

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА
MATHEMATICS AND MECHANICS

Тарануха Н. А., Петрова А. Н., Любушкина Н. Н.
N.A. Taranukha, A.N. Petrova, N.N. Lyubishkina

**КОЛЕБАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С БОЛЬШИМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ
ИЗ НЕСТАНДАРТИЗИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА**

**VIBRATIONS OF DYNAMICAL SYSTEMS WITH LARGE DEFORMATIONS
MADE OF NON-STANDARD MATERIAL**



Тарануха Николай Алексеевич – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Кораблестроение» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: taranukha@knastu.ru.
Mr. Nikolay A. Taranukha – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Shipbuilding Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), taranukha@knastu.ru



Петрова Анна Николаевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры МОП ЭВМ Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: petrovaan2006@yandex.ru.
Ms. Anna N. Petrova – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Computer Software and Computing, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), petrovaan2006@yandex.ru



Любушкина Надежда Николаевна – доцент кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: nadka_lub@mail.ru.
Ms. Nadezhda N. Lyubushkina – Associate Professor at the Department of Industrial electronics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), nadka_lub@mail.ru

Аннотация. В статье описывается методика расчета и оценки колебаний динамических систем с большими деформациями из нестандартизированного материала. Выполнены исследования зависимости жесткости от геометрических параметров образца. Методика расчета апробирована на ряде задач.

Summary. The article describes the method of calculation and evaluation of vibrations of dynamical systems with large deformations of non-standard material. The investigation of stiffness depending on the geometric parameters of the sample is carried out. The method of calculation was tested on a number of problems.

Ключевые слова: колебания, большие деформации, математическая модель.

Keywords: vibrations, large deformations, mathematical model

УДК 539.3:534.1:517.958

Введение

Выполнить оценку динамических характеристик колеблющейся системы – это задача, требующая нетрадиционного решения, особенно при использовании современных материалов со сложными физико-механическими свойствами.

Параметры, определяющие колебательный процесс (коэффициент затухания, амплитуда, фаза колебаний), зависят от круговой частоты, которая, в свою очередь, зависит от коэффициента жесткости элемента упругой связи. Коэффициент жесткости – это функция, определяемая деформационной характеристикой материала, которая при больших деформациях, как правило, нелинейна. В реальных условиях колебания динамических систем следует рассматривать с учетом внутреннего сопротивления [2]. Определить жесткость нестандартизированного материала и логарифмический декремент можно только на основе экспериментальных данных. Таким образом, определение амплитудно-частотных характеристик конструкции из нестандартизированного материала является сложной задачей.

Примером нестандартизированного материала может быть резина. Динамические процессы в стержне из подобного материала нетривиальны. В элементах конструкций из таких материалов могут возникать, в том числе и значительные деформации. Примерами таких конструкций могут являться элементы специальных амортизаторов (типа автофинишеров).

Амплитудно-частотные характеристики динамических систем при больших деформациях зависят от физических характеристик материала и изменяющихся геометрических параметров колеблющейся системы.

В данной работе рассмотрена методика расчета параметров свободных колебаний для динамической системы, допускающей большие деформации (до десятков и сотен процентов). Материал упругой связи динамической системы является нестандартизированным.

Предлагаемая методика заключается в следующем [5]:

- проведение модельного эксперимента для определения статических характеристик нестандартизированного материала (см. рис. 1, *a*). При разработке методики эксперименты проводились для разной длины и формы поперечного сечения образца;
- расчет статических характеристик нестандартизированного материала;
- проведение модельного эксперимента для определения динамических характеристик нестандартизированного материала. Для предложенной методики были разработаны аппаратно-программный комплекс и новое программное обеспечение для проведения экспериментов и выполнения численных расчетов;
- расчет динамических характеристик нестандартизированного материала;
- расчет колебательного процесса реальной динамической конструкции с одной степенью свободы из того же материала, что в модельном эксперименте, на основе рассчитанных физических характеристик (например, как на рис. 1, *b*). Для расчета колебательного процесса предлагается применить линейную схему расчета с использованием итерационной процедуры для учета нелинейных свойств материала.

Поясним предлагаемую методику более детально.

1 Проведение модельного эксперимента для определения статических характеристик нестандартизированного материала

Для проведения физического эксперимента выбран монолитный резиновый жгут, длина рабочей части которого, как минимум, в 15 раз больше относительного размера поперечного сечения.

Образец жестко закреплен с одной стороны. Усилие создается за счет силы, действующей на образец со стороны, противоположной закрепленной. Сила P равна весу прикрепленного груза (см. рис. 1, *a*). Исключен перекокс, без дополнительного изгиба создана центральная передача усилий. Изменение груза осуществляется вручную.

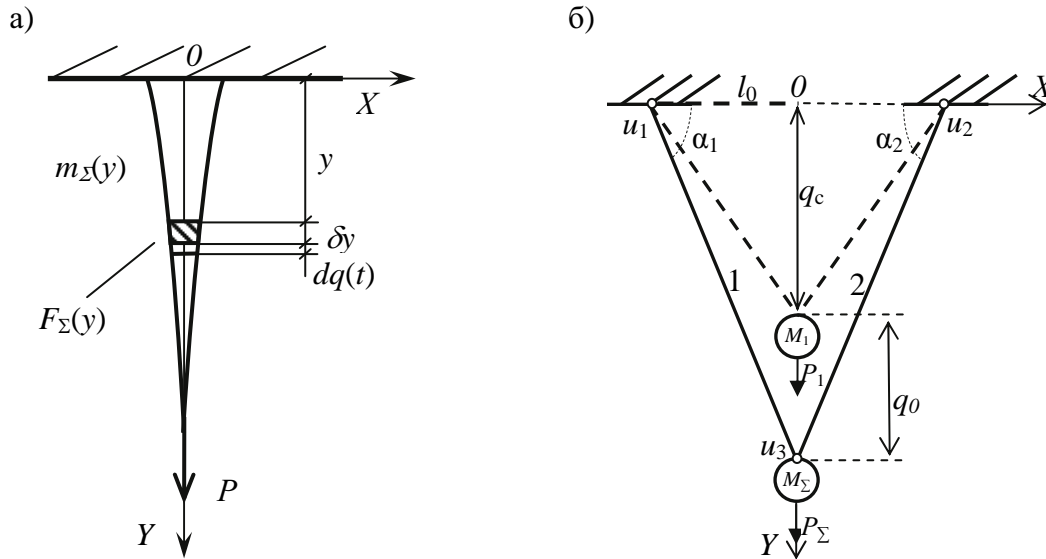


Рис. 1. Схема нагружения: а – в модельном эксперименте; б – в реальной конструкции

Для проверки правильности теории эксперименты проводились многократно на нескольких образцах, в том числе с разными характеристиками. Величина деформации доводилась до нескольких сотен процентов от начальной.

Анализ деформированного состояния основан только на геометрических соотношениях. В качестве исследуемых физических моделей использовались резиновые жгуты, которые имеют заданную длину и поперечное сечение: образец 1 (см. рис. 2, а) круглого поперечного сечения, образец 2 (см. рис. 2, б) квадратного поперечного сечения, образец 3 (см. рис. 2, в) прямоугольного поперечного сечения. Далее по статье значение индекса определяет принадлежность образца.

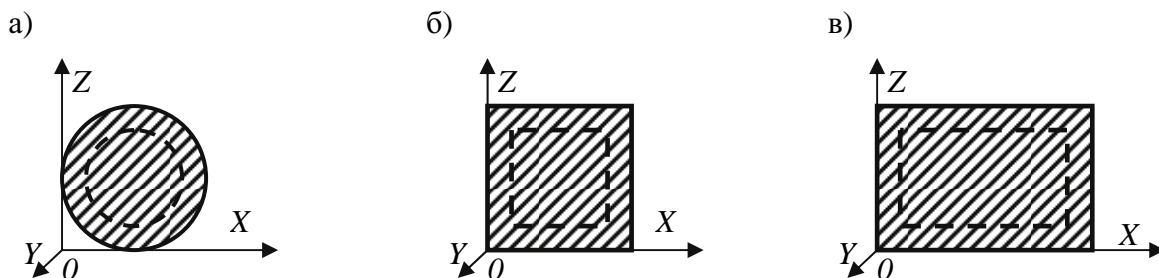


Рис. 2. Формы поперечных сечений: а – образец круглого сечения; б – образец квадратного сечения; в – образец прямоугольного сечения

В продольном направлении стержень удлиняется на величину

$$\Delta l = \Delta y,$$

где Δy – перемещение конечной точки стержня вдоль оси OY после деформации.

При растяжении происходит утонение и изменение размеров по соответствующим осям: Δx , Δz . Пунктиром на рис. 2 обозначены поперечные сечения после деформации. Для увеличения точности и уменьшения погрешности делались многократные измерения геометрических размеров стержня. Экспериментальные данные нормировались.

2 Расчет статических характеристик нестандартизированного материала

По экспериментальным данным определялись статические характеристики нестандартизированного материала, главные из которых модуль упругости материала и коэффициент жесткости. На рис. 3 показано сравнение деформационных характеристик трех образцов.

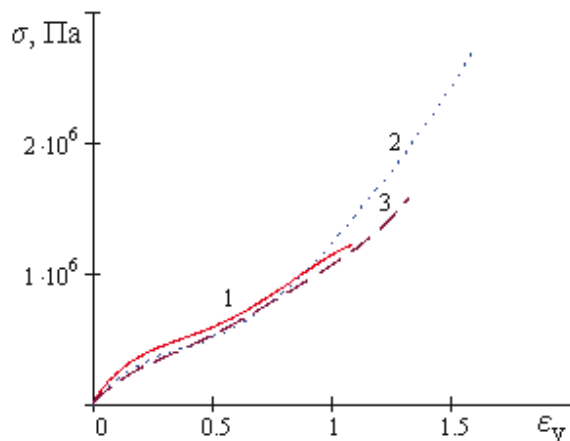


Рис. 3. Деформационные характеристики

Из графика на рис. 3 видно, что материал является нелинейно-упругим, и модуль упругости материала $E_{np}(\Delta l)$ – величина не постоянная, а функция. В ходе исследования была выведена и апробирована математическая модель определения статических характеристик нестандартизированного материала, допускающего большие деформации,

$$E_{np}(\Delta l) = \frac{(\sigma_y(\epsilon_y(\Delta l)))}{\epsilon_x(\Delta l) + \epsilon_y(\Delta l) + \epsilon_z(\Delta l)} = \frac{\left(\sigma_y \left(\frac{\epsilon_x(\Delta l) + \epsilon_y(\Delta l) + \epsilon_z(\Delta l)}{1 - 2\mu(\Delta l)} \right) \right)}{\epsilon_x(\Delta l) + \epsilon_y(\Delta l) + \epsilon_z(\Delta l)}. \quad (1)$$

Была исследована зависимость функции изменения модуля упругости от разных исходных длин образцов (l_0). Сделан вывод, что $E_{np}(\Delta l)$ не зависит от исходных длин образцов.

Была исследована зависимость функции изменения модуля упругости от формы поперечного сечения образца (см. рис. 4).

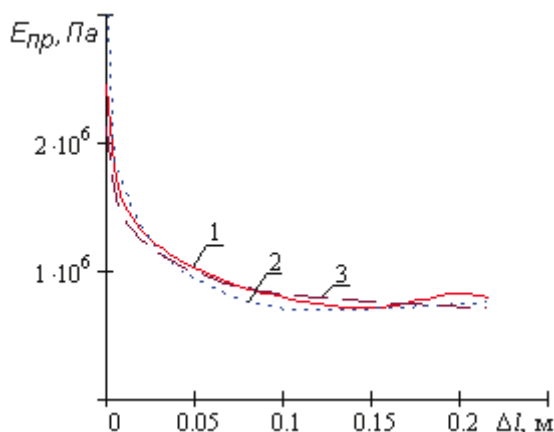


Рис. 4. График изменения приведенного модуля упругости

Среднеквадратичное отклонение зависимостей $E_{np}(\Delta l)$ друг от друга для различных форм поперечного сечения образцов в пределах 0,2 %, в отличие от расчета модуля упругости по другим методикам. Таким образом, можно принять одну из зависимостей, полученных в модельном эксперименте, для дальнейших расчетов реальных конструкций.

Функция изменения коэффициента жесткости определялась с учетом вывода объемного модуля упругости (1).

$$C_{np}(\Delta l) = \frac{E_{np}(\Delta l) \cdot (\varepsilon_x(\Delta l) + \varepsilon_y(\Delta l) + \varepsilon_z(\Delta l)) \cdot F(\Delta l)}{\Delta l}, \quad (2)$$

где $F(\Delta l)$ – площадь поперечного сечения в текущий момент нагружения.

Функция изменения коэффициента жесткости была исследована в зависимости от разных длин образцов. Доказано, что можно найти коэффициент жесткости для образца любой длины по результатам исследования одного опытного образца.

Функция изменения коэффициента жесткости была исследована в зависимости от формы поперечного сечения образца. Максимальная погрешность определения коэффициента жесткости, отнесенного к площади поперечного сечения (C^1), рассчитанного по приведенному модулю упругости (2), составляет 7,7 %, что говорит о близости к экспериментальному распределению. Если выполнить аналогичные вычисления C^1 через касательный модуль упругости, то максимальная относительная погрешность составит 14,9 %, что недопустимо.

