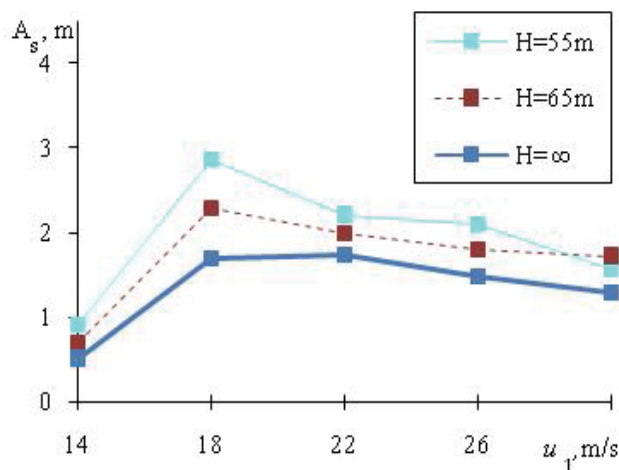


Рис. 3. Экспериментальные значения максимальной высоты волны при равномерном движении субмарины на глубине $d = 40$ м под ледяным покровом толщиной 1 м

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы: замена тонкого почти осесимметричного тела системой источник-сток позволяет рассчитать прогибы плавающей упругой пластины при движении субмарины в жидкости конечной глубины. Результаты численных расчетов с использованием полученных формул дают хорошее согласование с экспериментальными исследованиями движения модели подводного судна под неразрушаемым ледяным покровом (полимерной пластиной). Наибольшие прогибы пластины имеют место при движении тела со скоростью $u \geq u_{\min}$. Теоретически и экспериментально показано, что уменьшение глубины водоема приводит к увеличению высоты волны прогиба пластины, однако ввиду возникающей проблемы обеспечения безопасности движения судна подо льдом при малой глубине водоема данный результат на практике стоит применять с большой осторожностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козин, В. М. Моделирование изгибно-гравитационных волн в сплошном ледяном покрове / В. М. Козин // Теория и прочность ледокольного корабля. – Вып. 3. – Горький: Изд-во ГПИ, 1982. – С. 35-38.
2. Погорелова, А. В. Движение тонкого тела в жидкости под плавающей пластиной / А. В. Погорелова, В. М. Козин, В. Л. Земляк // ПМТФ. – 2012. – Т. 53. – № 1. – С. 32-44.
3. Pogorelova A.V., Kozin V.M. Unsteady motion of Submarine under an Ice Sheet / The Proceedings of The Twentieth (2010) International OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, ISOPE, Beijing, 2010. Vol. I, pp. 1285-1291.
4. Pogorelova A.V., Kozin V.M. Flexural-gravity waves due to unsteady motion of point source under a floating plate in fluid of finite depth. Journal of Hydrodynamics. 2010. Vol. 22, Is 5, supplement, pp. 71-76.

Тарануха Н. А., Худяков С. А.
N. A. Taranukha, S. A. Khudiakov

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ НЕУРАВНОВЕШЕННОСТИ СУДОВЫХ МАЛОБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

ADVISABLE CRITERIA FOR THE ESTIMATION OF UNBALANCE IN LOW-SPEED MARINE DIESEL ENGINES



Тарануха Николай Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой кораблестроения Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина 27; 8 (4217) 24-11-42. E-mail: taranukha@knastu.ru
Mr. Nikolay A. Taranukha – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Shipbuilding, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27 Lenin St, Komsomolsk-on-Amur, Russia; (4217) 24-11-42.
E-mail: taranukha@knastu.ru.



Худяков Сергей Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, профессор Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского (Россия, Владивосток); 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая 44, кв. 120; 8-924-239-55-51
Mr. Sergei A. Khudiakov – PhD in Engineering, Associate Professor, Professor, Admiral G.I.Nevelsky State Maritime University (Russia, Vladivostok); 44 Verhneportovaya St, Vladivostok, Russia; 8-924-239-5551.

Аннотация. Данная работа посвящена вопросам, связанным с оценкой вибрации судовых малооборотных дизелей. Рекомендуется использовать критерии неуравновешенности, разработанные на основе значений неуравновешенных моментов от сил инерции 1-го и 2-го порядков, а также гармонических составляющих опрокидывающего и горизонтального скручивающего моментов. При этом рассматриваются частоты включительно по главный порядок, равный числу цилиндров дизеля. Предлагаемые критерии учитывают нормы вибрации дизелей, регламентируемые Правилами Российского морского регистра судоходства.

Summary. The paper deals with the issue of estimating vibrations in low-speed marine diesel engines. It is recommended to use the unbalance criteria designed on the basis of the values of unstable moments of inertia forces of the first and second orders; and also the harmonic constituents of the disturbing and horizontal torsion moments. At the same time, the frequencies are considered inclusively up to the main order that is equal to the number of cylinders in a diesel engine. The proposed criteria allow to consider the norms of diesel vibration regulated by the Rules of the Russian Marine Register of Shipping Industry.

Ключевые слова: кораблестроение, малооборотные дизели, вибрация, неуравновешенность, рекомендуемые критерии оценки.

Key words: shipbuilding, low-speed diesel engines, vibration, unbalance, advisable estimation criteria.

УДК 539.3/4

Введение. Состояние проблемы

С целью оценки виброактивности дизелей по величинам неуравновешенных сил инерции или моментов от этих сил ряд исследователей предлагали ввести критерии неурав-

новешенности, за которые принимались амплитуды вынужденных колебаний остова дизеля под действием рассматриваемого усилия, приложенного к его центру масс [1].

Так, В. Я. Климов и Б. С. Стечкин предложили формулы, используя метод приведения, для определения амплитуд виброперемещений крайней точки остова под действием гармонической силы или момента [1]

$$A_p = \frac{P_v}{M \cdot v^2 \omega^2}; \quad A_m = \frac{L \cdot M_v}{2 \cdot \theta \cdot v^2 \cdot \omega^2}, \quad (1)$$

где A_p и A_m – амплитуды вынужденных колебаний от силы и момента;

M и θ – масса и осевой момент инерции остова дизеля, соответствующие плоскости действия возмущающего момента;

L – длина дизеля (для вертикального и горизонтального моментов);

H – высота дизеля (вводится вместо длины для опрокидывающего момента);

P_v и M_v – гармоническая сила или момент v -го порядка;

v – порядок возмущающего усилия;

ω – круговая частота вращения 1-го порядка.

Допускаемые значения критериев должны быть [1]

$$A_p = A_m \leq 0,10 - 0,15 \text{ мм.} \quad (2)$$

Данные критерии имеют размерность и неудобны при сравнении дизелей разной мощности. Они совершенно не согласуются с нормами вибрации МРС. К тому же они не учитывают совместность колебаний остова малооборотных дизелей (МОД) с судовыми корпусными конструкциями (значения масс и момента инерции системы ДД значительно больше, чем только дизеля). Также критерии не предполагают возможности возникновения резонансных колебаний системы ДД. По данным причинам рассматриваемые критерии неприемлемы для судовых МОД.

Безразмерные критерии А. М. Каца учитывают совместное воздействие усилий в продольном, вертикальном и поперечном направлениях и основаны на тех же предпосылках (только для усилий с частотами 1-го и 2-го порядков) [1]

$$\xi = [P_I + 0,25 \cdot P_{II} + \frac{6 \cdot L \cdot (M_I + 0,25 \cdot M_{II})}{L^2 + H^2}] / (M \cdot D \cdot \omega^2);$$

$$\eta = [P_r + \frac{6 \cdot L \cdot M_r}{L^2 + H^2}] / (M \cdot D \cdot \omega^2), \quad (3)$$

где D – диаметр поршня;

H – высота дизеля;

P_I , P_{II} и P_r – неуравновешенные силы инерции поступательно движущихся деталей 1-го, 2-го порядка и вращающихся масс;

M_I , M_{II} и M_r – неуравновешенные моменты от сил инерции 1-го и 2-го порядков.

Предлагалось значение данных критериев $\xi = \eta \leq 0,01$. Данные критерии учитывают только неуравновешенные усилия первых двух порядков дизелей и поэтому также неприемлемы для оценки неуравновешенных моментов с более высокими порядками, например гармонических составляющих горизонтального скручивающего момента M_x и опрокидывающего момента $M_{оп}$. Одновременно с этим учет совместного воздействия гармонических усилий с различными частотами не дает возможности оценить систему ДД с точки зрения возникновения резонансов (только на одной частоте). В них также не отражены действующие нормы вибрации дизелей, аналогично ранее рассмотренным размерным критериям.

Другой подход. Рекомендуемые критерии

В связи с перечисленными недостатками упомянутые выше критерии не применяются для судовых МОД, т.е. для оценки возмущающих вибрацию моментов в них с широким спектром частот с 1-го по главный порядок, равный числу цилиндров.

Поэтому автором [2; 3] разработаны и предложены для использования в двигателестроении и судостроении безразмерные критерии неуравновешенности для судовых МОД. В этом случае критерии применимы для оценки амплитудных значений гармонических составляющих любого порядка с учетом возможных резонансных явлений в колебаниях системы ДД. При этом используются допускаемые уровни вибрации остовов МОД по нормам РМРС 2010 г. как ускорения вынужденных колебаний дизеля. Таким образом, уровень вибрации дизеля даже в условиях резонанса не должен превышать допускаемых значений.

Предлагаемый критерий неуравновешенности МОД дает возможность на стадии проектирования судна оценить виброактивность устанавливаемого дизеля и в случае возможных резонансов (по 1-й, H или X -форме) предпринять соответствующие меры. Это могут быть меры по конструктивному изменению жесткости системы ДД. В необходимых случаях могут предприниматься меры, связанные с установкой дополнительных связей верхнего крепления остова с конструкциями корпуса судна, которые могут иметь нестандартные компенсирующие элементы [3; 8; 9].

Аналогично рассмотренным выше критериям, предлагаемый критерий основан на оценке вынужденных колебаний остова МОД (по виброускорениям) под действием возмущающего момента. С целью устранения размерности в качестве критерия используется относительное ускорение, которое определяется из выражения

$$V_m = \frac{a_v}{g} = \frac{M_v \cdot L}{2 \cdot \theta \cdot g}, \quad (4)$$

где V_m – критерий неуравновешенности по моменту;

M_v – неуравновешенный момент v -го порядка;

a_v – амплитуда виброускорения от действия неуравновешенного момента;

θ – момент инерции дизеля;

L – длина дизеля;

g – ускорение свободного падения.

Осевые моменты инерции дизеля определяются из выражений:

– для гармонической составляющей опрокидывающего момента (относительно оси X , при этом в формуле критерий L заменяется на H)

$$\theta_x = M \cdot (B^2 + H^2); \quad (5)$$

– для моментов от сил инерции 1-го и 2-го порядков (относительно оси Y)

$$\theta_y = M \cdot (L^2 + H^2); \quad (6)$$

– для гармонических составляющих горизонтального скручивающего момента (относительно оси Z)

$$\theta_z = M \cdot (B^2 + L^2), \quad (7)$$

где B – высота остова дизеля.

Допускаемые значения критериев определяются по допускаемым ускорениям по нормам МРС (с учетом возможных резонансов в системе ДД с коэффициентом динамичности

$\beta_R = 10,5$). Значение β_R определено по результатам натуральных экспериментов [3]. Тогда формула допускаемого значения критерия примет вид

$$[V_m] = \frac{[a_v]}{\beta_R \cdot g} = \frac{[a_v]}{10,5g}, \quad (8)$$

где $[a_v]$ – значение допускаемого виброускорения (по Правилам классификации и постройки морских судов, 2010 г., Т. 2, п. 9.3 «Нормы вибрации двигателей внутреннего сгорания»).

Для примера укажем, что на танкерах типа «Самотлор» был установлен дизель 6ДКРН74/160-3 в качестве главного, который имел резонанс Н-формы колебаний (возмущение от $M_{опб}$) в рабочем диапазоне частоты вращения. При этом амплитуды вибрации остова дизеля не превышали допускаемые значения, так как с постройки судна были установлены связи верхнего крепления остова [3; 5; 6].

В табл. 1, 2 и 3 приведены значения критериев неуровновешенности нескольких конкретных дизелей.

Таблица 1

Значения критериев неуровновешенности дизеля 6ДКРН74/160-3

Обозначение	Порядок	Частота, Гц	Момент, кН·м	$10V_m$	$10[V_m]$	$V_m/[V_m]$
M_I	1	2	0	0	0.05	0
M_{II}	2	4	748	0.57	0.18	3.16
M_Z	Z	12	402	0.73	1.20	0.60
M_{X2}	2	4	107	0.16	0.18	0.89
M_{X3}	3	6	571	0.88	0.41	1.50
M_{X4}	4	8	165	0.30	0.70	0.43
M_{X5}	5	10	14.3	0.03	1.00	0.03

Примечание. Отмечены моменты, для которых критерий превышает допускаемое значение (их необходимо учитывать при расчетах вибрации упругой системы ДД)

МОД типа 8ДКРН70/120-3 были установлены на судах типа «Варнемюнде» и имели резонанс Х-формы колебаний на номинальной частоте вращения. При этом амплитуды вибрации превышали нормы МРС и после установки жестких связей верхнего крепления были значительно снижены за счет повышения частоты свободных колебаний указанной формы [3; 5].

Таблица 2

Значения критериев неуровновешенности дизеля 8ДКРН70/120-3
(или К8Z70/120Е фирмы MAN)

Обозначение	Порядок	Частота, Гц	Момент, кН·м	$10V_m$	$10[V_m]$	$V_m/[V_m]$
M_I	1	2.333	460	0.50	0.06	8.33
M_{II}	2	4.667	0	0	0.24	0
M_Z	Z	18.670	154	0.52	1.88	0.27
M_{X2}	2	4.667	11.2	0.03	0.24	0.13
M_{X3}	3	7.000	152	0.25	0.55	0.38
M_{X4}	4	9.333	636	1.06	0.90	1.18
M_{X5}	5	11.670	151	0.31	1.23	0.26

Примечание. Отмечены моменты, для которых критерий превышает допускаемое значение (их необходимо учитывать при расчетах вибрации)

Таблица 3

Значения критериев неуравновешенности дизеля 6ДКРН60/195-7
(или 6L60MC фирмы MAN)

Обозначение	Порядок	Частота, Гц	Момент, кН·м	$10V_m$	$10[V_m]$	$V_m/[V_m]$
M_I	1	1.78	0	0	0.05	0
M_{II}	2	3.56	–	–	0.15	–
M_Z	Z	10.70	640	1.20	1.08	1.11
M_{X2}	2	3.56	163	0.27	0.15	1.80
M_{X3}	3	5.35	720	1.32	0.44	3.00
M_{X4}	4	7.12	221	0.44	0.67	0.66
M_{X5}	5	8.91	21	0.05	1.08	0.05

Примечание. Отмечены моменты, для которых критерий превышает допустимое значение (их необходимо учитывать при расчетах вибрации)

В табл. 1, 2 и 3 приведены критерии неуравновешенности трех моделей дизелей типа 6ДКРН74/160-3, 8ДКРН70/120-3 (K8Z70/120E фирмы MAN) и 6ДКРН60/195-7 (6L60MC фирмы MAN) по всем гармоническим составляющим моментов включительно по главный порядок, расчет которых был выполнен ранее [4; 5].

Поэтому с целью снижения виброактивности современных МОД (фирм MAN B&W типа LMC, SMC, SMC-C и фирмы Sulzer типа RTA, RTB, RT flex) принимаются следующие меры:

- устанавливаются компенсаторы неуравновешенного момента 2-го порядка (навесные на остовах или встроенные в остова);
- устанавливаются связи верхнего крепления остова МОД с конструкциями корпуса в поперечном направлении с целью снижения вибрации по H и X-формам колебаний (из-за значительного увеличения «остроты» индикаторных диаграмм и повышения гармонических составляющих $M_{оп}$ и M_X).

Конструкции связей верхнего крепления МОД, запатентованные разными фирмами и авторами, приведены в работе [3].

Допускаемые значения критерия неуравновешенности МОД (нормы вибрации судовых ДВС) приведены на рис. 1.

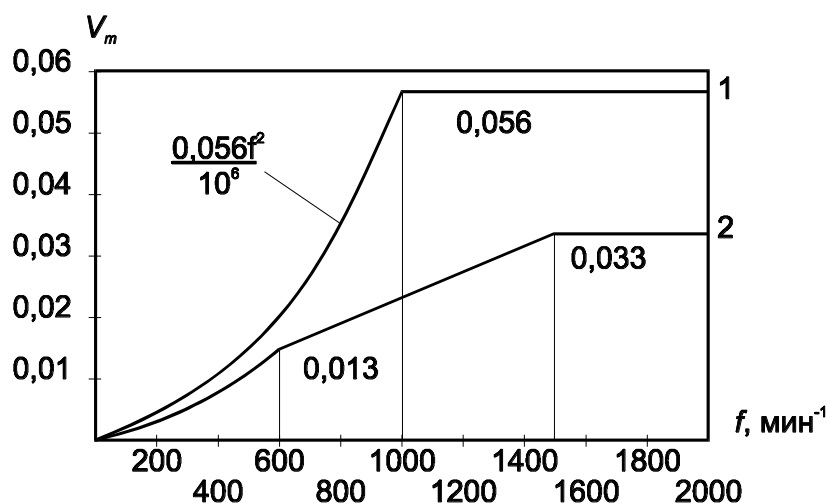


Рис. 1. Допускаемые значения предлагаемых критериев неуравновешенности МОД:
1 – критерий по Правилам РМРС 1985 г.; 2 – критерий по Правилам РМРС 2010 г.

Ужесточение норм вибрации дизелей с 1995 г. (то же в действующих Правилах издания 2010 г.) значительно снизило допускаемые значения критерия неуровновешенности, что отражается на требованиях к неуровновешенности дизелей.

Для удобства использования допускаемых значений критериев в разных диапазонах частот могут быть использованы следующие уравнения:

– в диапазоне частот от 0 до 10 Гц –

$$[V_m] = 1,32 \cdot (f^2 \cdot 10^{-4}); \quad (9)$$

– в диапазоне частот от 10 до 25 Гц –

$$[V_m] = 1,32 \cdot (f^2 \cdot 10^{-5}); \quad (10)$$

– выше частоты 25 Гц –

$$[V_m] = 0,033. \quad (11)$$

Заключение

В заключение следует отметить, что использование предлагаемых критериев неуровновешенности МОД дает возможность на стадии проектирования определить спектр гармонических составляющих неуровновешенных моментов с частотами от 1-го по главный порядок, равный числу цилиндров, и далее сопоставлять их с частотами свободных колебаний упругой системы «дизель-днище» [3, 5-7]. В случаях совпадения частот или незначительной их разницы следует разрабатывать меры по предотвращению повышенной вибрации системы конструктивными методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Истомин, П. А. Динамика судовых двигателей внутреннего сгорания / П. А. Истомин. – Л.: Судостроение, 1964. – 288 с.
2. Худяков, С. А. Критерии неуровновешенности судовых малооборотных дизелей / С. А. Худяков // Судостроение и судоремонт: межвуз. сб. – Владивосток, 1980. – С. 79-83.
3. Худяков, С. А. Практика решения проблем вибрации судовых дизелей: моногр. / С. А. Худяков. – Владивосток: Изд-во МГУ им. адм. Г. И. Невельского, 2006. – 172 с.
4. Худяков, С. А. Особенности вибрации судовых малооборотных дизелей / С. А. Худяков. – 1985. – 12 с. – Деп. в ЦНИИ «Румб», ДР-2221.
5. Худяков, С. А. Обеспечение вибростойкости механизмов, оборудования, корпусных конструкций в машинных отделениях теплоходов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Худяков, С. А. – Владивосток: ДВПИ, 1982. – 24 с.
6. Khoodiakov, S. A. Principles of Laying Down Limits of Elastic System Free Vibration Frequencies in Engine Rooms. – Proceedings ISC'2002. – St. Peterburg, 2002. – P. 143-150.
7. Тарануха, Н. А. Динамика упругих систем в машинных отделениях судов с главными малооборотными дизелями / Н. А. Тарануха, С. А. Худяков // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2012. – № 67 (351). – С. 161-168.
8. Тарануха, Н. А. Определение жесткостной характеристики нестандартизированного материала упругой связи динамической системы / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № IV-1(4). – С. 4-11.
9. Любушкина, Н. Н. Программно-информационное обеспечение задачи о колебаниях стержня с большими деформациями / Н. Н. Любушкина, А. Н. Петрова, Н. А. Тарануха // Информатика и системы управления. – 2007. – № 2 (14). – С. 30-39.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ
EARTH SCIENCES AND LIFE SAFETY