3 Проведение модельного эксперимента для определения динамических характеристик нестандартизированного материала

Экспериментальная установка – это аппаратно-программный комплекс (АПК), позволяющий получать зависимости для определения динамических характеристик материала (логарифмический декремент затухания, коэффициент затухания) и параметров образцов (амплитуда колебания, период колебания) для расчета физически нелинейной математической модели колебания системы с одной степенью свободы при больших деформациях. Комплекс состоит из аппаратной части и программно-информационного обеспечения (ПИО) [1, 4].

Данная установка апробирована на серии экспериментов и дает хорошие результаты. По сравнению с другими программами, работающими с драйверами мыши, программа имеет преимущество – запись отсчетов производится без ограничений количества таковых, рабочая зона не ограничена разрешением и размером монитора. Данные результаты можно использовать для дальнейших исследований. На программу «Колебания» получено свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2008610137, зарегистрированное в Реестре программ для ЭВМ 9 января 2008 г.

В программе за нулевой отсчет принято растянутое положение измерителя, поэтому установившееся значение находится в области положительных значений длин. При расчетах за нулевое значение принята точка закрепления образца в неподвижной опоре.

4 Расчет динамических характеристик нестандартизированного материала

В ПИО заложен алгоритм, предложенный авторами, для расчета динамических характеристик: частоты (λ), коэффициента затухания (b), амплитуды (A), сдвига фазы (ϕ) по зависимости перемещения (q) во времени (t), представленный в табличном виде [1, 3]. Данный алгоритм реализован в программе «Динамические свойства материалов», зарегистрированной в Реестре программ для ЭВМ 19 ноября 2008 г. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2008615530.

5 Расчет реальной динамической конструкции с одной степенью свободы из того же материала, что в модельном эксперименте, на основе рассчитанных физических характеристик

Ввиду того, что при большой деформации циклическая частота и коэффициент затухания зависят от жесткости системы, для больших деформаций дифференциальное уравнение определяем в виде

$$\frac{d^2 q(t)}{dt^2} + \frac{\beta}{M^c} \cdot \frac{dq(t)}{dt} + \frac{C_{\Sigma}(\Delta l)}{M^c} \cdot q(t) = 0, \quad (3)$$

где β – коэффициент сопротивления среды (внутренней и внешней); M^c – суммарная масса, сосредоточенная в узле конструкции; $C_{\Sigma}(\Delta l)$ – суммарный коэффициент жесткости упругих связей из нестандартизированного материала.

Данное дифференциальное уравнение является нелинейным относительно жесткости с переменными во времени коэффициентами.

Циклическая частота незатухающих колебаний не зависит от амплитуды колебания, она зависит от жесткости системы (2), поэтому круговую частоту для больших деформаций будем определять следующим образом:

$$\lambda(C_{\Sigma}(\Delta l)) = \sqrt{\frac{C_{\Sigma}(\Delta l)}{M^c}}.$$

С учетом зависимости, определяющей циклическую частоту колебаний, коэффициент затухания будет определяться выражением

$$b(C_{\Sigma}(\Delta l)) = \frac{\gamma}{\sqrt{4\pi^2 + \gamma^2}} \cdot \lambda(C_{\Sigma}(\Delta l)). \quad (4)$$

Циклическая частота затухающих колебаний будет определяться выражением

$$\lambda_1(C_{\Sigma}(\Delta l)) = \lambda(C_{\Sigma}(\Delta l)) \cdot \sqrt{1 - \frac{\gamma}{\sqrt{4\pi^2 + \gamma^2}}}. \quad (5)$$

Амплитуда и фаза колебания – это функции, зависящие от жесткости материала упругой связи, поэтому определяются

$$A(C_{\Sigma}(\Delta l)) = \sqrt{q_0^2 + \frac{(\nu_0 + b(C_{\Sigma}(\Delta l)) \cdot q_0)^2}{\lambda_1(C_{\Sigma}(\Delta l))^2}}; \quad (6)$$

$$\phi(C_{\Sigma}(\Delta l)) = \arctg\left(\frac{q_0^2 + \lambda_1(C_{\Sigma}(\Delta l))}{\nu_0 + b(C_{\Sigma}(\Delta l)) \cdot q_0}\right).$$

Решение дифференциального уравнения квазигармонических колебаний (3) для больших деформаций предлагается в виде [1, 3]

$$q(t, C_{\Sigma}(\Delta l)) = A(C_{\Sigma}(\Delta l)) \cdot e^{-b(C_{\Sigma}(\Delta l))t} \cdot \sin(\lambda_1(C_{\Sigma}(\Delta l)) \cdot t + \phi(C_{\Sigma}(\Delta l))). \quad (7)$$

Начальные условия для задачи о колебаниях системы с большими деформациями будут определяться в виде

$$q(t, C_{\Sigma}(\Delta l)) = q_0; \quad \dot{q}(t, C_{\Sigma}(\Delta l)) = \dot{q}_0'. \quad (8)$$

Главной особенностью закона колебания является то, что частота, коэффициент затухания, амплитуда и начальная фаза колебания зависят от существующих в конкретный мо-

мент времени в колеблющейся системе удлинения и фактической жесткости системы. Данное обстоятельство стало главным при выполнении итерационной процедуры расчета.

Решение (7) нелинейного дифференциального уравнения (3) было получено с учетом независимости функций, входящих в данное уравнение, поэтому оно требует корректировки учета нелинейности входящих функций. Для этого предлагается следующий численный алгоритм поиска решения.

Выбрав достаточно малый шаг h , построим систему равноотстоящих точек

$$t_i = t_0 + i \cdot h.$$

Поскольку $\Delta l_i = f(q_i, q_0)$, значения q_i могут быть определены следующим образом:

$$q_{i+1} = A(C_\Sigma(\Delta l_i)) \cdot e^{-b(C_\Sigma(\Delta l_i))t} \cdot \sin(\lambda_1(C_\Sigma(\Delta l_i)) \cdot t + \phi(C_\Sigma(\Delta l_i))).$$

В данном алгоритме предлагается для нахождения последующего значения q_{i+1} учитывать истинное значение жесткости, соответствующее действительному удлинению.

Общее решение $q(t)$ уравнения (3) для динамической системы ищем в виде суммы двух составляющих: динамического $q_d(t)$, описываемого уравнением (7), и смещения q_c от действия статического нагружения [3]

$$q(t, C_\Sigma(\Delta l)) = q_d(t, C_\Sigma(\Delta l)) + q_c(t, C_\Sigma(\Delta l)). \quad (8)$$

Циклическую частоту затухающих колебаний определяем выражением (5), коэффициент затухания (4), амплитуду и фазу выражениями (6), учитывающими большие деформации. Значения функций $\lambda_1(C_\Sigma(\Delta l_i))$, $b(C_\Sigma(\Delta l_i))$, $A(C_\Sigma(\Delta l_i))$ и $\phi(C_\Sigma(\Delta l_i))$ уточняются на каждом шаге итерации для соответствующего удлинения Δl_i и фактической жесткости $C_\Sigma(\Delta l_i)$.

Полученное таким образом решение является численным, параметрически зависимым от коэффициента жесткости системы $C_\Sigma(\Delta l)$.

Для подтверждения правильности предложенной методики был проведен эксперимент для рассчитываемой конструкции (см. рис. 1, б). На рис. 5 приведены графики колебательных процессов.

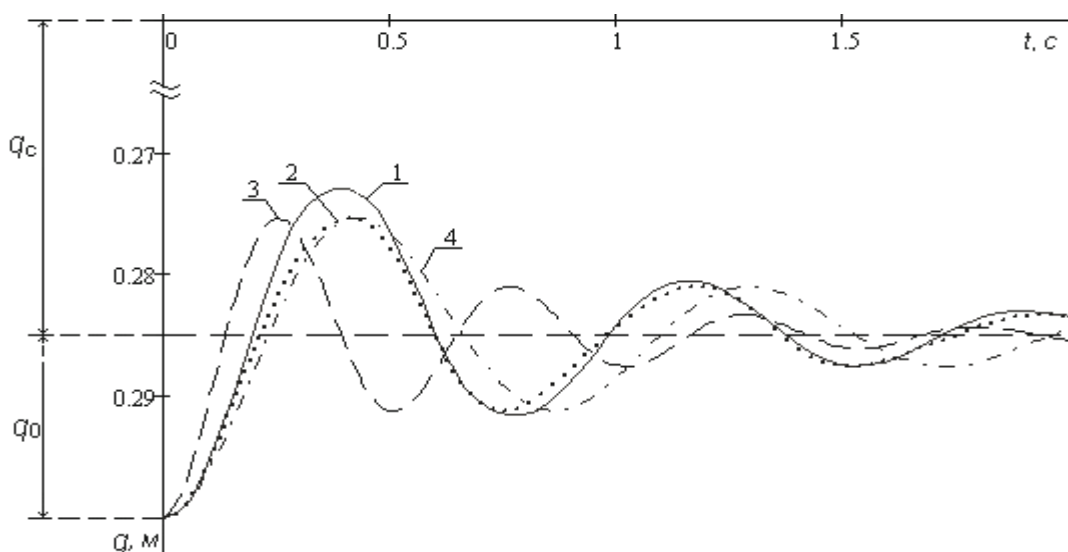


Рис. 5. Графики колебаний: 1 – эксперимент; 2 – расчет по предлагаемой математической модели итерационно с пересчетом жесткости; 3 – расчет без пересчета жесткости; 4 – решение уравнения (3) методом Рунге-Кутты

Тарануха Н. А., Петрова А. Н., Любушкина Н. Н.
КОЛЕБАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С БОЛЬШИМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ
ИЗ НЕСТАНДАРТИЗИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА

Из рис. 5 видно, что предложенная математическая модель оценки колебаний дает вполне удовлетворительные результаты, среднее значение среднеквадратичного отклонения составляет 0,004 % (методом Рунге-Кутта – 1,6 %).

Заключение

Модели, предложенные в данной работе, предназначены для оценки колебаний динамических систем с одной степенью свободы, учитывающих большие деформации, позволяют учитывать физические нелинейности материала конструкции. Модели могут найти широкое применение в практических расчетах. Разработанный программный комплекс может использоваться в научных исследованиях свойств нестандартизированных материалов, задачах колебаний.

Методика расчета и оценки колебаний динамической системы пригодна для расчета конструкций с элементами упругой связи различной длины, площади и формы поперечного сечения, имея данные только модельного эксперимента. Итерационная процедура расчета колебаний дает результаты, сопоставимые с известными численными методами, позволяя при этом определить не только значения перемещения, но и частоты, амплитуды и коэффициента затухания.

Предложенные математическая и численные модели, АПК и методика позволяют удовлетворительно оценивать колебания динамических систем с большими деформациями из нестандартизированных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Тарануха, Н. А. Математическое моделирование колебаний сложных оболочек. Гидроупругая постановка с учетом сопротивления / Н. А. Тарануха, О. В. Журбин. – Владивосток : Дальнаука, 2008. – 253 с.
3. Тарануха, Н. А. Математическое моделирование колебательных процессов в стержне с большими деформациями / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КнАГТУ», 2007. – 19 с. – Деп. в ВИНТИ 26.09.2007, 903-В2007.
4. Тарануха, Н. А. Программно-аппаратный комплекс по обработке результатов эксперимента колеблющейся системы / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КнАГТУ», 2007. – 12 с. – Деп. в ВИНТИ 26.09.2007, 902-В2007.
5. Тарануха, Н. А. Механика морских динамических систем с большими деформациями из нестандартизированного материала / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина // Морские интеллектуальные технологии. – 2010. – № 3.
6. Тарануха, Н. А. Математическая модель шарнирной стержневой системы с большими перемещениями узлов / Н. А. Тарануха, К. В. Жеребко, А. Н. Петрова, М. Р. Петров // Известия вузов. – Строительство. – 2003. – № 3. – С. 12-18.

Кощаева Е. И., Фролов В. В.
E.I. Koschajeva, V.V. Frolov

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКРАНОПЛАНА ТИПА В

DEFINING THE AERODYNAMIC PROPERTIES OF AN A-TYPE WIG AIRCRAFT



Кощаева Екатерина Ивановна – аспирант кафедры «Технология самолетостроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kete1984@mail.ru.

Ms.Yekaterina I. Koschajeva – PhD candidate, Dep. Of Aircraft Engineering of the State Komsomolsk-on-Amur Technical University (Komsomolsk-on-Amur). Email: kete1984@mail.ru.



Фролов Владимир Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология самолетостроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

Mr.Vladimir V. Frolov – PhD in Engineering, Associate Professor, Dep. Of Aircraft Engineering of the State Komsomolsk-on-Amur Technical University (Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. В статье рассмотрены различные теории расчета аэродинамических характеристик крыла вблизи экрана и точность этих теорий с точки зрения применения их на практике.

Summary. The paper reviews a number of design theories for the calculation of aerodynamic properties of a wing gliding close to ground, and their accuracy in practical application.

Ключевые слова: экраноплан, крыло, аэродинамические коэффициенты, оценка теорий.

Keywords: WIG aircraft, wing, aerodynamic coefficients, theory evaluation.

УДК 553.6.013

Известно, что при полете вблизи экрана уменьшается индуктивное сопротивление и увеличивается подъемная сила крыла, что приводит к существенному увеличению аэродинамического качества летательного аппарата. Снижение индуктивного сопротивления происходит вследствие уменьшения схода потока за крылом, а подъемная сила возрастает из-за увеличения давления на нижней поверхности крыла вследствие уменьшения скорости потока между крылом и экраном.