Степанова И. П., Гореликова Е. И., Степанов А. Н., Лещев Ю. Г.
I. P. Stepanova, E. I. Gorelikova, A. N. Stepanov, Yu. G. Leshchev

**АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ ВЫБРОСОВ ПРЕДПРИЯТИЯ
ЗА «ЦИКЛ ЖИЗНИ» И ПОСЛЕ ЗАКРЫТИЯ**

**AN ALGORITHM FOR ESTIMATION OF THE RISK OF EMISSIONS PRODUCED
BY AN ENTERPRISE DURING ITS LIFE CYCLE AND AFTER CLOSURE**

Степанова Ирина Павловна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Безопасность жизнедеятельности» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 8-914-179-29-10. E-mail: Prof.Stepanova@mail.ru.

Ms. Irina P. Stepanova – Doctor of Engineering, Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 8-914-179-29-10. E-mail: prof.stepanova@mail.ru

Степанов Анатолий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, декан электротехнического факультета Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

E-mail: Prof.Stepanova@mail.ru.

Mr. Anatoly N. Stepanov - PhD in Engineering, Associate Professor, Dean of the Electric Engineering Faculty, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Prof.Stepanova@mail.ru

Гореликова Евгения Игоревна – старший преподаватель Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: gorelikova_ei@mail.ru.

Ms. Evgeniya I. Gorelikova – Senior Lecturer, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: gorelikova_ei@mail.ru

Лещев Юрий Геральдович – старший преподаватель Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: luckkom@gmail.com.

Mr. Yuri G. Leshchev – Senior Lecturer, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: luckkom@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрен алгоритм оценки последствий выбросов загрязняющих веществ промышленными предприятиями за «цикл жизни» и после их закрытия на примере выбросов свинца предприятием по производству свинцовых аккумуляторных батарей ОАО «КнААЗ».

Summary. This paper considers an algorithm for estimating the effects of emissions of industrial enterprises during their lifecycle and after their closure, exemplified by a company producing lead-acid batteries – "KnAAZ."

Ключевые слова: опасные зоны, концентрация, канцерогенный риск, неканцерогенный риск, плотность потока вещества, повышенная нагрузка на подстилающую поверхность, опасность, длительность влияния.

Key words: dangerous areas, concentration, carcinogenic risk, non-carcinogenic risk, the flux density of matter, increased load on the underlying surface, risk, duration of effect

УДК 331.45

Введение. Современные оценки риска здоровью населения от некачественной окружающей среды основаны на определении дозы, сформированной с учетом прошлых, настоящих и будущих воздействий концентраций загрязняющих веществ [1].

В связи с этим возникает необходимость в учете влияния предприятия на окружающую среду за весь «цикл жизни» и оценке последствий его деятельности после закрытия. «Цикл жизни» – период времени от начала деятельности предприятия до его закрытия.

Особенно актуально решение подобной задачи для условий России, где предприятия и в советский, и в современный период вели свою деятельность, не слишком обременяя себя необходимостью соблюдения экологических требований, поэтому нет твердых гарантий, что воздействие предприятий не выходило за пределы границ санитарно-защитной зоны (СЗЗ).

Алгоритм оценки опасности. На рис. 1 показан алгоритм оценки опасности выбросов предприятия за «цикл жизни» и после его закрытия.

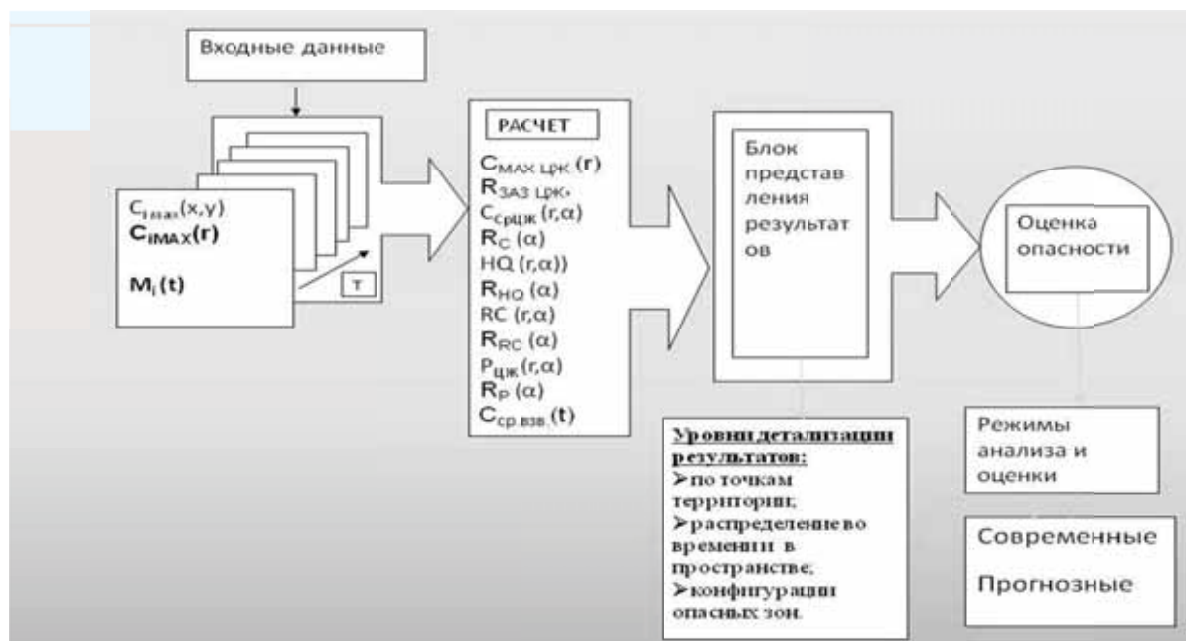


Рис. 1. Алгоритм оценки опасности выбросов загрязняющих веществ промышленным предприятием за «цикл жизни» и после его закрытия

Входными данными являются (см. рис. 1):

- совокупность поверхностей $C_{i\max}(x, y)$ распределения максимальных концентраций за каждый i -й год работы предприятий всего «цикла жизни» продолжительностью T лет (они могут быть получены, например, по данным проектов предельно допустимых выбросов (ПДВ));
- построенные на их основе кривые $C_{i\max}(r)$ с установлением начала координат в центре площадки предприятия;
- динамика валовых выбросов $M_i(t)$.

Параметры, подлежащие расчету (см. рис. 1).

1) *Среднемноголетний уровень максимальных концентраций за «цикл жизни»*

$$C_{\max\text{цж}}(r) = (\sum C_{i\max}(r)) / T,$$

где $C_{\max\text{цж}}(r)$ – кривая затухания среднемноголетних максимальных концентраций по мере удаления от центра площадки предприятия, принятого за точку отсчета, доли предельно-допустимой концентрации максимальной разовой (ПДК_{МР}); $C_{i\max}(r)$ – кривая затухания максимальных концентраций за каждый i -й год работы предприятия, доли ПДК_{МР} (ПДК_{МР} = 0,001 мг/м³); T – длительность цикла жизни предприятия, лет.

2) *Радиус зоны активного загрязнения по среднемноголетним данным* $R_{\text{ззз}\text{цж}}$, км. Под зоной активного загрязнения (ЗАЗ) будем понимать территорию, ограниченную изолинией 1 ПДК_{МР}. $R_{\text{ззз}\text{цж}}$ является корнем уравнения $C_{\max\text{цж}}(r) - 1 = 0$.

3) *Средняя концентрация с учетом розы ветров, доли предельно-допустимой концентрации среднесуточной* (ПДК_{СС}) (ПДК_{СС} = 0,0003 мг/м³)



$$C_{\text{ср.ЦЖ}}(r, \alpha) = k_{\alpha} C_{\text{МАХ ЦЖ}}(r) \times \text{ПДК}_{\text{МР}}/\text{ПДК}_{\text{СС}},$$

где $k_{\alpha}(\alpha)$ – азимутальный коэффициент, соответствующий розе ветров данной территории и показывающий долю времени в течение года ветров в указанном азимутальном направлении, о. е.; $\text{ПДК}_{\text{МР}} = 0,001 \text{ мг/м}^3$.

Для условий г. Комсомольска-на-Амуре роза ветров имеет вид, представленный в табл. 1.