В настоящее время существует большое количество теорий для расчета аэродинамических характеристик крыла вблизи экрана. В связи с этим целесообразно рассмотреть точность этих теорий с точки зрения применения их на практике.

Согласно работе [2], зависимость индуктивного сопротивления от коэффициента подъемной силы крыла имеет вид

$$C_{xi} = (1 - \sigma) \cdot \frac{C_{ya}^2}{\pi \cdot \lambda},$$

где σ – поправка, которая учитывает уменьшение индуктивного сопротивления крыла при приближении к экрану; C_{ya} – коэффициент подъемной силы крыла; λ – геометрическое удлинение крыла.

Поправка σ определяется по формуле

$$\sigma = \exp(-2,48 \bar{h}_1^{0,768}), \quad \bar{h}_1 = \frac{h_1}{l},$$

где h_1 – расстояние от экрана до точки, соответствующей 1/4 хорды крыла (см. рис. 1); l – размах крыла.

Согласно рис. 1, величина \bar{h}_1 будет определяться из выражения

$$\bar{h}_1 = \frac{\bar{h} + 0,75 \cdot \sin \alpha}{\lambda},$$

где \bar{h} – относительная высота полета; α – угол атаки.

$$\bar{h} = \frac{h}{b}.$$

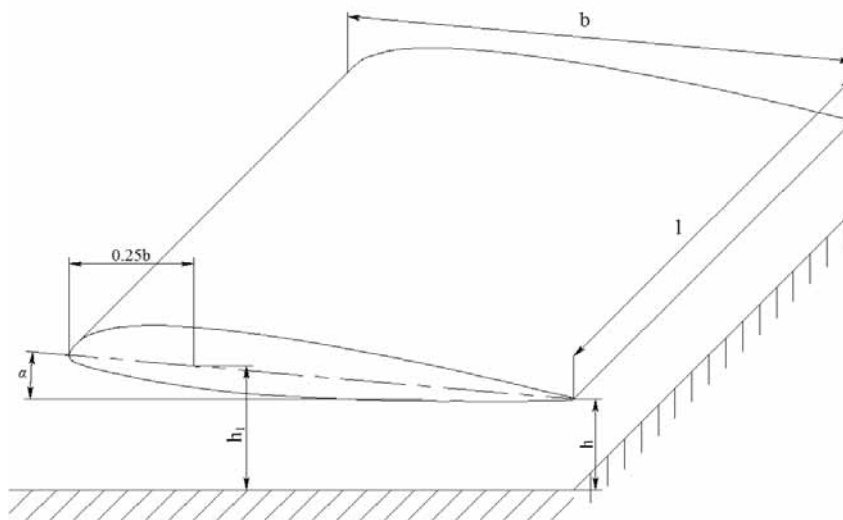


Рис. 1. Профиль крыла

Для построения зависимости $C_{ya}(\alpha, \bar{h})$ при изменении относительной высоты необходимо определить изменение угла схода потока $\Delta\varepsilon$ за крылом в градусах при заданных значениях угла атаки α и коэффициента C_{ya}

$$\Delta\varepsilon = \frac{18,24 C_{ya} \sigma}{\lambda}.$$

При заданном C_{ya} новый угол атаки $\alpha_{\text{нов}}$ определится по формуле

$$\alpha_{\text{нов}} = \alpha - \Delta\varepsilon.$$

Согласно квадрупольной теории А.Н. Панченкова [4], аэродинамические коэффициенты (C_{xi} , C_{ya}) крыла произвольного удлинения вблизи экрана будут определяться по формулам

$$C_{xi} = \frac{C_{ya}^2}{\pi \cdot \lambda} \cdot \zeta.$$

$$C_y = \frac{\Psi \cdot a_\infty \cdot \alpha}{C_2(\lambda) \cdot \left(1 + \frac{\Psi \cdot \zeta \cdot a_\infty}{\pi \cdot \lambda_\phi}\right)},$$

где Ψ – фактор подъемной силы; a – экспериментальное значение, равное 5,45; α – угол атаки крыла, рад; ζ – фактор индукции; λ_ϕ – фиктивное удлинение крыла.

$$\lambda_\phi = \frac{\lambda \cdot C_2(\lambda)}{1 + C_1(\lambda)},$$

где $C_2(\lambda) = e^{\frac{0,26}{\lambda}}$; $C_1(\lambda) = e^{-0,26\lambda}$.

Фактор подъемной силы

$$\Psi = 1 + \tau^2 + \frac{1}{2}\tau^4 + \frac{3}{4}\tau^6, \quad \tau = \sqrt{1 + 4\bar{h}^2} - 2\bar{h}.$$

Фактор индукции

$$\zeta = 1 - \sigma(\tau_\lambda),$$

$$\sigma(\tau_\lambda) = 0,5\tau_\lambda^2 + 0,25\tau_\lambda^4 + 0,0625\tau_\lambda^6 + 0,0469\tau_\lambda^8 + 0,0257\tau_\lambda^{10} + 0,0188\tau_\lambda^{12} + 0,0091\tau_\lambda^{14}$$

$$\tau_\lambda = \sqrt{1 + 4\bar{H}^2} - 2\bar{H},$$

где \bar{H} – относительное отстояние по размаху крыла

$$\bar{H} = \frac{\bar{h}}{\lambda}.$$

На основе результатов проведенного численного эксперимента методом квадратичной аппроксимации автором [1] получены формулы для расчета коэффициентов подъемной силы и индуктивного сопротивления для крыла прямоугольной формы:

$$C_y = (\alpha, \bar{h}, \lambda) = 1,5 \cdot \frac{\alpha^{0,942} \cdot \lambda^{0,783}}{\bar{h}^{0,246}},$$

$$C_{xi}(\alpha, \bar{h}, \lambda) = 2,24 \frac{C_{ya}^2}{\pi \lambda} \bar{h}^{0,737}.$$

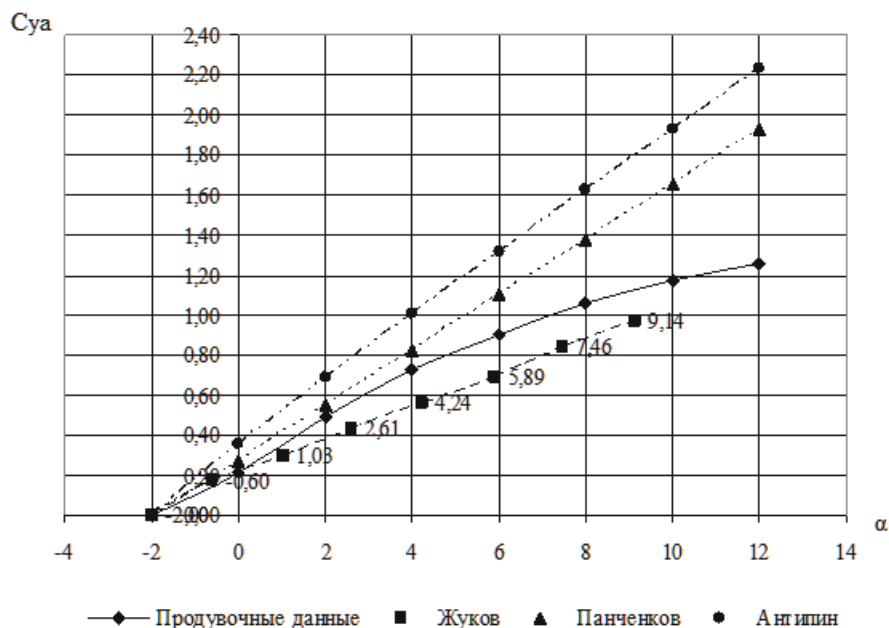


Рис. 2. Зависимость коэффициента подъемной силы от угла атаки

Результаты расчетов, выполненных по вышеуказанным теориям при следующих исходных данных: аэродинамические характеристики прямоугольного крыла (взяты с результатов продувок [3]) при $\lambda = 5$ и $\bar{h} = 0,15$ в диапазоне углов $\alpha = 0 - 12^\circ$ при $\alpha_0 = -2^\circ$, приведены на рис. 2, 3.

Из рис. 2, 3 видно, что наиболее точные расчеты по определению аэродинамических коэффициентов показывает теория В.И. Жукова. Это объясняется тем, что в этой теории учитывается только изменение индуктивного сопротивления, что предполагает наличие исходных зависимостей (поляры $C_{ya}(C_{xa})$ и $C_{ya}(\alpha)$). Данные зависимости могут быть взяты по продувкам крыльев различных удлинений вне экрана.

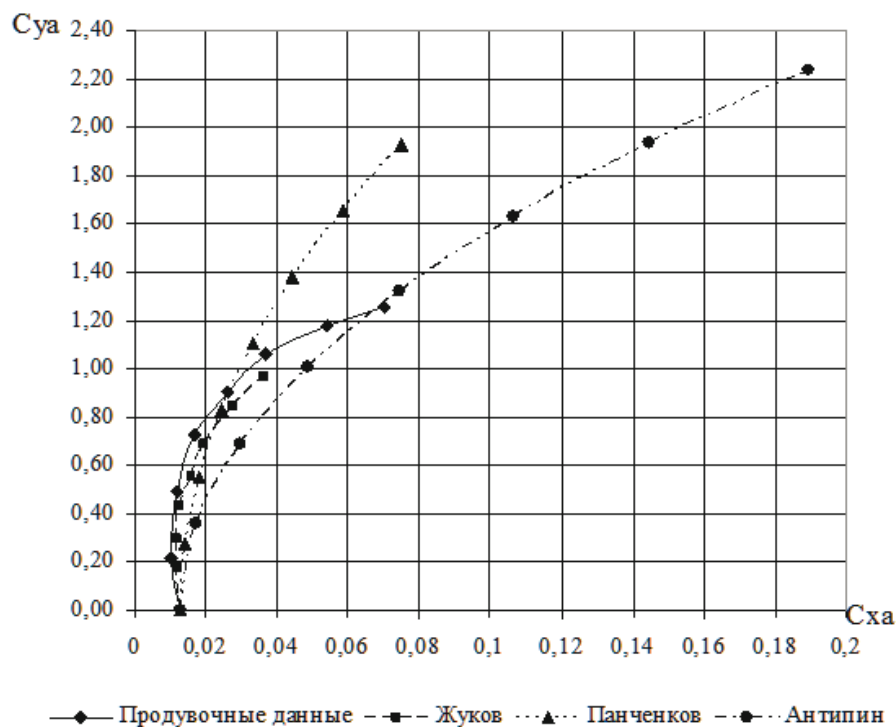


Рис. 3. Зависимость коэффициента подъемной силы от коэффициента лобового сопротивления

Менее точными являются теории А.Н. Панченкова и М.И. Антипина. Это связано с тем, что аэродинамические коэффициенты считаются по формулам, зависящим от относительной высоты полета и прямо пропорциональным углу атаки, что противоречит результатам продувок [3]. Особенно это проявляется при малых отстояниях крыла от экрана, что, в свою очередь, приводит к большим погрешностям в расчетах аэродинамических характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антипин, М. И. Анализ и выбор рациональной аэродинамической компоновки экраноплана : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / М. И. Антипин. – Иркутск, 2009.
2. Жуков, В. И. Особенности аэродинамики, устойчивости и управляемости экраноплана / В. И. Жуков. – М. : Изд. отдел ЦАГИ, 1997. – 80 с.
3. Мусатов, Р. А. Особенности влияния удлинения прямоугольных крыльев на аэродинамические характеристики вблизи экрана / Р. А. Мусатов. – Гидроавиасалон, 2002. – С. 273-280.
4. Панченков, А. Н. Экспертиза экранопланов / А. Н. Панченков, П. Т. Драчев, В. Н. Любимов. – Новгород : ООО «Типография «Поволжье», 2006. – 635 с.

Чижиумов С. Д.
S.D. Chizhiumov

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ МОРСКИХ ВОЛН

TRANSFORMATION OF SEA WAVE ENERGY



Чижиумов Сергей Демидович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Кораблестроение» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина 27; (4217) 54-30-74. E-mail: chizhium@rambler.ru.

Mr. Sergey D. Chizhiumov – PhD in Engineering, Professor of the Department of Shipbuilding, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur, Russia). Mailing address: 27 Lenin Av., Komsomolsk-on-Amur, Russia. Phone: (4217) 54-30-74. E-mail: chizhium@rambler.ru.

Аннотация. Рассматривается проект экологически чистой волновой электростанции (ВлЭС) для прибрежных районов Дальнего Востока. Предлагаются конструкции преобразователя энергии волн на основе патента Рассела. Кроме использования потенциальной энергии волн предлагаются способы преобразования кинетической энергии. Разработаны расчётные модели и выполнен численный гидродинамический анализ. Показано сравнение экономических параметров ВлЭС и других электростанций. Преимущества ВлЭС: экологическая чистота, малая стоимость и неистожимые запасы энергии, малые капитальные затраты на строительство, быстрая окупаемость, развитие прибрежных промыслов и судоходства.

Summary. The paper deals with the problem of power engineering in the coastal regions of the Russian Far East. The features and advantages of wave energy plants are analyzed. The design of a wave energy converter based on the Russell patent is offered. Apart from reliance on the potential wave energy, an additional tool for converting the kinetic wave impact energy is offered. Preliminary calculations for some models of wave converters with different shapes are executed along with hydrodynamic analysis. A comparison of main economical parameters of the project with other types of power stations is shown. The advantages of wave energy power stations: environmental aspect, small cost of the energy and its potentially inexhaustible source, low capital costs, a perspective of a new momentum for the development of such sectors as inshore facilities and shipping industry.

Ключевые слова: волновая электростанция, гидродинамика, численное моделирование, энергия, морские волны.

Keywords: Wave energy converter, hydrodynamics, numerical modeling, energy, sea waves.

УДК 621.311.21-827: 532.593.3: 504.052

Введение

На Дальнем Востоке (ДВ) России районы, не подключенные к общей электрической сети, составляют 70 % территории. Энергетика Камчатской и Сахалинской областей базируется на привозном топливе: более 90 % электроэнергии производится на завозном мазуте. В связи с большими транспортными расходами стоимость выработки электроэнергии здесь превышает среднемировой показатель в 5-6 раз.

Эта проблема должна решаться. Однако способы её решения, которые предлагаются и фактически реализуются заинтересованными министерствами и крупными компаниями (Росатом, РАО ЕЭС и др.), являются экологически и социально опасными и экономически невыгодными. Так, например, строятся плавучие атомные электростанции для Камчатки и Чукот-

ки, которые никогда не окупятся. В то же время Росэнергоатом планирует создать до 2015 г. флотилию из семи плавучих АЭС [2].

Развитие энергетики на ДВ является экстенсивным. Под предлогом привлечения инвестиций проектируются и строятся крупные и экологически грязные объекты, с низким КПД, ориентированные на обеспечение добычи полезных ископаемых и экспорт энергоресурсов. Под предлогом необходимости решения существующих проблем и повышения эффективности управления происходит передел собственности, бюджетных средств и ответственности. Тем самым ДВ продолжает развиваться как сырьевой придаток крупных компаний [3] при падении уровня и качества жизни населения.

Между тем ДВ обладает огромным потенциалом для развития экологически чистой энергетики (ветровой, приливной, волновой и др.) на возобновляемых источниках. В конце 2009 г. одобрен проект стратегии развития энергетики ДВ. В нём предполагается увеличение доли возобновляемых источников энергии до 38 % к 2020 г. [6]. Однако этого недостаточно, и темпы развития по данному направлению в России сильно отстают от мировых. К тому же обоснованность некоторых проектов вызывает сомнение. Например, Тугурская приливная электростанция (ПЭС) мощностью до 4 ГВт планируется в малонаселённом районе, оторванном от основной энергосистемы. Её строительство вместе с развитием сети потребует больших капиталовложений, а эксплуатация в условиях малых объёмов промышленного производства будет неэффективной.

Очевидно, что для большинства отдалённых районов (Чукотки, Камчатки, Сахалина, Курильских островов и др.) требуются станции небольшой мощности.

Волновая энергия обладает более высокой по сравнению с ветром и солнцем плотностью энергии. Морские волны накапливают в себе энергию ветра на значительном пространстве разгона. Они являются, таким образом, природным концентратом энергии. Среднегодовой потенциал волновой энергии на ДВ представлен в табл. 1.

Таблица 1

Параметры волнения у побережья ДВ России

Район	Средняя мощность, кВт/м	Средняя высота, м	Наибольшая высота, м
Берингово море	40	2	15
Курилы	40	1,5 – 2	20
Охотское море	20 – 30	1,5	8
Японское море	10 – 20	1	5

Энергия волн имеет один из самых высоких показателей по практическому КПД среди нетрадиционных источников энергии. Средний практический КПД существующих волновых энергетических станций (ВлЭС) при преобразовании энергии в электричество составляет 30-80 %. Если принять КПД за 50 %, то технический потенциал ВлЭС прибрежной зоны длиной 10 км может составить 150 МВт (выработка энергии в среднем 1,4 млрд кВт·ч в год) – это существующая энергетика всей Камчатки.

Важным преимуществом волновой энергетики является возможность применения модульного принципа – последовательное сооружение блоков ограниченной мощности, без больших начальных затрат на капитальное строительство, свойственных ПЭС и ГЭС.

Обзорный анализ схем волновых преобразователей

В процессе анализа информационных источников в работе были рассмотрены около двух десятков реализованных и перспективных проектов. Перечислим некоторые основные типы ВлЭС [1; 4; 5; 7]: преобразователи энергии с качающимися шарнирно связанными элементами («утка» Солтера, плот Коккерела, «морские змеи», система поплавков Русецкого);



точечные устройства с поплавками (буи, волновые насосы, системы точечных устройств); гидропневматические плавучие системы (осциллирующие водяные колонны Масуды, кессонные волноломы с воздушными турбинами); гидропневматические береговые конструкции с кессонами и воздушными турбинами; качающиеся пластины; концентраторы волновой энергии («выпрямитель» Рассела, сужающиеся каналы ТАРСНАН, «дамба – атолл»).

Международное Энергетическое Агентство (IEA) разработало соглашение по океанским энергетическим системам (IEA-OES) с целью создания экономически эффективных и экологически чистых систем использования энергии морских волн и течений. В этом проекте участвуют США, Канада, страны ЕЭС, Япония, Мексика [8].

Следует отметить, что существуют также примеры неудачного опыта создания и эксплуатации ВлЭС. Однако при внимательном изучении этих проектов видно, что причина неудач кроется в недостаточно проработанных технологиях извлечения энергии волн, а именно:

1. Осциллирующий водяной столб (гидропневматический преобразователь) не может обеспечить высокий КПД, так как большая часть полезной работы теряется при сжатии воздуха. При этом практически не используется работа гидродинамических сил. Диапазон применений данного метода узок и ограничивается крупными волнами высотой более 2-3 м.

2. Известные концентраторы волновой энергии выполнены нерационально. ТАРСНАН требует больших затрат на постройку. Выпрямитель Рассела (в том виде, как он описан в работах [4, 7]) недостаточно проработан – размеры его элементов необходимо оптимизировать.

3. Точечные поплавокковые преобразователи имеют высокий КПД, но маломощны, а их подвижные элементы и якорные системы недостаточно надёжны при воздействии штормовых волн.

Таким образом, практическая эффективность волновых преобразователей может быть достигнута только путём тщательной проработки и согласования функциональных элементов. Следовательно, основная задача при создании эффективных ВлЭС состоит в оптимизации их параметров с учётом реальных условий на месте эксплуатации. Для этого необходим их анализ на основе физических и компьютерных экспериментов.

Варианты конструкции ВлЭС

В результате анализа проектов ВлЭС выбраны сооружения в виде железобетонных массивов – гигантов, устанавливаемых в зоне прибойных волн на глубинах до 7-10 м. Это позволяет, с одной стороны, уменьшить размеры сооружений, а с другой – более надёжно связать их с грунтом. Прибойные волны имеют большую крутизну, и их энергия более концентрирована по глубине и длине волны.

На рис. 1 приведена схема ВлЭС в поперечном разрезе. В её основе лежит патент «выпрямителя» Рассела. Напор станции h создаётся в результате наката волн и заполнения резервуара между фронтальной и задней стенками. Передняя часть фронтальной стенки обеспечивает взброс волны. Далее гребень волны откосным участком направляется вперёд и перехлёстывает через край стенки в бассейн. В подводной части задней стенки имеются отверстия – каналы с размещёнными в них гидрогенераторами. Площадь сечения каналов необходимо подбирать таким образом, чтобы в них обеспечивалась приемлемая скорость течения. Для этого должен поддерживаться максимальный уровень воды в бассейне, так как скорость течения в канале v зависит от перепада уровней воды h в бассейне и в море.

Таким образом, должны быть увязаны между собой площадь сечения каналов, объём бассейна и статистические параметры волнения. Кроме того, ширина бассейна между стенками и наклон экранирующей плиты подбираются таким образом, чтобы уменьшить образование внутренних волн в бассейне и их выплёскивание через фронтальную стенку.

В конструкции на рис. 1 используется только потенциальная энергия падающих в бассейн гребней волн. Кинетическая энергия расходуется при ударе об экран и при колеба-

ниях воды в бассейне. Для её использования в варианте установки, изображённом на рис. 2, предусмотрен подвижный экран на шарнирах, приводимый в движение ударами волн. Движение экрана передаётся гидравлическому преобразователю энергии. В результате эффективность ВлЭС повышается. В бассейне не образуются крупные, выплёскивающиеся наружу волны. Кроме того, податливый экран меньше сопротивляется экстремальным волновым нагрузкам, что повышает надёжность сооружения в целом.

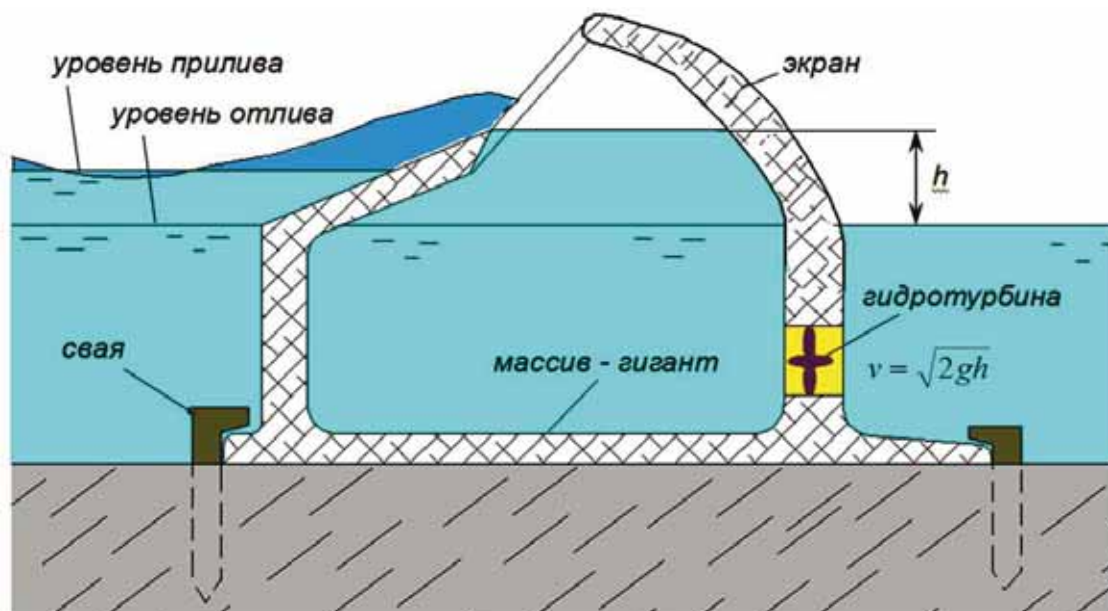


Рис. 1. Простой тип ВлЭС с низконапорными гидротурбинами

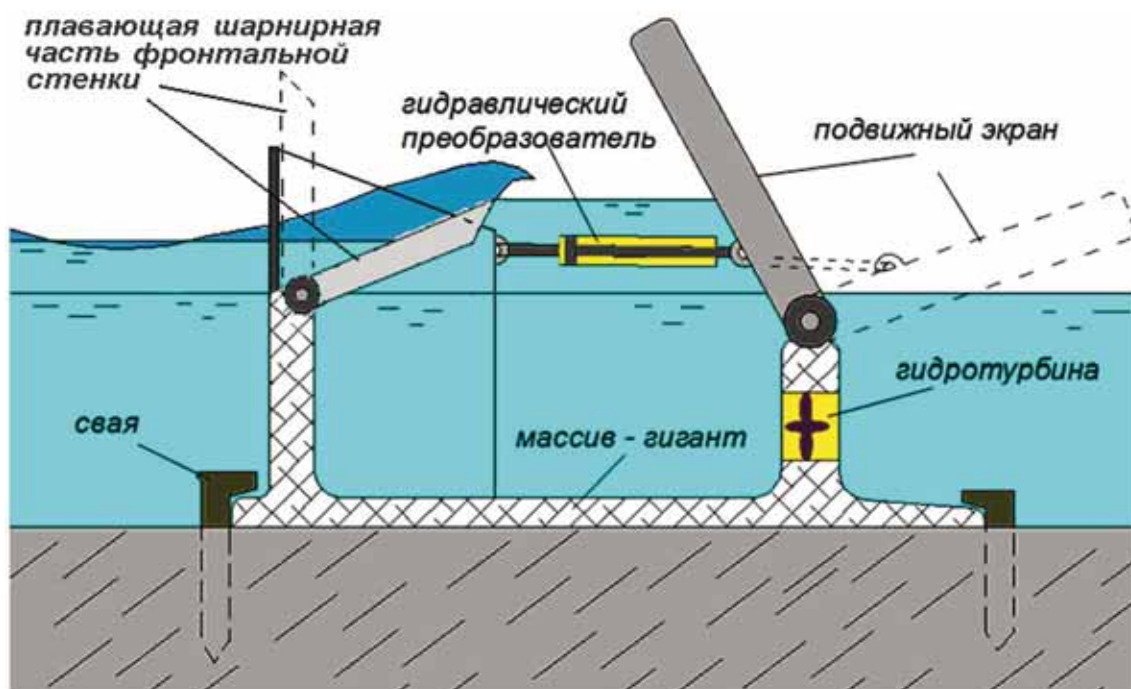


Рис. 2. ВлЭС с двумя типами преобразователей энергии и подвижной верхней частью фронтальной стенки

Для приспособления системы к разным уровням воды и размерам волн дополнительно может быть предусмотрена подвижная верхняя часть фронтальной стенки в виде шарнирно закреплённых плавучих понтонов. При этом автоматическое управление углом их наклона обеспечивается уровнем воды в бассейне (см. рис. 2).