Таблица 1

Роза ветров для г. Комсомольска-на-Амуре

Азимут	Ю	С	СВ	ЮВ	СЗ	В	ЮЗ	З
k_{α}	0,41	0,31	0,1	0,07	0,04	0,03	0,03	0,01

4) *Размеры опасных зон*, сформированных пересечением поверхности $C_{\text{ср.ЦЖ}}(r, \alpha)$ и плоскости $C = \text{ПДК}_{\text{СС}}$, $R_C(\alpha)$, км. В этой зоне нарушены критерии качества воздушной среды для населения, проживавшего в исследуемый период Т на загрязненной территории. $R_C(\alpha)$ являются корнями уравнений $C_{\text{ср.ЦЖ}}(r, \alpha) - 1 = 0$.

5) *Коэффициент опасности* ингаляционных неканцерогенных эффектов, доли RfC [1]:

$$HQ(r, \alpha) = C_{\text{ср.ЦЖ}}(r, \alpha) \times \text{ПДК}_{\text{СС}} / RfC,$$

где $HQ(r, \alpha)$ – коэффициент опасности, о. е.; $C_{\text{ср.ЦЖ}}(r, \alpha)$ – средняя концентрация за «цикл жизни» предприятия, доли $\text{ПДК}_{\text{СС}}$; RfC – референтная концентрация, мг/м^3 , $RfC = 0,0005 \text{ мг/м}^3$.

Коэффициент опасности (HQ) – отношение воздействующей дозы (концентрации) химического вещества к его безопасному (референтному) уровню воздействия.

6) *Размеры опасных зон*, сформированные пересечением поверхности $HQ(r, \alpha)$ и плоскости $HQ = 1$, $R_{HQ}(\alpha)$, км. В этой зоне коэффициент опасности ингаляционных неканцерогенных эффектов превышает безопасные уровни. У населения, проживавшего в исследуемый период Т на загрязненной территории, существует вероятность увеличения частоты заболеваний, обусловленных действием исследуемого вещества. $R_{HQ}(\alpha)$ являются корнями уравнений $HQ(r, \alpha) - 1 = 0$.

7) *Ингаляционный индивидуальный канцерогенный риск* [1]

$$RC(r, \alpha) = SF_i \times LADD(r, \alpha),$$

где $RC(r, \alpha)$ – ингаляционный индивидуальный канцерогенный риск; SF_i – фактор канцерогенного потенциала при ингаляционном действии, $(\text{мг/кг} \cdot \text{день})^{-1}$; $LADD(r, \alpha)$ – среднесуточная доза в течение жизни, $\text{мг/кг} \cdot \text{день}$.

«Индивидуальный риск – оценка вероятности развития неблагоприятного эффекта у экспонируемого индивидуума, например, риска развития рака у одного индивидуума из 1000 лиц, подвергавшихся воздействию. При оценке риска, как правило, оценивается число дополнительных по отношению к фону случаев нарушений состояния здоровья, т.к. большинство заболеваний, связанных с воздействием среды обитания, встречаются в популяции и при отсутствии анализируемого воздействия. Канцерогенный риск – вероятность развития злокачественных новообразований на протяжении всей жизни человека, обусловленная воздействием потенциального канцерогена. Канцерогенный риск представляет собой верхнюю доверительную границу дополнительного пожизненного риска»[1]. Ингаляционный риск означает, что рассматривается только один путь поступления вещества в организм человека (ингаляционный) и одна воздействующая среда (воздух).

$$LADD(r, \alpha) = C_{\text{ср.ЦЖ}}(r, \alpha) \times \text{ПДК}_{\text{СС}} \times CR \times EF \times ED / (BW \times AT \times 365),$$

где $C_{\text{ср.ЦЖ}}(r, \alpha) \times \text{ПДК}_{\text{СС}}$ – среднесуточная концентрация вещества в загрязненной среде, мг/м^3 ; CR – скорость поступления воздуха, $\text{м}^3/\text{день}$; EF – частота воздействия, день/год;

ED – продолжительность воздействия, лет; BW – масса тела человека, кг; AT – период усреднения экспозиции; 365 – число дней в году.

8) *Размеры опасных зон*, сформированные пересечением поверхности $RC(r, \alpha)$ и плоскости $RC = 10^{-6}$, $R_{RC}(\alpha)$, км. В этой зоне ингаляционный канцерогенный риск выше пренебрежимо мало. У населения, проживавшего в исследуемый период T на загрязненной территории, существует вероятность увеличения частоты онкозаболеваний, обусловленных действием исследуемого вещества. $R_{RC}(\alpha)$ определяются как корни уравнений $RC(r, \alpha) - 1 = 0$.

9) *Плотность потока вещества* $P_{ЦЖ}$ на подстилающую поверхность по среднемноголетним данным из-за ограниченности объема статьи будет рассмотрена в следующей публикации.

10) *Средневзвешенная концентрация для прогнозирования рисков* после закрытия завода

$$C_{\text{ср.взв.}} = \frac{C_{\text{ЗАЗ}} \cdot k \cdot \Delta + C_{\text{о.с.}} \cdot b}{k \cdot \Delta + b},$$

где $C_{\text{ср.взв.}}(t)$ – средневзвешенная концентрация свинца за исследуемый период, мг/м³; $C_{\text{ЗАЗ}}$ – среднемноголетняя концентрация свинца в ЗАЗ, мг/м³; k – номер точки, $k = 0, 1, 2, \dots, 6$ на оси времен; Δ – шаг по оси времен, лет; $C_{\text{о.с.}}$ – концентрация свинца после закрытия завода, мг/м³; b – период с момента закрытия завода до настоящего времени, лет.

Результаты исследования (на примере выбросов свинца заводом по производству свинцовых аккумуляторных батарей ОАО «КнААЗ» в г. Комсомольске-на-Амуре).

«Цикл жизни» ОАО «КнААЗ» – с 1942 по 2005 гг. ($T = 64$). Входные данные представлены Е. И. Гореликовой [2; 3]. В [6] показан переход от динамики концентрации в каждой точке исследуемой территории к средней за «цикл жизни» завода. В расчете учтена 8-румбовая ($k = 8$) роза ветров для г. Комсомольска-на-Амуре (см. табл. 1). В качестве карты-основы использовалась электронная карта г. Комсомольска-на-Амуре масштаба 1:10 000, разработанная ФГУ «ДВ АТП» в 2008 г. Привязка к местности проведена в программе «Экограф» на стадии формирования входных данных. Результаты расчета нанесены на карту с помощью программы «Corel draw». Обоснование возможности работы в такой программе, как одной из возможных версий ГИС-технологий, приведено в работах Ю. Г. Лещева [4; 5].

Исходную кривую $C_{\text{МАХ ЦЖ}}(r)$ можно интерполировать или аппроксимировать. Для практического использования более удобна аппроксимирующая функция. Аппроксимирующая исходную кривую $C_{\text{МАХ ЦЖ}}(r)/C_{\text{МАХ ЦЖ}}(R_1)$, представленную в относительных единицах, функция представляет собой кубический полином:

$$F(r) = a_1 \times r^{-1} + a_2 \times r^{-2} + a_3 \times r^{-3},$$

где $a_1 = 217,781$; $a_2 = 2,249 \cdot 10^4$; $a_3 = -2,49 \cdot 10^6$.

На рис. 2 построены исходная кривая $C_{\text{МАХ ЦЖ}}(r)$ в относительных единицах (кривая 1) и аппроксимирующей ее полином (кривая 2). За единицу принято наибольшее значение функции в первой расчетной точке $C_{\text{МАХ ЦЖ}}(R_1)$. Все рассматриваемые в настоящей работе параметры, характеризующие опасность предприятия за «цикл жизни», имеют такой же характер затухания.

Границы опасных областей для всех параметров по румбам ветров могут быть найдены как корни уравнения:

$$F_{aj}(r) - Kr_j = 0,$$

где j – вид параметра (C, HQ, CR, P); Kr_j – принятый для параметра j критерий безопасности.

На рис. 3 показан характер затухания средних концентраций свинца в долях ПДК_{СС} по мере удаления от предприятия по основным азимутальным направлениям. Нумерация кривых 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 соответствует азимутальным направлениям С, СВ, В, ЮВ, Ю, ЮЗ, З, СЗ.

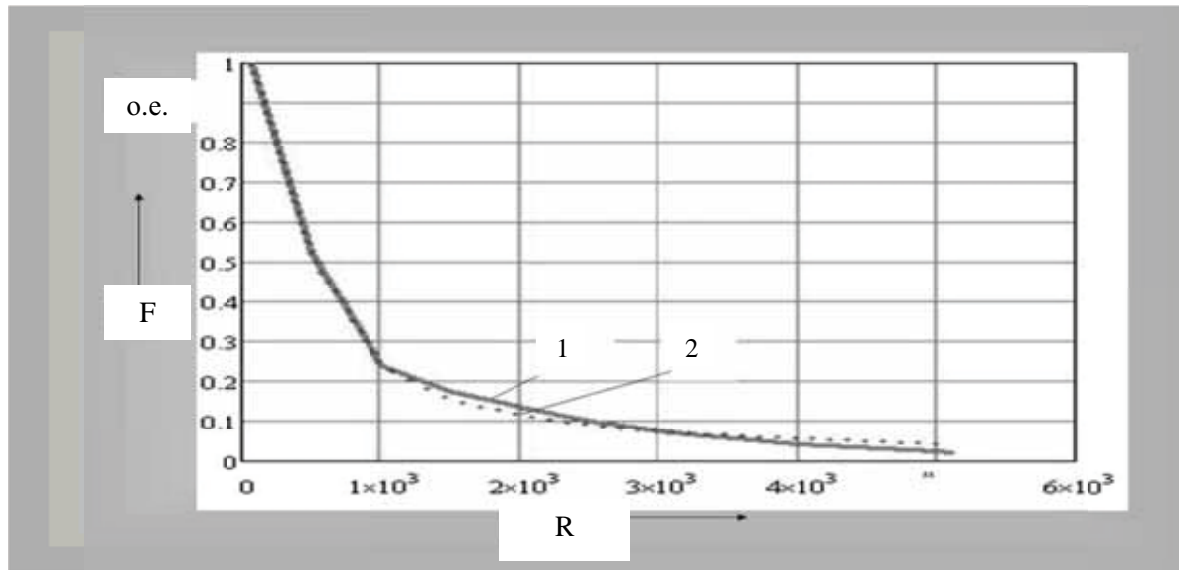


Рис. 2. Исходная кривая в относительных единицах (кривая 1) и аппроксимирующий ее кубический полином (кривая 2)

Сводные данные по границам опасных зон, сформированных выбросами свинца ОАО «КнААЗ» за 64 года представлены в табл. 2. На рис. 4 показано изменение размеров границ опасных зон в зависимости от азимута для средних концентраций свинца, сформированных за «цикл жизни» ОАО «КнААЗ». На рис. 5 проведено картографирование опасных зон.