Анализ гидродинамики

Как следует из описания конструкции ВлЭС, её поперечные размеры следует оптимизировать исходя из статистических параметров волнения на месте установки на основе анализа гидродинамических процессов. Этот анализ может быть выполнен после проведения экспериментов. После этого возможен вывод обобщённых проектных зависимостей. Для выполнения физических экспериментов идут подготовительные работы в опытовом бассейне.

Предварительные расчёты выполнены с помощью программного комплекса Flow-3D. При численном моделировании использована двумерная модель в натуральную величину. Жидкость невязкая, несжимаемая. Влиянием воздуха пренебрегается. Расчётная сетка: 400 x 25 ячеек (см. рис. 3). Так как движение нестационарное, при расчёте выполняется численное интегрирование уравнений движения по времени с автоматической адаптацией шага.

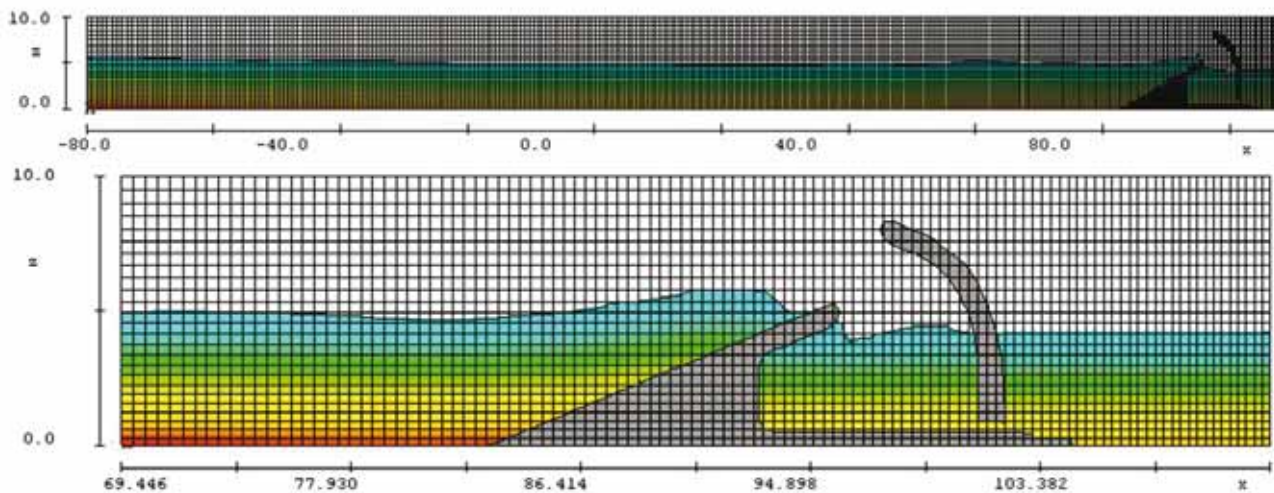


Рис. 3. Расчётная сетка компьютерной модели

Движение волн моделируется условным волнопродуктором путём задания переменных скоростей движения жидкости на левой границе сетки, имитируя периодическое поступательное движение волнопродуктора по оси x . Такое граничное условие не соответствует распределению скоростей в поперечном сечении свободной волны, поэтому вблизи левой границы расчётной сетки волны имеют «неправильную» структуру. По мере дальнейшего движения волны приобретают реальный профиль. Высота первой волны при подходе к сооружению ВлЭС составляет 1,5 м. Следующие волны имеют структуру, близкую к регулярной, а их средняя высота равна 0,75 м.

Рассмотрены модели с несколькими формами сооружения ВлЭС и разной площадью подводных каналов. На рис. 4 – 7 представлены примеры расчётов гидродинамики для разных вариантов сооружений.

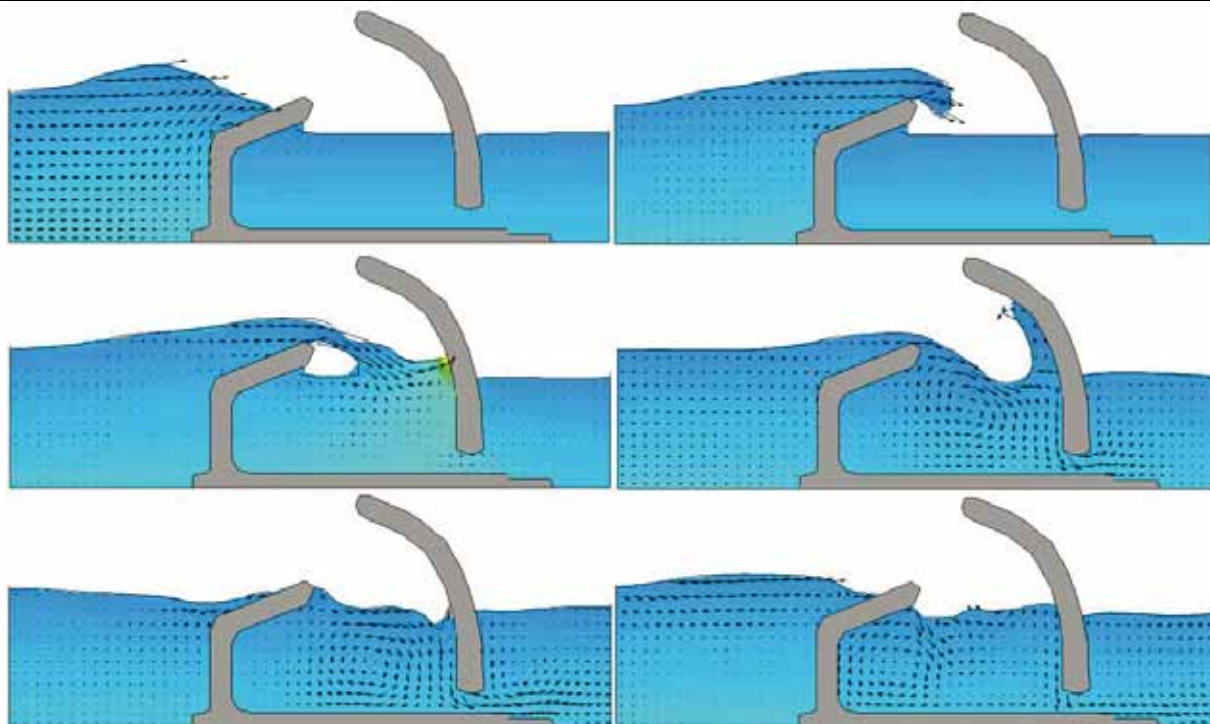


Рис. 4. Пример анализа гидродинамики ВлЭС с вертикальной фронтальной стенкой

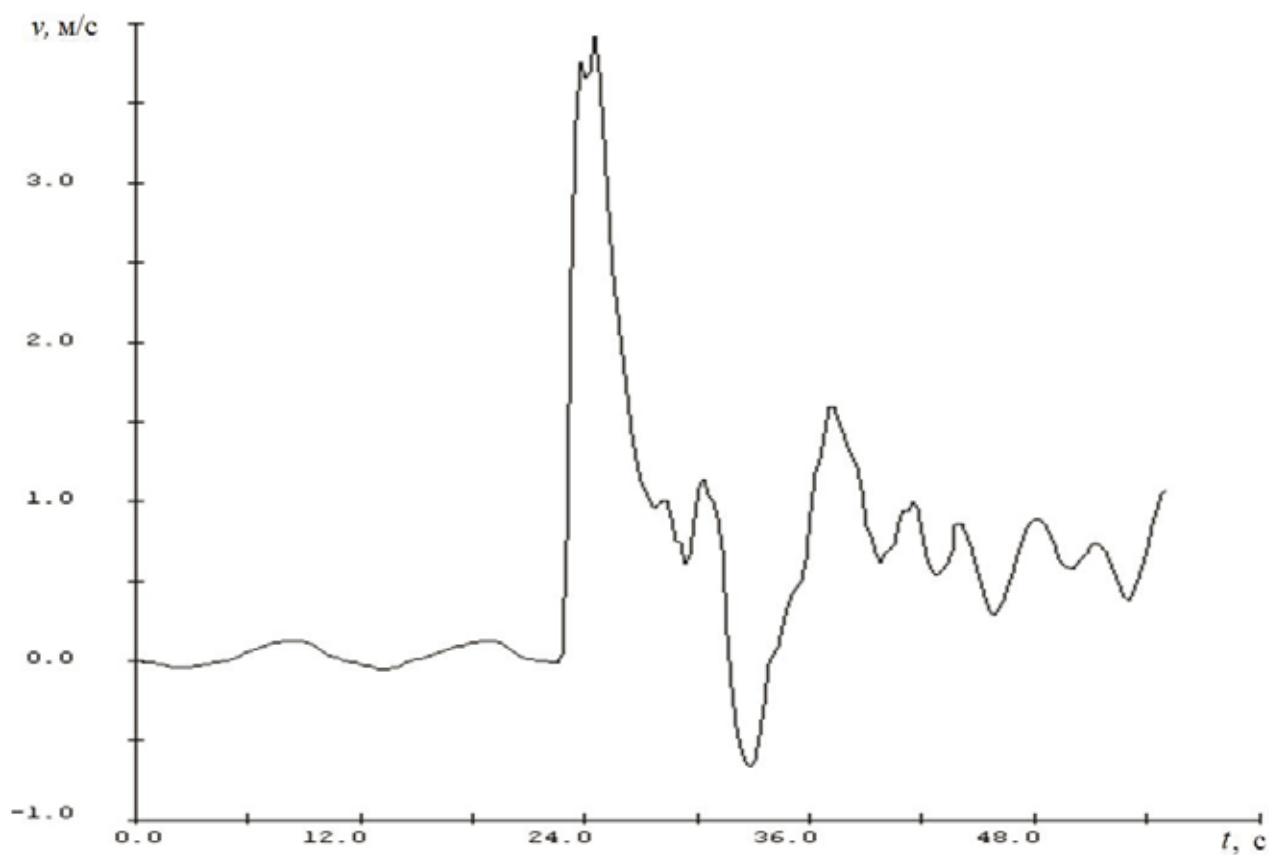


Рис. 5. Скорости течения (м/с) в подводном канале с площадью сечения $0,7 \text{ м}^2$ для модели, представленной на рис. 4