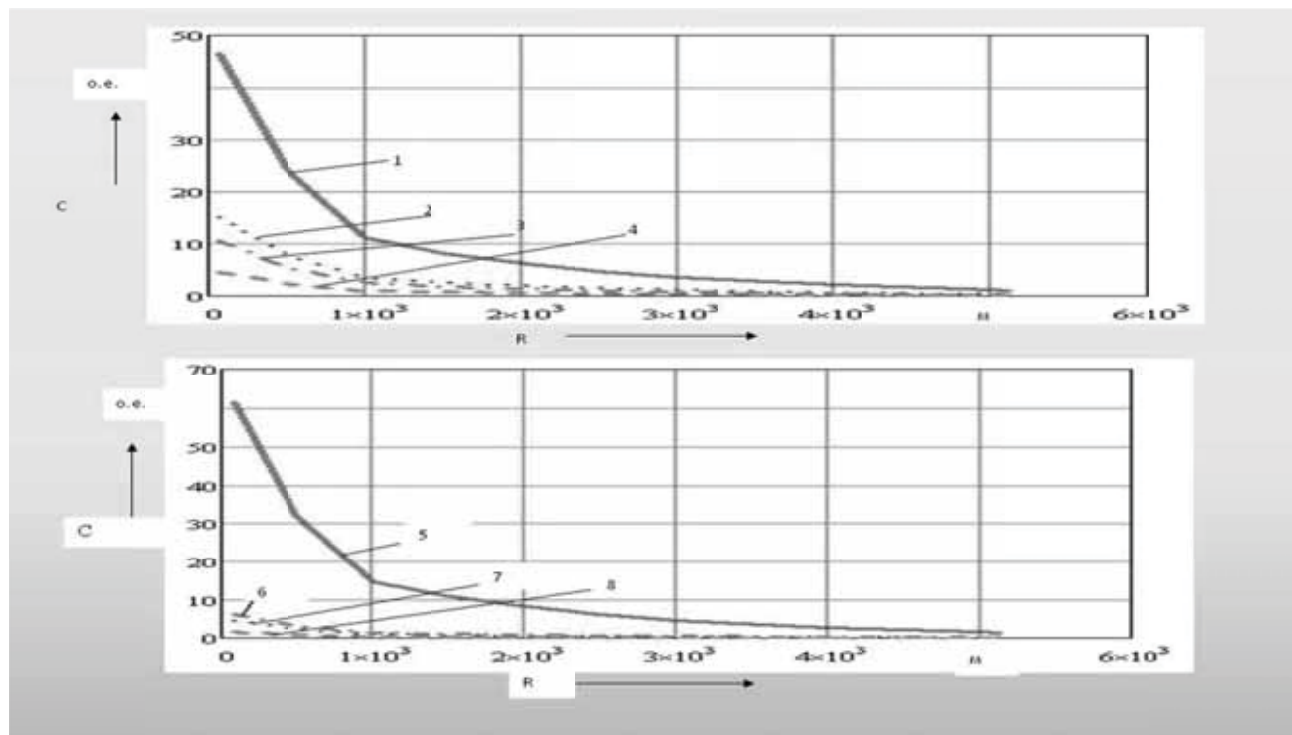


Рис. 3. Затухание средних концентраций свинца в долях ПДК_{сс}, сформированных за «цикл жизни» ОАО «КнААЗ», по основным азимутальным направлениям

Сводные данные по границам опасных областей $R_{Гр}$

Показатель опасности	Границы опасных областей по основным азимутальным направлениям							
	Ю	С	СВ	ЮВ	СЗ	В	ЮЗ	З
$RC \times 10^{-6} \geq 1$	8,5	7,9	5,0	4,1	3,1	2,7	2,7	0,9
$HQ \geq 1$	5,0	4,25	2,20	1,75	0,8	0,7	0,7	0,1
$C_{Ср. многол} / ПДК_{СС} \geq 1$	6,0	5,125	3,25	2,5	1,5	1,0	1,0	0,3
$C_{Ср. многол} / ПДК_{МР} \geq 1$	$R_{МАХ} = 5,125 \text{ м}$							

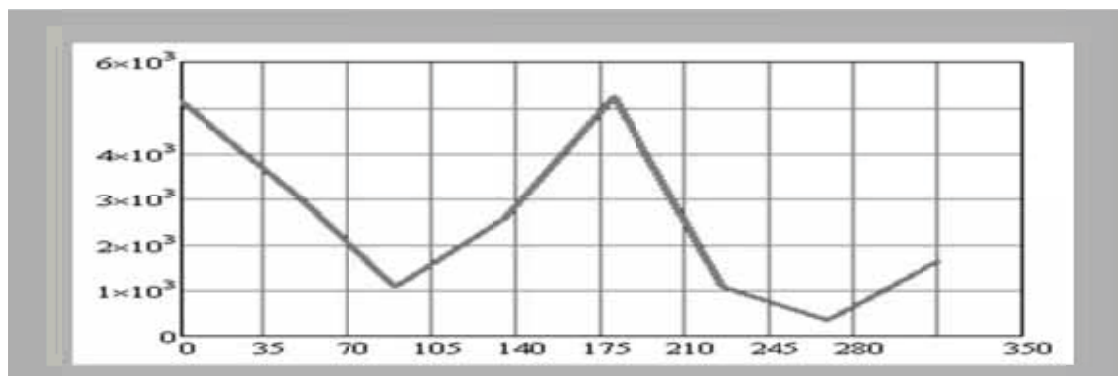


Рис. 4. Изменение размеров границ опасных зон в зависимости от азимута α , град, для средних концентраций свинца, сформированных за «цикл жизни» ОАО «КнААЗ», $R_C(\alpha)$, км ($\alpha = 0$ соответствует направлению на север, перебор азимутальных направлений по часовой стрелке)

Концентрации свинца. Среднегодулетний радиус зоны активного загрязнения $R_{ЗАЗ ЦЖ}$, ограниченной изолинией $C_{max} = ПДК_{МР}$ за 64 года менялся от 12 км (1990 г.) до 1 км (2002 г.) [2; 3] и по среднегодулетним данным составил 5,125 км. Он далеко выходит за минимальные размеры санитарно-защитной зоны в 0,5 км, рекомендованной СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов» для предприятий подобного типа. ЗАЗ описывает область вероятностей всех возможных ситуаций при изменении объемов производств, направлений и сил ветров в течение «цикла жизни» предприятия.

Наибольшие концентрации в ближайших точках жилья по среднегодулетним данным составили:

- с северной стороны – на расстоянии 300 м ($0,0102 \text{ мг/м}^3$ или 33 ПДК_{СС});
- с южной стороны – на расстоянии 500 м ($0,009635 \text{ мг/м}^3$ или 32 ПДК_{СС});
- с восточной стороны – на расстоянии 100 м ($0,00449 \text{ мг/м}^3$ или 15 ПДК_{СС});
- с северо-западной стороны – на расстоянии 75 м ($0,0018 \text{ мг/м}^3$ или 6 ПДК_{СС});
- с западной стороны – на расстоянии 50 м ($0,00045 \text{ мг/м}^3$ или 1,5 ПДК_{СС}).

Размеры территории с нарушенными критериями качества воздушной среды для населения, ограниченные изолинией $C_{Ср. ЦЖ} = ПДК_{СС}$, по среднегодулетним данным равны (см. табл. 2): в направлении на юг – 6 км; в направлении на север – 5,1 км; в направлении на запад – 1,5 км; в направлении на восток – 1 км.

Риски для здоровья. В [1] указано «наличие эпидемиологических критериев риска» от действия повышенных концентраций свинца, «т.е. зависимостей концентрация-ответ, полученных в эпидемиологических исследованиях». В зоне, представленной на рис. 5, а, у проживавших там групп населения может быть повышен риск появления таких *неканцерогенных эффектов*, как повышенная «концентрация свинца в крови плода, детей, мужчин,

женщин; снижение интеллекта у детей; неонатальная смертность; гипертензии; заболевания коронарных сосудов сердца; инсульт; преждевременная смерть вследствие гипертензии» [1].