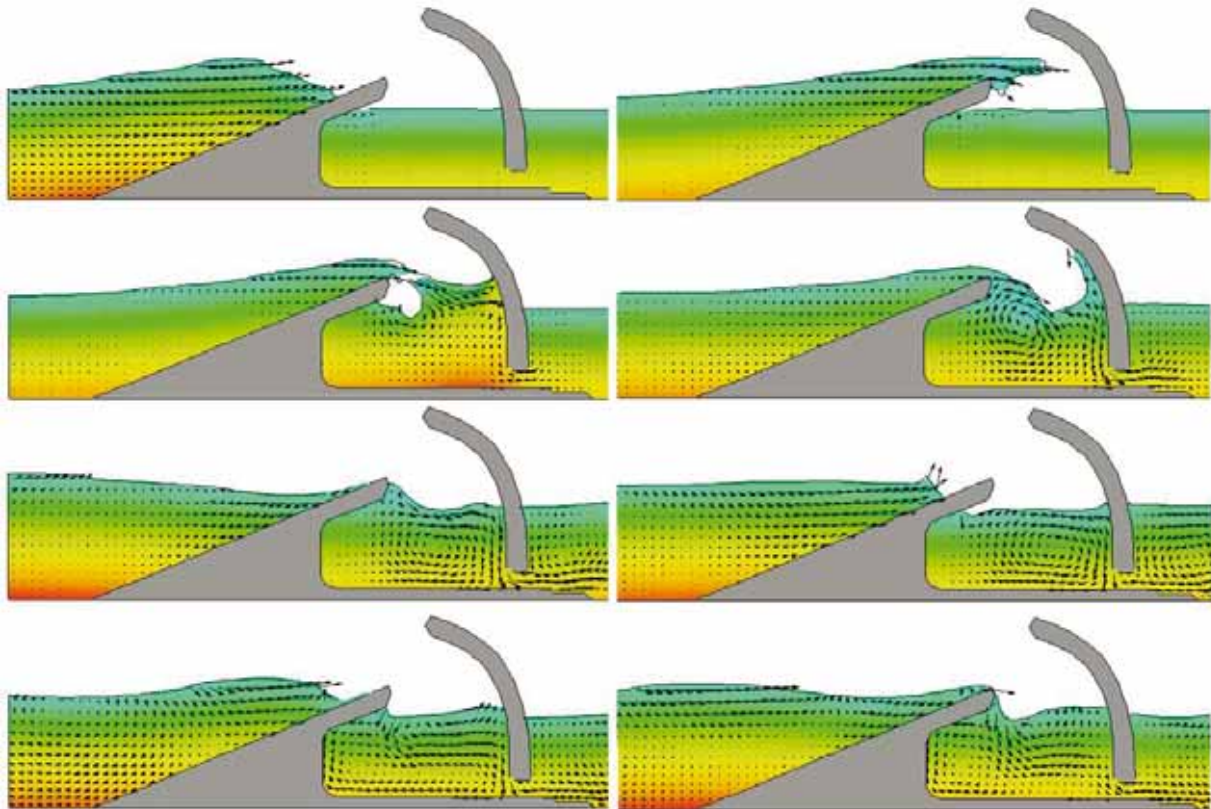


Рис. 6. Пример анализа гидродинамики ВлЭС с откосной фронтальной стенкой

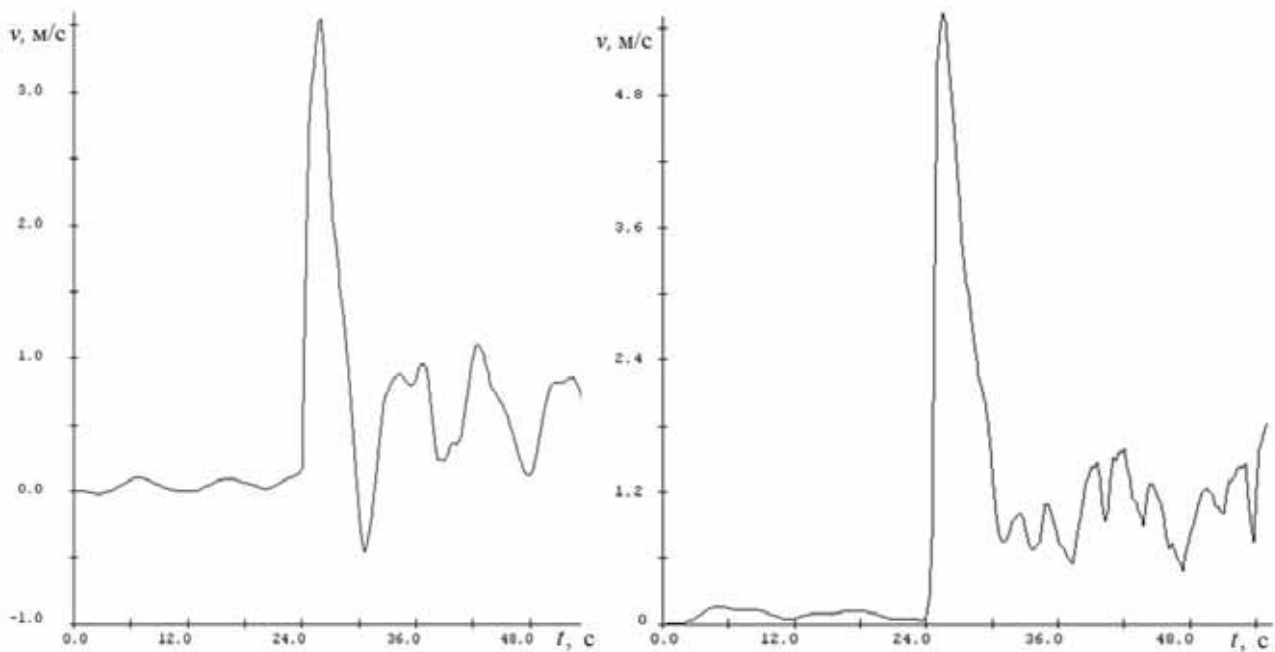


Рис. 7. Скорости течения в подводном канале (м/с) для модели, представленной на рис. 6 (с площадью сечения $0,7 \text{ м}^2$ и $0,4 \text{ м}^2$ соответственно)

По результатам проведённых расчётов сделан ряд выводов:

1. Фронтальная стенка может быть откосной со стороны, обращённой к морю. Однако результаты расчётов показали, что при коротком откосном участке гребень волны растёт не намного больше, чем при вертикальной стенке. Кроме того, волна частично разрушается на откосе, а частично отражается. Отражённая волна скатывается навстречу следующему гребню и существенно гасит его. А самое главное, резко увеличивается ширина, а значит и стоимость сооружения.

2. Так как сооружение с пологой откосной стенкой, очевидно, будет слишком материалоёмким, рекомендуется устанавливать сооружение в месте, где существует естественный пологий подъём дна в сторону берега, обеспечивающий увеличение высоты волн и концентрирование их энергии по ширине (прибой).

3. Эффективной и простой оказалась стенка с вертикальной подводной частью и откосной вершиной на поверхности. При этом степень отражения волн практически не увеличилась по сравнению с откосной стенкой.

4. Диаметр подводных каналов должен подбираться так, чтобы при наибольшем уровне воды в бассейне она не выплёскивалась, а полностью проходила через генераторы.

5. В результате волнения в бассейне скорость потока в подводном канале неравномерная. Для сглаживания пульсаций давлений можно предложить волногасительные устройства (в частности, в виде подвижных шарнирных стенок, приведенных на рис. 2). Кроме того, генераторы должны быть приспособлены к работе в режиме пульсирующих потоков.

6. Выпуск воды из бассейна можно предусмотреть через фронтальную стенку. При этом пульсации течения в подводном канале увеличиваются и имеют знакопеременный характер. Существуют генераторы, работающие в условиях переменного направления потока. Если их использовать, то при такой конструкции ВлЭС её эффективность может быть увеличена, так как будет меньшая степень отражения волн и будет использоваться их энергия в подводной части.

7. Ширина бассейна и форма задней стенки должны быть оптимизированы с целью исключения образования отражённых волн, переплёскивающихся обратно через переднюю стенку.

Оценка эффективности

Мощность гидроэнергетической установки определяется выражением

$$N = \eta_m \eta_{э} \rho g Q h ,$$

где η_m – КПД гидротурбины; $\eta_{э}$ – КПД электрогенератора; $Q = v \cdot S$ – расход воды через гидротурбину; h – напор воды, подведенный к гидротурбине. Для современных турбин и генераторов характерны значения: $\eta_m = 0,85 \dots 0,9$; $\eta_{э} = 0,95 \dots 0,97$.

Расчёты по этой формуле при напоре от 0,5 до 1 м дают значения мощности на единицу длины фронта ВлЭС от 6 до 20 кВт/м. Если использовать энергию ударов волн (с помощью подвижного экрана с дополнительными гидравлическими преобразователями энергии), то по предварительным оценкам мощность ВлЭС возрастёт более чем в два раза.

Сравнение экономических показателей ВлЭС с другими энергетическими системами приведено в табл. 2.

Социальная значимость данного проекта состоит в том, что он направлен на развитие экологически чистых малых и средних энергосистем, ориентированных на социальное обустройство населения, снижение цен на энергию, защиту от штормовых волн и цунами, сопутное развитие прибрежного судоходства и местных промыслов.

Практическая реализация проекта позволит отказаться от привозного топлива для отдалённых прибрежных районов ДВ и приведёт к качественному улучшению уровня жизни населения. Строительство ВлЭС возможно с последовательным наращиванием мощности,



без больших начальных затрат. Волновая энергия является неисчерпаемой и экологически чистой.

Одновременное применение ВлЭС в качестве волноломов, рейдовых причалов и других сооружений позволит улучшить условия прибрежного судоходства, рыболовства, развития разных видов промысла и разведения морских культур. При воздействии цунами ВлЭС, принимая на себя энергию волн, может частично или полностью защитить территорию.

Таблица 2

Эффективность ВлЭС в сравнении с другими энергосистемами

ЭС	Удельная стоимость, \$/кВт	Срок окупаемости, год	Наим. нач. капиталовложения, млн \$	Экологичность	Другие особенности
АЭС	7200	11	330	- - -	Экологическая опасность, ограниченные запасы дорогого топлива
ТЭС	1000 (6500 – на ДВ)	4	1,3	- -	Выбросы на ДВ: 40 млн т CO ₂ и других вредных веществ в год
ГЭС	1200	2	300	-	Длительность строительства, затопление территории
ВЭС	1500	1,5	1	+	Ограниченный срок службы
ПЭС	~1000	0,3	250	+	–
ВлЭС	600	0,7	0,3	+	Защита от крупных волн, причалы

ЛИТЕРАТУРА

1. Волшаник, В. В. Использование энергии ветра, океанских волн и течений / В. В. Волшаник, В. В. Зубарев, М. О. Франкфурт. – М. : ВИНТИ, 1983. – 100 с. (Итоги науки и техники. Сер. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии)
2. Герман Греф сомневается в окупаемости плавучих АЭС. РИА Новости. – 17.05.2007. Режим доступа: <http://www.atominfo.ru/news/air1417.htm>.
3. Кизилова, Л. Включить всю мощь Востока / Л. Кизилова // Мировая энергетика. – 2008. – № 10. Режим доступа: http://www.worldenergy.ru/doc_20_64_3365.html.
4. Коробков, В. А. Преобразование энергии океана / В. А. Коробков. – Л. : Судостроение, 1986. – 279 с.
5. Лабейш, В. Г. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учеб. пособие / В. Г. Лабейш. – СПб. : СЗТУ, 2003. – 79 с.
6. Одобрен проект стратегии развития электроэнергетики Дальнего Востока до 2020 г. и на перспективу до 2025 г. : Пресс-релиз ОАО "РАО Энергетические системы Востока". – 19.11.2009. Режим доступа: <http://www.energotrade.ru/articles/5862/>
7. Росс, Д. Энергия волн / Д. Росс. – Л. : Гидрометеиздат, 1981. – 112 с.
8. IEA-OES "IEA Ocean Energy Systems Implementing Agreement – 5 Year Strategic Plan 2007 – 2011" // IEA-OES publication, 2006. Режим доступа: www.iea-oceans.org.

Золотова Т. В.
T.V. Zolotova

**МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ РИСКОМ В ЗАДАЧАХ СТРАТЕГИЧЕСКОГО
И ФОНДОВОГО ИНВЕСТИРОВАНИЯ**

**RISK MANAGEMENT METHODS FOR STRATEGIC INVESTMENT
AND PRIVATE EQUITY**



Золотова Татьяна Валерьяновна – кандидат физико-математических наук, доцент, докторант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: tgold11@mail.ru.
Ms. Tatiana V. Zolotova – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, doctoral candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. Рассмотрены некоторые функции риска, зависящие от выбора стратегии в сложной системе. Показано применение функций риска для принятия решений относительно инвестиций в ценные бумаги, а также финансирования различных проектов.

Summary. The paper considers some risk functions that depend on a choice of strategy in complex systems. Shown is the application of these risk functions to decision-making concerning investments into securities and financings of various projects.

Ключевые слова: функция риска, управление проектами, фондовое инвестирование, математическое программирование, свертка критериев.

Keywords: risk functions, project management, share investment, mathematical programming, convolution of criteria.

УДК 35.073.5

Введение

В отношении понятия «риск» до сих пор не сложилось однозначного толкования. Это объясняется сложностью данного явления и его недостаточным теоретическим изучением [1]. В существующих трактовках риск определяется:

- как возможная опасность потерь, вытекающая из специфики тех или иных явлений природы, видов деятельности человеческого общества;
- возможность наступления неблагоприятного события, связанного с различными видами потерь;
- вероятность неблагоприятного исхода операции, приводящего к возможному ущербу;
- вероятность неожиданного воздействия определенных факторов, под влиянием которых может произойти отклонение результата от запланированной величины;
- степень неопределенности или непредсказуемости процесса функционирования системы.

Данные определения риска относятся к различным сферам деятельности. Общим для них является связывание риска с вероятностью наступления некоторого события (исхода), приводящего к убыткам, ущербу, потере доходов или появлению дополнительных расходов, отклонению результата от запланированной величины.

Новым направлением совершенствования системы управления различными видами безопасности сложной системы (экономической, технической и т.д.) является процедура анализа и управления риском [3, 6], суть которой сводится к выявлению ситуаций риска, возни-

кающих в процессе деятельности, выбору подходящей оценки риска, разработке и реализации мер по снижению уровня риска. Понятие «ситуация риска» можно определить как сочетание, совокупность различных обстоятельств и условий, создающих определенную обстановку для возникновения того или иного неблагоприятного события.

Возникновение неблагоприятного события может привести к тому, что система не достигнет ожидаемого результата своей деятельности. Поэтому становится актуальной изучение деятельности системы в условиях риска. В основе выбора оценки риска возникновения неблагоприятного события лежит выбор меры, определяющей возможные потери или ущерб в виде некоторой функции ущерба или потерь, зависящей от управления или стратегии в системе. Управляющее воздействие на риск представляет собой такую стратегию системы, которая приводит к уменьшению ущерба или потерь, т.е. риска.

Целью данного исследования является разработка новых математических моделей управления риском с использованием различных функций риска и применение разработанных моделей к статическим задачам стратегического и фондового инвестирования. В связи с тем, что в статических моделях не учитывается фактор времени, дисконтирование денежных потоков в данном случае не производится.

Функции риска

1. Абсолютная функция риска

Пусть x – стратегия лица, принимающего решение (ЛПР), которая может быть скалярной или векторной величиной; $r(x)$ – случайная функция, определяющая результат деятельности системы в случае возникновения неблагоприятного события; $d(x)$ – функция, определяющая ожидаемый результат деятельности системы, не связанный с возможностью возникновения неблагоприятного события, приводящего к убыткам или потерям. В данном случае имеется в виду, что $d(x)$ не обязательно математическое ожидание величины $r(x)$, и возможно $d(x) \geq r(x), \forall x$, но, в частности, $d(x) = Mr(x) = \bar{r}(x)$, где обозначение M следует понимать как математическое ожидание. Отклонение $r(x)$ от $d(x)$ представляет собой функцию потерь системы. Функцию риска будем задавать в соответствии с выбранной метрикой, считая вероятности возникновения неблагоприятных событий известными.

На наш взгляд, можно выделить следующие абсолютные функции риска $Risk_{abs}$ для выбранной функции потерь.

В общем случае в метрике l_1 классическая функция риска имеет вид

$$Risk_{absl_1}(x) = M(|r(x) - d(x)|), \quad (1)$$

где $d(x) = Mr(x)$. Если $d(x)$ не является математическим ожиданием и имеет место $d(x) \geq r(x), \forall x$, то в качестве функции риска в метрике l_1 примем

$$Risk_{absl_1}(x) = M(d(x) - r(x)). \quad (2)$$

Преимущество определения функции риска (1) заключается в том, что при некоторых предположениях относительно типа функций $r(x)$ и $d(x)$ задачу минимизации риска можно свести к задаче математического программирования, для решения которой разработан математический аппарат.

Согласно метрике l_2^2 , оценка риска есть дисперсия

$$Risk_{absl_2^2}(x) = M(r(x) - d(x))^2. \quad (3)$$

Метрика l_2 приводит к функции риска в виде среднеквадратического отклонения

$$Risk_{absl_2}(x) = (M(r(x) - d(x))^2)^{1/2}. \quad (4)$$

Для функций риска (3) и (4) $d(x)$ является математическим ожиданием.

Использование функции риска (4) удобно для некоторых постановок задач, так как позволяет свести исходные задачи к определенному типу задач математического программирования.

Если деятельность системы зависит от значения некоторого параметра $h \in H$, влияющего на результат $r(h, x)$, или система состоит из H подсистем, влияющих на общий суммарный результат системы, то имеет смысл говорить о максимальной функции риска [10]. Таким образом, в метрике l_∞ максимальная функция риска может иметь одну из следующих форм:

$$Risk_{absl_1, cl, l_\infty}(x) = \max_{h \in H} M(|r(h, x) - d(h, x)|), \quad (5)$$

$$Risk_{absl_1, l_\infty}(x) = \max_{h \in H} M(d(h, x) - r(h, x)), \quad (6)$$

$$Risk_{absl_2^2, l_\infty}(x) = \max_{h \in H} M(r(h, x) - d(h, x))^2, \quad (7)$$

$$Risk_{absl_2, l_\infty}(x) = \max_{h \in H} (M(r(h, x) - d(h, x))^2)^{1/2}. \quad (8)$$

Если система стремится к увеличению ожидаемого результата своей деятельности $d(x)$ и одновременно уменьшению риска, то задача управления риском является двухкритериальной [4]. Используя функцию риска (1) и свертку критериев, приходим к задаче

$$\min_{x \in X} G(-d(x), M(|r(x) - d(x)|)), \quad (9)$$

где X – множество допустимых стратегий системы; G – вид свертки (например, можно взять свертку типа суммы с весовыми коэффициентами).

Аналогично для абсолютных функций риска (2), (3) и (4).

При использовании метрики l_∞ задача снижения риска с функцией риска (5) примет вид

$$\min_{x \in X} G(-f(x), \max_{h \in H} M(|r(h, x) - d(h, x)|)), \quad (10)$$

где функция $f(x)$ определяет ожидаемый результат деятельности системы.

В зависимости от содержательного смысла в качестве функции $f(x)$ можно брать, например, одну из следующих функций:

$$f(x) = d(\arg \max_{h \in H} M(|r(h, x) - d(h, x)|), x), \quad (11)$$

$$f(x) = \sum_{h=1}^H d(h, x). \quad (12)$$

2 Относительная функция риска

Иногда требуется оценить риск на единицу выгоды или выигрыша. В этой ситуации можно использовать относительные функции риска $Risk_{rel}$. В соответствии с выбранной метрикой рассмотрим следующие относительные функции риска:

$$Risk_{rell_1}(x) = \frac{M(|r(x) - d(x)|)}{d(x)}, \quad (13)$$

$$Risk_{rell_2}(x) = \frac{(M(r(x) - d(x))^2)^{1/2}}{d(x)}, \quad (14)$$

$$Risk_{rell_1, l_\infty}(x) = \frac{\max_{h \in H} M(|r(h, x) - d(h, x)|)}{f(x)}, \quad (15)$$

$$Risk_{rell_2, l_\infty}(x) = \frac{\max_{h \in H} (M((r(h, x) - d(h, x))^2))^{1/2}}{f(x)}. \quad (16)$$

Здесь управление риском заключается в выборе такой стратегии системы x , чтобы минимизировать относительную функцию риска. Например, для функции риска (13) получаем задачу

$$\min_{x \in X} \frac{M(|r(x) - d(x)|)}{d(x)}. \quad (17)$$

Аналогичные постановки задач можно сформулировать для других относительных функций риска (14), (15), (16). При этом можно говорить, что относительная функция риска является сверткой типа отношения.

3 Оценка мероприятий по снижению риска

Принятие решений по снижению риска предусматривает оценку экономической эффективности мероприятий по снижению риска. В качестве функции риска может использоваться величина экономического ущерба на единицу затрат на реализацию рассматриваемого мероприятия или совокупности таких мероприятий. Пусть $C(x)$ – неотрицательная функция затрат на реализацию мероприятий по снижению риска. Используя абсолютные функции риска (1) – (8), определим новые относительные функции риска. Например, для абсолютной функции риска (2) имеем

$$Risk_{rell_1, C}(x) = \frac{M_{C(x)}(d(x) - r(x))}{C(x)}, \quad (18)$$

где $M_{C(x)}(d(x) - r(x))$ означает, что математическое ожидание величины $d(x) - r(x)$ зависит от значения $C(x)$ (например, через условные вероятности).

В большинстве случаев на объем материальных средств, расходуемых на мероприятия по снижению риска, наложены ограничения. Тогда задача управления риском с использованием свертки критериев определенного типа G будет иметь вид

$$\min_x G(-d(x), \frac{M_{C(x)}(d(x) - r(x))}{C(x)}), \quad (19)$$

$$C(x) \leq C_{\max}, \quad x \in X,$$

где C_{\max} – максимальный объем имеющихся в распоряжении средств.

Если руководствоваться принципом нормирования, то постановка задачи управления риском примет другой вид

$$\min_x G(-d(x), C(x))$$

$$\frac{M_{C(x)}(d(x) - r(x))}{C(x)} \leq Risk_{re}, \quad x \in X, \quad (20)$$

где $Risk_{re}$ есть приемлемый уровень риска. Аналогично для абсолютной функции риска (6).

4 Вероятность как функция риска

Пусть известно некоторое требуемое значение результата деятельности системы r_α . Тогда функцию риска можно представить в виде

$$Risk_{prob\alpha}(x) = P(r(x) < r_\alpha). \quad (21)$$

Для ожидаемого результата деятельности системы функции риска есть

$$Risk_{probr}(x) = P(r(x) < d(x)), \quad (22)$$

$$Risk_{prob\delta}(x) = P(d(x) - r(x) \geq \delta), \quad \delta > 0. \quad (23)$$

Для функций риска (21) – (23) задачи управления риском можно представить в виде

$$\min_{x \in X} P(r(x) < r_\alpha). \quad (24)$$

$$\max_x d(x) \quad (25)$$

$$P(r(x) < d(x)) \leq \alpha, \quad x \in X.$$

$$\max_x d(x) \quad (26)$$

$$P(d(x) - r(x) \geq \delta) \leq \beta, \quad x \in X.$$

Методы управления риском в задачах стратегического инвестирования

Предположим, что существует некоторый центр (государство, регион, корпорация и т.д.), имеющий в своем распоряжении некоторую сумму денег для финансирования множества различных проектов (программ), например проектов, связанных с перестройкой технологии производства, строительством нового микрорайона, усовершенствованием системы образования, разработкой мероприятий по обеспечению безопасности и предупреждением чрезвычайных ситуаций в государстве или регионе и т.п. Необходимо распределить имеющиеся средства между проектами так, чтобы по возможности максимизировать суммарные выгоды от реализации проектов. Вопросы управления проектами освещены, например, в работе [2]. Для принятия разумного решения о реализации проектов считаем необходимым сравнивать ожидаемую отдачу от реализации проектов с возможными потерями в случае возникновения неблагоприятного события, которое может привести к уменьшению ожидаемой выгоды от реализации проекта.

Пронумеруем проекты индексом i , $i = 1, \dots, n$, n – количество рассматриваемых проектов. Пусть x_i – объем денег, выделяемых для реализации i -го проекта; $d_i(x_i)$ – функция ожидаемых выгод от внедрения i -го проекта; $r_i(x_i)$ – функции выгод от реализации i -го проекта в случае возникновения неблагоприятного события, $r_i(x_i) \leq d_i(x_i)$. Будем считать, что неблагоприятные события возникают с некоторой вероятностью, не связаны друг с другом, вероятность возникновения более одного неблагоприятного события пренебрежимо мала. Поэтому решение об объеме финансирования того или иного проекта удобно в данном случае принимать, руководствуясь функцией риска, заданной в метрике l_∞ , т.е. определять тот проект, который приносит максимальный риск.

Абсолютная функция риска в форме (6) имеет вид

$$Risk_{absl_1, l_\infty}(x) = \max_{1 \leq i \leq n} M(d_i(x_i) - r_i(x_i)). \quad (27)$$

Так как $d_i(x_i)$ не является случайной величиной, то

$$Risk_{absl_1, l_\infty}(x) = \max_{1 \leq i \leq n} (d_i(x_i) - Mr_i(x_i)). \quad (28)$$

Тогда задача управления риском есть

$$\min_{x \in X} G\left(-\sum_{i=1}^n d_i(x_i), \max_{1 \leq i \leq n} (d_i(x_i) - Mr_i(x_i))\right), \quad (29)$$

где $X = \{x = (x_1, \dots, x_n) \mid x_i \geq 0, i = 1, \dots, n, \sum_{i=1}^n x_i \leq C\}$, C – средства, распределяемые между проектами.

Предположим, что функции $r_i(x_i)$, $d_i(x_i)$, $i = 1, \dots, n$ линейные: $r_i(x_i) = r'_i x_i$, $d_i(x_i) = d'_i x_i$, где коэффициенты r'_i и d'_i означают выгоду (например, прибыль) в случае возникновения неблагоприятного события и ожидаемую, соответственно, с единицы вложенных средств. Тогда, взяв в качестве G линейную свертку с весовым коэффициентом α , с помощью введения новой переменной $z = \max_{1 \leq i \leq n} (d_i(x_i) - Mr_i(x_i))$ задачу (29) можно свести к задаче линейного программирования (ЗЛП)

$$\max_{x, z} (\alpha \sum_{i=1}^n d'_i x_i - (1 - \alpha)z) \quad (30)$$

$$d'_i x_i - \bar{r}'_i x_i \leq z, \quad \sum_{i=1}^n x_i \leq C, \quad x_i \geq 0, i = 1, \dots, n,$$

где \bar{r}'_i – математическое ожидание случайной величины r'_i . Весовой коэффициент α показывает отношение центра, распределяющего средства, к риску. Чем ближе α к нулю, тем больше центр не желает рисковать.

Все вычисления в приведенных ниже примерах произведены с использованием прикладного программного обеспечения MathCAD.

Пример 1. Рассмотрим пять проектов, между которыми необходимо распределить имеющиеся средства C в объеме 100 ден. ед. Известна ожидаемая прибыль с единицы вложенных в каждый проект средств: $d'_1 = 3$, $d'_2 = 5$, $d'_3 = 4$, $d'_4 = 6$, $d'_5 = 2$. Математические ожидания случайных величин $r'_i, i = 1, \dots, 5$ есть $\bar{r}'_1 = 2,8$, $\bar{r}'_2 = 2$, $\bar{r}'_3 = 1,5$, $\bar{r}'_4 = 1$, $\bar{r}'_5 = 1,7$. Для нахождения оптимального распределения средств между проектами решим задачу (30), используя функцию Maximize. Для α , принадлежащего интервалу $[0,04; 0,11]$, имеем следующее распределение средств между проектами: $x^0 = (53,957; 3,957; 4,317; 2,158; 35,971)$;

ожидаемая прибыль $\sum_{i=1}^5 d'_i x_i^0$ при этом составит 282,014, максимальный риск $d'_i x_i^0 - \bar{r}'_i x_i^0$ имеет значение 10,791. Для $\alpha = 0,5$ получаем $x^0 = (0; 35,714; 42,857; 21,429; 0)$, ожидаемая прибыль составит 478,571, максимальный риск имеет значение 107,143. При $\alpha = 0,8$ имеем $x^0 = (0; 62,5; 0; 37,5; 0)$, ожидаемая прибыль составит 537,5, максимальный риск имеет значение 187,5.

Чем больше центр избегает риска, тем больше средств он вкладывает в проекты с меньшим отклонением от ожидаемой прибыли, т.е. для данного примера наибольшее количество средств вкладывается в первый и пятый проекты. Самым рискованным является четвертый проект: для α , принадлежащего интервалу $[0,9; 0,99]$, имеем $x^0 = (0; 0; 0; 100; 0)$, ожидаемая прибыль составит 600, максимальный риск имеет значение 500. Из примера видно, что при изменении параметра α прибыль растет медленнее, чем риск. Поэтому желание получить прибыль как можно больше, например в случае $\alpha \in [0,9; 0,99]$, может привести к результату (прибыли) меньшему, чем при использовании менее рискованной стратегии, например для $\alpha \in [0,04; 0,11]$.

Использование относительной функции риска приводит к другой постановке задачи управления риском

$$\min_{x \in X} \frac{\max_{1 \leq i \leq n} (d_i(x_i) - Mr_i(x_i))}{\sum_{i=1}^n d_i(x_i)}, \quad (31)$$

где $X = \{x = (x_1, \dots, x_n) \mid x_i \geq 0, i = 1, \dots, n, \sum_{i=1}^n x_i \leq C\}$.