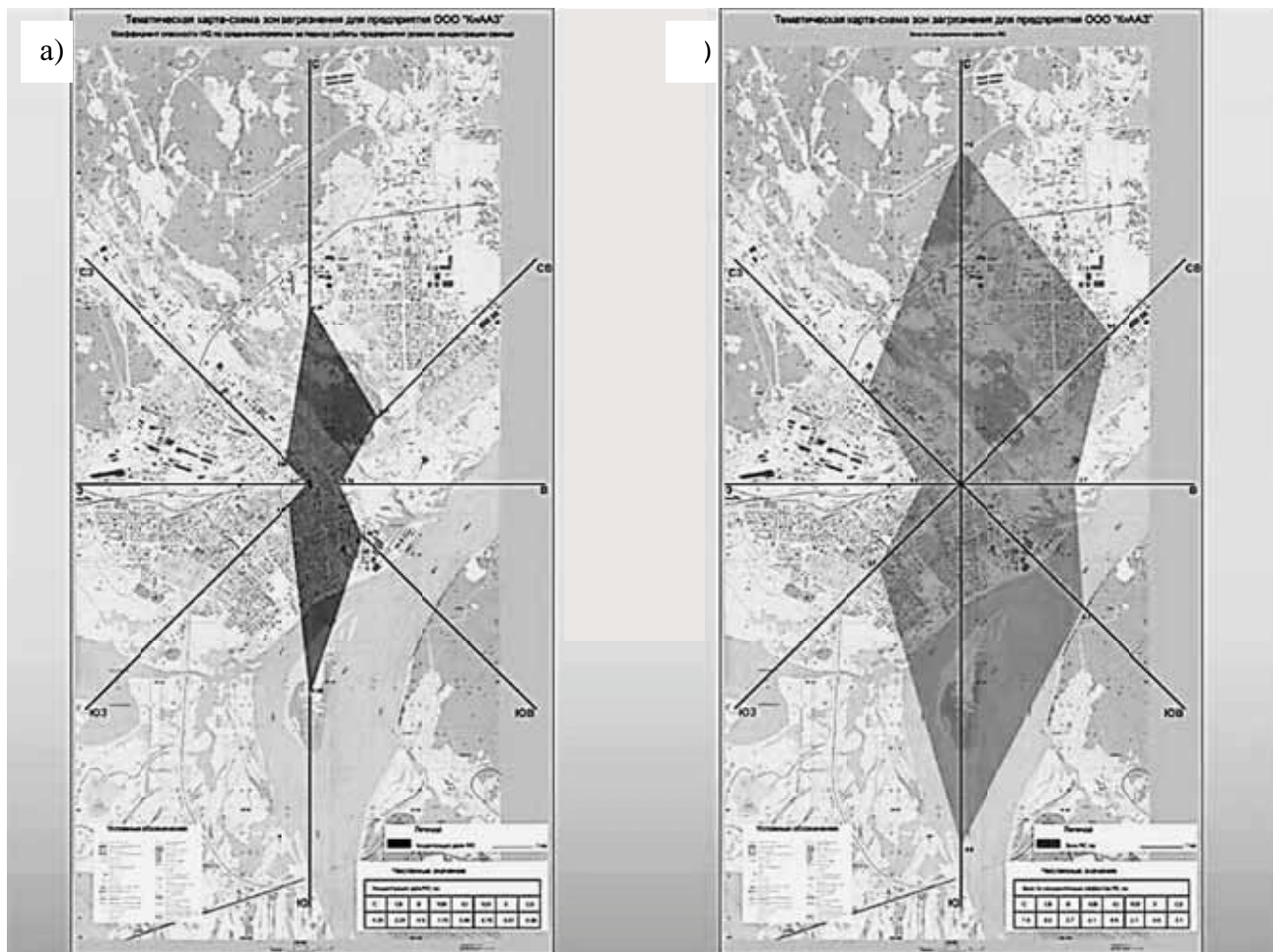


Рис. 5. Зона возможных неканцерогенных эффектов по свинцу по среднегодовым данным с $HQ > 1$ ($RfC = 0,0005 \text{ мг/м}^3$) (а), зона возможных канцерогенных эффектов по свинцу с $RC \times 10^{-6} > 1$ (б)

Неканцерогенный ингаляционный риск у населения, проживающего вблизи предприятия, в 4,8 раза выше, чем у населения, проживающего на границе опасной зоны.

Канцерогенные риски рассчитаны по стандартным факторам экспозиции при условии постоянного проживания населения в зоне загрязнения в течение 70 лет. Канцерогенный риск для взрослых, работавших на ОАО «КнААЗ» и проживавших вблизи предприятия, рассмотрен нами в [6] и поэтому здесь не рассматривается.

В зоне, представленной на рис. 5, б, у проживавших там групп населения риск канцерогенных эффектов выше пренебрежимо малых (10^{-6}), но ниже порога допустимых рисков для населения (10^{-4}). Исключение составляют группы населения, проживавшие на расстоянии 150 м и ближе в направлении на север от предприятия и проживавшие в направлении на юг на расстоянии 400 м и ближе от предприятия. Здесь риск выше 10^{-4} .

Канцерогенный ингаляционный риск у населения, проживавшего вблизи предприятия, в 2,7 раза выше, чем у населения, проживавшего на границе опасной зоны.

Затухание влияния свинцовой интоксикации после закрытия завода в функции от года рождения населения (для группы населения, проживающей на юге от ОАО «КнААЗ» с 1978 по 2005 гг.) по канцерогенным и неканцерогенным эффектам показано в табл. 3.

Таблица 3

Затухание влияния свинцовой интоксикации после закрытия завода по производству аккумуляторных батарей в г. Комсомольске-на-Амуре в функции от года рождения (возраста) населения

Неканцерогены			Канцерогены		
Год рождения	Возраст на 2011 г.	HQ	Год рождения	Возраст на 2011 г.	$RC \times 10^{-6}$
1978	37	29	1978	37	68
1985	26	28	1987	24	63
1990	21	26	1996	15	51
1995	16	23	2005	6	2
2000	11	17			
2005	6	0,8			

Как следует из представленных данных, только для современной шестилетней популяции и моложе по неканцерогенным эффектам коэффициент опасности HQ будет ниже единицы. Для более старшего контингента населения риски будут заметными, а длительность существования опасной ситуации составит примерно 60 лет.

По канцерогенным эффектам риск пренебрежимо малый для современной шестилетней популяции и моложе. Для населения старше 6 лет риски будут выше пренебрежимо малых, но не превысят предельно допустимый уровень.

Обсуждение результатов.

Неопределенности, влияющие на достоверность итоговых оценок и результатов:

1) Достоверность входных данных. В приведенном примере расчета исходные поля концентраций получены по программе «Эколог» (модель проф. Берлянта) для каждого года работы предприятия (1942 – 2005 гг.). Мощности выбросов свинца определялись:

- за период с 1942 по 1984 гг. на основе схемы материально-сырьевого баланса;

- за период с 1985 по 2005 гг. на основе данных измерений концентрации свинца в исходящих газах с учетом перехода в 2000 г. с весового метода на фотометрический. Результаты, полученные по модели проф. Берлянта, нацелены на получение максимальных годовых оценок, однако модели проф. Берлянта не учитывают неблагоприятные метеоусловия, приближенно с помощью постоянных коэффициентов учитывают рельеф местности, скорость оседания в зависимости от дисперсности частиц и другое, что может занижать полученный результат.

Для г. Комсомольска-на-Амуре 20 – 25 % времени года существуют условия, неблагоприятные для рассеивания выбросов, поэтому не следует надеяться, что результат сильно завышен. Сопоставление данных моделирования на границе СЗЗ показало погрешность 7,0 – 17,4 % по сравнению с данными измерений (табл. 4).

Таблица 4

Среднегодовые концентрации свинца, выбрасываемого в атмосферу за период отсутствия выбросов от автотранспорта (2004 – 2005 гг.) СЗЗ ОАО «КНААЗ»

Метод	Среднегодовая концентрация, mg/m^3	
	2004 г.	2005 г.
Измерения центральной заводской лаборатории (ЦЗЛ)	0,0002	0,0002
Моделирование	$0,214 \times 10^{-3}$	$0,2348 \times 10^{-3}$
Относительная погрешность	7,0 %	17,4 %

Снижение этого вида неопределенностей возможно путем применения других моделей для расчета рассеивания, определения мощностей выбросов с учетом изменения за квартал, месяц.



2) Неточность алгоритма расчета, которая может быть уменьшена за счет уменьшения шага по r и по α или построением алгоритма расчета на обработке исходных полей концентраций $C_{\text{МАХ}}(x, y)$, полученных на моделях, более точных по сравнению с моделью проф. Берлянта.

3) Неопределенности оценок риска, обусловленные неточностью определения концентраций и неточностью сценария.

Рассмотренный в работе *алгоритм*, несомненно, не может претендовать на высокий уровень точности при определении величин концентраций и связанных с ней других параметров. Он *предназначен для получения ранговых оценок существующих проблем и установления на этой основе приоритетов мероприятий* по регулированию уровня риска для здоровья населения от некачественной окружающей среды.

Интерпретация результатов. Полученные в работе результаты говорят о существовании потенциальной опасности для населения после закрытия завода в современной ситуации и в достаточно длительной перспективе. Опасности обусловлены накопленным действием в результате того, что пожизненная доза формировалась с учетом длительного проживания на загрязненной территории.

К группе максимального риска следует отнести персонал предприятия ОАО «КнААЗ» и население 1984 – 1996 гг. рождения, так как их период взросления пришелся на пик выбросов свинца в атмосферу города [6].

Уровень канцерогенной опасности от выбросов свинца ОАО «КнААЗ» следует признать низким. Однако при комплексных оценках риска с учетом других путей поступления следует учитывать полученный в настоящем исследовании результат.

Неканцерогенные эффекты будут заметными еще на протяжении десятков лет. Поэтому необходимы проведение дополнительных медицинских исследований по мониторингу здоровья населения и разработка комплекса мер защитных и реабилитационных мероприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Р 2.1.10.1920-04.** Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду [Электронный ресурс]: Доступ из справ.-правовой системы «Техэксперт».
2. **Гореликова, Е. И.** Разработка модели промышленного предприятия для ретроспективного анализа загрязнения окружающей среды на примере Комсомольского-на-Амуре аккумуляторного завода (ОАО КнААЗ) / Е. И. Гореликова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № III-1(4). – С. 112-121.
3. **Гореликова, Е. И.** Свинцовое загрязнение в г. Комсомольске-на-Амуре / Е. И. Гореликова, И. П. Степанова // Пятый краевой конкурс-конф. молодых ученых и аспирантов под патронажем губернатора Хабаровского края ДВО РАН, Хабаровск, 20 янв. 2003 г. – Хабаровск: Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, 2003.
4. **Лещев, Ю. Г.** Применение графических методов для решения задач в экологических проектах / Ю. Г. Лещев // Сб. трудов 8-й Междунар. науч.-практ. конф. в области экологии и безопасности жизнедеятельности «Дальневосточная весна-2008». – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2008. – С. 426-428.
5. **Лещев, Ю. Г.** Совершенствование системы управления в области земельных отношений / Ю. Г. Лещев // Сб. трудов 9-й Междунар. науч.-практ. конф. в области экологии и безопасности жизнедеятельности «Дальневосточная весна-2009». – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2009. – С. 145-162.
6. **Гореликова, Е. И.** Оценка ингаляционного канцерогенного риска здоровью населения г. Комсомольска-на-Амуре от свинцового загрязнения / Е. И. Гореликова, М. В. Гаврилова, И. П. Степанова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № I-1(5). – С. 93-102.

ХРОНИКА НАУЧНОЙ ЖИЗНИ
CHRONICLE OF SCIENTIFIC LIFE

Гладков Ю. А., Марьин С. Б., Куриный В. В., Прилуцкий Н. В.
Y. A. Gladkov, S. B. Maryin, V. V. Kuriny, N. V. Prilutsky

**ИТОГИ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОГО СЕМИНАРА
«ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ШТАМПОВКИ
И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ПРОГРАММЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ QFORM» (г. Арсеньев, 28 сентября 2012 г).**

RESULTS OF A RESEARCH AND PRACTICE SEMINAR TITLED “BETTER EFFICIENCY OF PRESS WORK AND DESIGNING OF DIE TOOLING USING QFORM SIMULATION PROGRAMM”, CITY OF ARSENYEV, SEPTEMBER 28TH 2012.

Гладков Юрий Алексеевич – кандидат технических наук, руководитель отдела продаж и сопровождения ООО «КванторФорм» (Россия, Москва). E-mail: sales@mail.ru.

Mr. Yury A. Gladkov – PhD in Engineering, Head of Sales and Customer Support at ООО “KvantorForm” (Russia, Moscow). E-mail: sales@mail.ru

Марьин Сергей Борисович - кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: maryinsb@mail.ru.

Mr. Sergey B. Maryin – PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Foundry Industrial Machinery/Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: maryinsb@mail.ru.

Куриный Владислав Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtlp@knastu.ru.

Mr. Vladislav V. Kuriny – PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Foundry Industrial Machinery/Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtlp@knastu.ru

Прилуцкий Николай Владимирович – студент группы 8ОД Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: priluckii@mail.ru

Mr. Nikolay V. Prilutsky – undergraduate student, Group 8OD; Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: priluckii@mail.ru

Аннотация. The paper presents the results of a research and practice seminar conducted in the city of Arsenyev on September 28th 2012.

Summary. В статье приведены итоги научно-практического семинара, состоявшегося в г. Арсеньеве, 28 сентября 2012 г.

Ключевые слова: семинар, Арсеньев, QForm.

Key words: Seminar, Arsenyev, QForm.

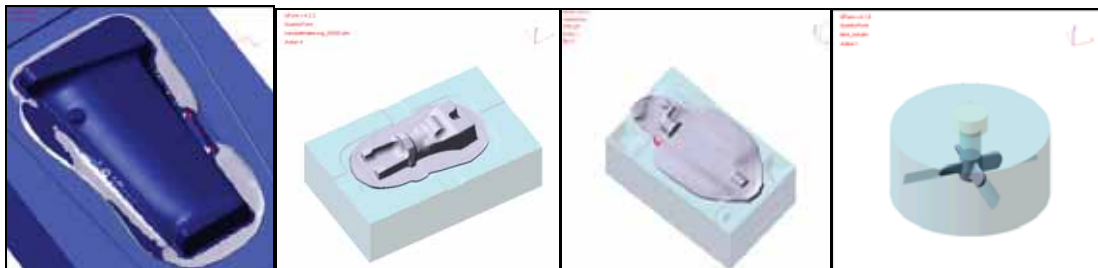
28 сентября 2012 г. на базе ОАО «Арсеньевская авиационная компания "Прогресс" им. Н.И. Сазыкина» (г. Арсеньев) успешно прошел научно-практический семинар «Практика применения программы моделирования QForm для решения технологических задач производства деталей авиационного и авиационного двигателестроения». Семинар был организован совместно компанией ОАО «КванторФорм», Комсомольским-на-Амуре государственным техническим университетом и авиационной компанией «Прогресс» им. Н.И. Сазыкина. На семинар были приглашены представители предприятий Дальневосточного региона.

Семинар предназначался для руководителей и технологов кузнечно-прессовых производств, перед которыми стоят задачи разработки новых технологических процессов штамповки изделий, обеспечения качества, увеличения объемов производства, сокращения затрат и расширения номенклатуры производства на имеющемся оборудовании.

Всего присутствовало более 20 человек из четырех предприятий Арсеньева и Владивостока, а также студенты и преподаватели Арсеньевского технологического института.



Семинар состоял из трех частей: презентация возможностей QForm специалистом ООО «КванторФорм» Ю.А.Гладковым, доклад С.Б. Марьина об опыте практической эксплуатации программы в условиях производства ОАО «КнААПО» им. Ю.А. Гагарина и ОАО «Аскольд», демонстрация работы программы QForm на практическом примере.



Примеры моделирования штамповки авиационных деталей

Выступления докладчиков вызвали большой интерес у участников.

На семинаре были рассмотрены вопросы подготовки и оптимизации технологии с использованием современной специализированной расчетной системы для повышения производительности, сокращения расхода металла, повышения стойкости штампового инструмента, ликвидации дефектов в поковках, исключения необходимости пробных штамповок при отработке новой технологии.

Столь большой интерес предприятий г. Арсеньева, у которых имеется заготовительное производство с технологическими процессами объемной штамповки, показывает перспективность использования компьютерных технологий моделирования.

Хотелось бы отметить, что программа QForm широко используется в вузах (только в России более чем в 20 вузах, в том числе КнАГТУ). Программа используется как на профильных кафедрах по обработке металлов давлением, так и на кафедрах по направлению технологии машиностроения. Программа может использоваться как при работе с абитуриентами, так и в целом ряде курсов: введение в специальность, САПР, моделирование, теория обработки давлением, ковка, горячая объемная штамповка и др. Студенты могут использовать программу в курсовых и дипломных проектах. В научной работе аспирантов и докторантов программа QForm позволяет уменьшить объем натуральных экспериментов, получить более быстро и более качественно результат.

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ КНАГТУ
НАУКИ О ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ

СТАТЬИ

Математика и механика

Бахарева Е.А., Стружанов В.В. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ЧИСТОГО ИЗГИБА БАЛКИ ИЗ УПРУГО-ХРУПКОГО МАТЕРИАЛА — №1

Горнаков А.И. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ НОВОМ СПОСОБЕ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ — №3

Лейзерович Г.С., Симонов В.С. О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ФОРМ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ ТОНКИХ КРУГОВЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С РАЗНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ — №4

Полуян Л.В., Тимашев С.А. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ И ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗОВ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ, ДЕГРАДИРУЮЩИХ ВО ВРЕМЕНИ — №1

Прокудин А.Н. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО СПОСОБА РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДЯНЫХ ЗАТОРОВ НА РЕКАХ ДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ — №1

Севастьянов А.М. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ПОЛЫХ ОТЛИВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В ФУТЕРОВАННОЙ ФОРМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОСИФОНА — №3

Сергеева А.М., Ткачева А.В. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛЕДОКОЛЬНОГО УСТРОЙСТВА, СПОСОБСТВУЮЩЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЮ И РАЗРУШЕНИЮ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА — №1

Сергеева А.М., Ткачева А.В., Одинокое В. И. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ЛЕДОКОЛЬНЫМ СУДНОМ — №1

Тырсин А.Н., Макарова Т.А. ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТРУКТУРНЫХ ЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ — №1

Шпилев М.А., Ткачук А.А. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ — №2

Авиационная и ракетно-космическая техника

Долотов Б.И., Жабаров А.В., Колыхалов Д.Г., Марьин С.Б., Якимов В.И. ПРОИЗВОДСТВО ЛИСТОВЫХ ШТАМПОВАННЫХ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ — №2

Долотов Б.И., Жабаров А.В., Колыхалов Д.Г., Марьин С.Б., Якимов В.И. ПРОГРЕССИВНЫЕ СПОСОБЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБОПРОВОДОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ — №2

Лозовский И.В. О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ОПЕРАЦИЙ, ВЫПОЛНЯЕМЫХ ЛЕГКИМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ — №4

Энергетика

Алетдинов Р.Ф., Волкова Т.А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ В ДУАЛЬНО-ИНВЕРСНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ ПУТЁМ СРАВНЕНИЯ РАЗМЕРНОСТЕЙ — №4

Зайков В.И. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ИНЖЕКЦИОННОГО ЛАЗЕРА СЕРИИ DLDRM12-655-25 — №3

Кузьмин В.М., Сериков А.В., Степанова И.П. ОСОБЕННОСТИ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА — №2

Размыслов В.А., Бондаренко В.А. РАСЧЁТ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОДНОФАЗНОМ ТРЁХСТЕРЖНЕВОМ СВАРОЧНОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ — №3



Сериков А. В., Костюченко В. И. РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ РАСЧЁТА ТРЁХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ ДЛЯ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОВОДОНАГРЕВА — №4

Степанов А.Н., Степанова И.П. РАСЧЕТ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ — №2

Телешова Н.С. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО ПУСКА МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ГАЗОТУРБИНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ — №3

Фролов А. В., Кузьмин Р. В., Степанова И.П. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ С МНОГОПЕТЛЕВОЙ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ К ИЗМЕНЕНИЮ НОМИНАЛОВ ИХ ЭЛЕМЕНТОВ — №2

Чье Ен Ун, Шеин А.Б. РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ В ЗАДАЧАХ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ — №4

Управление, вычислительная техника и информатика

Горелик В.А., Золотова Т.В., Прохорова М.С. ДИНАМИЧЕСКАЯ МИНИМАКСНАЯ ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ РИСКОМ — №2

Комаровский Ю. А. УХУДШЕНИЕ ТОЧНОСТИ GPS-ПРИЁМНИКА ВБЛИЗИ ВЫСОКИХ ОБЪЕКТОВ — №4

Котляров В.П., Воробьев А.А. ИССЛЕДОВАНИЕ КРИПТОСТОЙКОСТИ МОДИФИКАЦИИ ШИФРА ГАММИРОВАНИЯ ПО ОПЕРАЦИИ ХОР ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОНТИНУАЛЬНОГО МНОЖЕСТВА — №4

Некрасова М.Г., Магола А.А., Магола Д.С. НЕЧЕТКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАТРАТ НА КАЧЕСТВО В ПРОЦЕССЕ ОХРАНЫ ТРУДА НА ОСНОВЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО СТАНДАРТА «РУКОВОДСТВО ПО ЭКОНОМИКЕ КАЧЕСТВА. МОДЕЛЬ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ, ОЦЕНКИ И ОТКАЗОВ» — №3

Редколис Е. В., Бердонос В. Д. ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ОКАЗАНИЯ МУНИЦИПАЛЬНЫХ УСЛУГ. ПРЕДПОСЫЛКИ. ТРЕБОВАНИЯ — №1

Тихомиров В.А., Александров С.Ю. НЕЧЕТКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАТРАТ НА КАЧЕСТВО В ПРОЦЕССЕ ОХРАНЫ ТРУДА НА ОСНОВЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО СТАНДАРТА «РУКОВОДСТВО ПО ЭКОНОМИКЕ КАЧЕСТВА. МОДЕЛЬ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ, ОЦЕНКИ И ОТКАЗОВ» — №3

Машиностроение

Бржозовский Б.М., Янкин И.Н., Хайров Д.А. ИЗВЛЕЧЕНИЕ ПОЛЕЗНОЙ ИНФОРМАЦИИ ИЗ СИГНАЛА КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ — №1

Бурдасов Е.Н., Сариллов М.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА — №3

Евстигнеев А.И., Сидоров А.И. Бердников Н.В., Коновалова Н.С. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ПРОШИВКИ ОТВЕРСТИЙ — №4

Ковбасюк А. А., Сариллов М. Ю. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ЗА СЧЕТ НАЛОЖЕНИЯ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ — №3

Марьян Б. Н. Сысоев О.Е. Быченко В.Н. Саблин П.А. Шпорт Р.В. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ — №1

Мокрицкий Б.Я., Бурков А.А. К ВОПРОСУ О ПУТЯХ МОДЕРНИЗАЦИИ ЗУБОФРЕЗЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ — №2

Рубцов Ю.В., Коннова Г.В., Золотарева С.В. ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ШПАЛОЛОСОПИЛЕНИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ЩЕПУ — №3



Щелкунов Е.Б., Виноградов С.В., Щелкунова М.Е., Самар Е.В. МЕХАНИЗМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ В МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКАХ — №4

Металлургия и материаловедение

Бахматов П.В. АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ — №4

Бахматов П.В. ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТЫКУЕМЫХ КРОМОК НА МЕХАНИЗМ ПОРООБРАЗОВАНИЯ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ — №4

Верхотуров А.Д., Шпилёв А.М., Евстигнеев А.И., Коневцов Л.А. МОНОГРАФИЯ М.В. ЛОМОНОСОВА "ПЕРВЫЕ ОСНОВАНИЯ МЕТАЛЛУРГИИ, ИЛИ РУДНЫХ ДЕЛ" И ЕЁ ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ — №3

Верхотуров А.Д., Шпилёв А.М., Евстигнеев А.И., Макиенко В.М., Коневцов Л.А. О НОВЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ РАЗВИТИЯ НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ — №2

Дмитриев Э.А., Соболев Б.М., Рыбалкин А.А. ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ ЧУГУНА С ШАРОВИДНОЙ ФОРМОЙ ГРАФИТА — №3

Куделько А.Р., Марьин Б.Н., Лиманкин В.В., Марьин С.Б., Шпилев А.М., Шпорт В.И., Быченко В.Н. СОЗДАНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БАЗОВОЙ КАФЕДРЫ ВУЗА НА ПРЕДПРИЯТИИ КАК ОДИН ИЗ ФАКТОРОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ — №4

Лиманкин В.В., Ким В.А., Марьин Б.Н., Сухоплюев В.А., Марьин С.Б., Шпилёв А.М., Дмитриев Э.А. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИОННОМ ОТЖИГЕ — №2

Оглоблин Г.В., Стулов В.В. МОДЕЛЬ В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ — №1

Привалова В.В., Стружанов В.В. НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ УПРУГОХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ В ХОДЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО РАСТЯЖЕНИЯ — №1

Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Комаров О.Н., Абашкин Е.Е. СВОЙСТВА СВАРНОГО ШВА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ТЕРМИТНОЙ ШИХТЫ — №1

Свиридов А.В., Куриный В.В. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОФОРЕТИЧЕСКИХ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ — №2

Степаненко В. Е., Фролов Д.Н. МЕТОД ПРОГНОЗА И ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АГРЕГАТНОЙ СБОРКИ СТАНДАРТИЗОВАННЫМИ — №1

Черномас В. В., Ланкина С.В., Одинокое В.И. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ НА УСТАНОВКЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ — №1

Черномас В. В., Ланкина С.В., Саликов С. Р., Лушников Н.Ю. ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА — №1

Флот и кораблестроение

Афанасьева И.В., Анисимов В.В. ОЦЕНКА НЕКАНЦЕРОГЕННОГО РИСКА ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ПЕРСОНАЛА ООО «РН-КОМСОМОЛЬСКОГО НПЗ» — №2

Баранова Т.В., Зайков В.И., Чернышев Н.И., Аликина Н.С. ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ЛАЗЕРОМ НА ПОСЕВНЫЕ КАЧЕСТВА СЕМЯН И УРОЖАЙ ТОМАТОВ — №4

Вахрушева В.О., Вахрушева Е.А., Гринкруг Н.В. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОАО «КОМСОМОЛЬСКИЙ ХЛАДОКОМБИНАТ» НА ГОРОДСКУЮ СРЕДУ — №2



Грицкевич Д.И. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ИДЕОЛОГИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ КОНСОЛИДАЦИИ ГРАЖДАНСКОГО ОБЩЕСТВА В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ — №3

Коротеева Л.И., Редикульцева О.Л. ГИС «КАДАСТР ИСТОРИКО-ЭТНИЧЕСКИХ И ТУРИСТСКИХ РЕСУРСОВ КОМСОМОЛЬСКОГО МУНИЦИПАЛЬНОГО РАЙОНА» — №3

Науки о земле и безопасности жизнедеятельности

Овчинников И.Д. УПРАВЛЕНИЕ ЗАТРАТАМИ В СУДОСТРОЕНИИ — №3

Погорелова А.В., Козин В.М. ДВИЖЕНИЕ ТОНКОГО ТЕЛА ПОД ПЛАСТИНОЙ В ЖИДКОСТИ КОНЕЧНОЙ ГЛУБИНЫ — №4

Степанова И.П., Гореликова Е.И., Степанов А.Н., Лещев Ю.Г. АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ ВЫБРОСОВ ПРЕДПРИЯТИЯ ЗА «ЦИКЛ ЖИЗНИ» И ПОСЛЕ ЗАКРЫТИЯ — №4

Тарануха Н.А., Худяков С.А. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ НЕУРАВНОВЕШЕННОСТИ СУДОВЫХ МАЛООБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ — №4

Турбина Е.С. ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА И БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ДЕТЕЙ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА БИРОБИДЖАНА) — №2

Цой О.М., Фетисова М.П., Ю С.О. ПРОБЛЕМЫ МЕЖДУНАРОДНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА ПО ВОПРОСАМ БЕСКОНФЛИКТНЫХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ — №3

Строительство и архитектура

Сысоев О.Е. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ КРИТЕРИИ МОНИТОРИНГА ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ И МЕХАНИЗМОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ, МАШИНОСТРОЕНИИ И АВИАЦИИ — №2

Сысоев О.Е., Биленко С.В. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ — №3

Сысоев О.Е., Кузнецов Е.А., Куриный В.В., Шпорт Р.В. СОВРЕМЕННЫЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ СТЕНДЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МАЛОЦИКЛОВЫХ НАГРУЗКАХ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ — №1

ХРОНИКА НАУЧНОЙ ЖИЗНИ

Башков О.В., Башкова Т.И. ВСЕМИРНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, ПРОХОДИВШАЯ В ПЕКИНЕ С 24 ПО 26 АВГУСТА 2011 Г. И СОСТОЯНИЕ МИРОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ — №3

Гладков Ю.А., Куриный В.В., Марьин С.Б. НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ СЕМИНАР «ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ШТАМПОВКИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ QFORM» В г.АРСЕНЬЕВЕ НА ОАО ААК "ПРОГРЕСС" — №4

Евстигнеев А. И., Крысеев В.И. МАСТЕР-КЛАСС ВЕДУЩИХ УЧЕНЫХ РОССИИ - КАК ФОРМА СОХРАНЕНИЯ ПРЕЕМСТВЕННОСТИ ПОКОЛЕНИЙ В СФЕРЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ. — №1

Мокрицкий Б.Я., Евстигнеев А.И. ОТЧЁТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ОБ ИТОГАХ ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ КОНФЕРЕНЦИЙ — №1

Одинокоев В.И., Сапченко И.Г. 20 ЛЕТ ОДНИМ КУРСОМ — №1