Также предполагая, что функции $r_i(x_i)$, $d_i(x_i)$, $i = 1, \dots, n$ линейные: $r_i(x_i) = \bar{r}'_i x_i$, $d_i(x_i) = d'_i x_i$, сведем задачу (31) к ЗЛП. Для этого введем переменные $u = (\sum_{i=1}^n d_i(x_i))^{-1}$, $z = \max_{1 \leq i \leq n} (d_i(x_i) - Mr_i(x_i))$. Тогда имеем $d_i(x_i u) - Mr_i(x_i u) \leq zu$ или $d'_i x_i u - \bar{r}'_i x_i u \leq zu$, $\sum_{i=1}^n d'_i x_i u = 1$, $x_i u \geq 0$, $\sum_{i=1}^n x_i u \leq Cu$, $i = 1, \dots, n$. Введем обозначение $v = uz$, $w_i = x_i u$. Задача (31) примет вид

$$\min_{u, v, \bar{w}} v, \quad d'_i w_i - \bar{r}'_i w_i \leq v, \quad \sum_{i=1}^n w_i \leq Cu, \quad \sum_{i=1}^n d'_i w_i = 1, \quad w_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n, \quad u \geq 0, \quad v \geq 0. \quad (32)$$

Если (u^0, v^0, \bar{w}^0) – решение задачи (32), то $x_i^0 = \frac{w_i^0}{u^0}, i = 1, \dots, n$ – компоненты оптимального плана задачи (31) для линейных функций $r_i(x_i)$, $d_i(x_i)$, $i = 1, \dots, n$.

Пример 2. Используя данные из примера 1, найдем оптимальное распределение средств между проектами для свертки типа отношения (31). Решая задачу (32) с использованием функции Maximize, получаем $u^0 = 0,0035$, $\bar{w}^0 = (0,191; 0,013; 0,015; 0,0076; 0,128)$. Тогда решение задачи (31) (оптимальное распределение средств между проектами) имеет вид $x^0 = (53,957; 3,957; 4,317; 2,158; 35,971)$. Найденное решение задачи (31) совпадает с решением задачи (30) в примере 1 для $\alpha \in [0,04; 0,11]$.

Рассмотрим ситуацию, когда центр имеет возможность осуществлять мероприятия по снижению риска. Например, на предприятии планируются разработка и внедрение новой технологической линии, одновременно с этим планируется строительство нового цеха, ведется усовершенствование социальной сферы. Задача состоит в выборе такого плана реализации проектов, который является менее рискованным и дает по возможности максимальный эффект от реализации проектов. При этом центр, планирующий реализовывать проекты, может вкладывать дополнительные средства на снижение риска, т.е. осуществлять меры по предотвращению возникновения неблагоприятных событий. Вероятности возникновения неблагоприятных событий при этом уменьшаются с ростом дополнительных вложений.

Пусть x_i – план реализации мероприятий по внедрению i -го проекта, $i = 1, \dots, n$, $x = (x_1, \dots, x_n)$; C_{\max} – имеющиеся в распоряжении деньги для снижения риска проектов; $C_i(x_i)$ – деньги, вкладываемые на снижение риска i -го проекта; $p_i(C_i(x_i))$ – убывающая вектор-функция вероятностей возникновения ситуаций риска в i -м проекте.

Тогда управление риском сводится к решению задачи

$$\min_x G\left(-\sum_{i=1}^n d_i(x_i), \frac{\max_{1 \leq i \leq n} (d_i(x_i) - \langle p_i(C_i(x_i)), r_i(x_i) \rangle)}{\sum_{i=1}^n C_i(x_i)}\right)$$

$$\sum_{i=1}^n C_i(x_i) \leq C_{\max}, \quad x \geq 0,$$

или

$$\min_x G\left(-\sum_{i=1}^n d_i(x_i), \max_{1 \leq i \leq n} (d_i(x_i) - \langle p_i(C_i(x_i)), r_i(x_i) \rangle)\right)$$

$$\sum_{i=1}^n C_i(x_i) \leq C_{\max}, \quad x \geq 0,$$

или

$$\min_x G\left(-\sum_{i=1}^n d_i(x_i), \sum_{i=1}^n C_i(x_i)\right)$$

$$\max_{1 \leq i \leq n} (d_i(x_i) - \langle p_i(C_i(x_i)), r_i(x_i) \rangle) \leq Risk_{re}, \quad x \geq 0.$$

Представленные постановки задач инвестирования и реализации проектов с использованием минимаксной функции риска позволяют снизить риск самого рискованного проекта. Тем самым можно говорить, что риск проектов выравнивается.

Методы управления риском в задачах фондового инвестирования

Рассмотрим инвестиции в ценные бумаги. Предположим, что имеется n видов ценных бумаг. Инвестору необходимо принять решение о наиболее выгодном вложении средств в те или иные ценные бумаги, т.е. сформировать портфель ценных бумаг. Ценность портфеля характеризуется понятием доходность. Так как большинство инвесторов предпочитают избегать риска неполучения ожидаемой доходности, то возникает проблема формирования портфеля ценных бумаг, который доставлял бы по возможности наибольшую доходность и имел бы наименьший риск [5, 7].

На фондовом рынке большинство ценных бумаг имеют ненулевую корреляцию, т.е. оказывают влияние друг на друга. Поэтому считаем правильным оперировать функцией риска, заданной в метрике l_1 , l_2^2 (дисперсия) или l_2 (среднеквадратическое отклонение). Следует упомянуть, что многие финансовые аналитики использовали именно такие метрики для оценки риска на фондовом рынке. В задаче Г. Марковица риск определен в метрике l_2^2 как дисперсия портфеля ценных бумаг [9], Г. Конно и Г. Ямазаки оценивали риск в метрике l_1 [8].

Пусть r_i – доходность i -й ценной бумаги, являющаяся случайной величиной; \bar{r}_i – ожидаемая доходность i -й ценной бумаги, $i = 1, \dots, n$; σ_{ij} – ковариация i -й и j -й ценных бумаг; x_i – доля средств, инвестируемая в i -ю ценную бумагу. Тогда задачу управления риском портфеля можно представить в виде

$$\min_{x \in X} G\left(-\sum_{i=1}^n \bar{r}_i x_i, M\left(\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r}_i) x_i\right)^2\right), \quad (33)$$

где $X = \{x \mid x_i \geq 0, i = 1, \dots, n, \sum_{i=1}^n x_i = 1\}$.

Запишем задачу (33) более подробно

$$\min_{x \in X} G(-\sum_{i=1}^n \bar{r}_i x_i, \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sigma_{ij} x_i x_j). \quad (34)$$

В задаче Г. Марковица используется свертка типа суммы с весовым коэффициентом $\lambda \geq 0$ при дисперсии, который показывает отношение инвестора к риску. Рассмотрение дисперсии в качестве функции риска для такого типа свертки удобно в том смысле, что исходная задача сразу представляет собой задачу квадратичного программирования (ЗКП) и не требует дополнительных преобразований для нахождения решения. Мы предлагаем в задаче (34) использовать свертку типа отношения с функцией риска, заданной в метрике l_2 , не требующей при этом введения весового коэффициента. Таким образом, минимизация относительного риска портфеля приводит к задаче

$$\min_{x \in X} \frac{(M(\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r}_i)x_i)^2)^{1/2}}{\sum_{i=1}^n \bar{r}_i x_i}, \quad (35)$$

где $X = \{x \mid x_i \geq 0, i = 1, \dots, n, \sum_{i=1}^n x_i = 1\}$

или более подробно

$$\min_{x \in X} \frac{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sigma_{ij} x_i x_j)^{1/2}}{\sum_{i=1}^n \bar{r}_i x_i}. \quad (36)$$

Выбор метрики l_2 для относительной функции риска, во-первых, более естественен, чем l_2^2 , так как математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение являются соизмеримыми величинами (одни и те же единицы), и, во-вторых, дает возможность свести задачу (36) к ЗКП, а в конечном счете к системе линейных алгебраических уравнений.

Введем обозначение $z = (\sum_{i=1}^n \bar{r}_i x_i)^{-1}$. Тогда задача (36) примет вид

$$\min_{x, z} (\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sigma_{ij} (zx_i)(zx_j))^{1/2}, \quad (37)$$

$$\sum_{i=1}^n \bar{r}_i (zx_i) = 1, \sum_{i=1}^n x_i = 1, x_i \geq 0, i = 1, \dots, n.$$

Далее, приняв $y_i = zx_i$, получаем ЗКП

$$\min_{y \in Y} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sigma_{ij} y_i y_j, \quad (38)$$

где $Y = \{y \mid y_i \geq 0, i = 1, \dots, n, \sum_{i=1}^n \bar{r}_i y_i = 1\}$.

Функция Лагранжа для задачи (38) есть $L(\bar{y}, \lambda) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sigma_{ij} y_i y_j + \lambda (1 - \sum_{i=1}^n \bar{r}_i y_i)$.

Необходимые и достаточные условия экстремума для ненулевых $y_i, i = 1, \dots, n$ приводят к системе линейных алгебраических уравнений

$$\sum_{j=1}^n \sigma_{ij} y_j - \lambda \bar{r}_i = 0, i = 1, \dots, n, \quad \sum_{j=1}^n \bar{r}_j y_j = 1. \quad (39)$$

Если часть переменных принимает нулевое значение, то система (39) становится меньшего порядка. Пусть $y^0 = (y_1^0, \dots, y_n^0)$ – решение системы (39), тогда $x_i^0 = \frac{y_i^0}{\sum_{i=1}^n y_i^0}$,

$i = 1, \dots, n$ – компоненты решения задачи (36).

Пример 3. Имеется три инвестиционных инструмента с ожидаемыми доходностями $\bar{r}_1 = 0,08$, $\bar{r}_2 = 0,1$ и $\bar{r}_3 = 0,13$, дисперсиями $\sigma_{11} = 0,1$, $\sigma_{22} = 0,15$, $\sigma_{33} = 0,19$ и ковариациями $\sigma_{12} = 0,01$, $\sigma_{13} = -0,02$, $\sigma_{23} = -0,03$. Требуется найти оптимальный состав портфеля, доставляющего по возможности наибольшую доходность и имеющего при этом наименьший риск, т.е. нужно решить задачу (36). Решая систему (39), используя при этом функцию Find, имеем следующий результат: оптимальный состав портфеля $x^0 = (0,348; 0,304; 0,348)$,

ожидаемая доходность портфеля $\sum_{i=1}^3 \bar{r}_i x_i^0 = 0,103$, риск портфеля $(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sigma_{ij} x_i^0 x_j^0)^{1/2} = 0,2$.

Важным моментом при решении задачи минимизации риска портфеля имеет диверсификация, т.е. инвестирование средств в разные бумаги. Чем больше n , тем портфель более застрахован от нежелательных колебаний доходностей ценных бумаг.

Инвестор, желая еще больше избегать риска, может вкладывать часть средств в безрисковый актив. Обозначим доходность по безрисковому активу r_0 , а долю средств, инвестируемых в безрисковый актив, через x_0 . Тогда величину риска портфеля следует соотносить с доходностью рискованной и безрисковой частей портфеля

$$\min_{x \in X} G(-\sum_{i=1}^n \bar{r}_i x_i - r_0 x_0, \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sigma_{ij} x_i x_j), \quad (40)$$

где $X = \{x \mid x_i \geq 0, i = 0, \dots, n, \sum_{i=0}^n x_i = 1\}$.

$$\min_{x \in X} \frac{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sigma_{ij} x_i x_j)^{1/2}}{\sum_{i=1}^n \bar{r}_i x_i + r_0 x_0}. \quad (41)$$

Если инвестору необходимо достигнуть определенного уровня доходности портфеля r_p , то вместо задачи (33) можно рассмотреть следующую задачу:

$$\min_{x \in X} M \left(\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r}_i) x_i \right)^2, \quad (42)$$

$$X = \{x \mid x_i \geq 0, i = 0, \dots, n, \sum_{i=0}^n x_i = 1, \sum_{i=0}^n \bar{r}_i x_i \geq r_p\},$$

а вместо задачи (35) можно рассмотреть задачу вида (41), где в знаменателе будет выражение $\sum_{i=1}^n \bar{r}_i x_i + r_0 x_0 - r_p$. Все эти задачи сводятся к ЗКП и в конечном счете к системе линейных алгебраических уравнений.

Пример 4. Рассмотрим три инвестиционных инструмента с характеристиками, представленными в примере 3, и уровнем требуемой доходности портфеля $r_p = 0,09$. Для решения задачи (42) будем использовать функцию Maximize. Получаем результат: оптимальный состав портфеля $x^0 = (0,417; 0,289; 0,294)$, ожидаемая доходность портфеля $\sum_{i=1}^3 \bar{r}_i x_i^0 = 0,1$,

риск портфеля $\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sigma_{ij} x_i^0 x_j^0 = 0,039$. Использование функции риска, заданной в метрике l_2^2 ,

в задаче (42) с заданным уровнем доходности $r_p = 0,09$ приводит к тому, что ожидаемая доходность оптимального портфеля в задаче (42) снизилась примерно на 3 %, а риск – на 1,5 % по сравнению с решением задачи управления риском из примера 3. Для сравнения рисков нужно извлечь корень квадратный из величины $\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sigma_{ij} x_i^0 x_j^0 = 0,039$ в примере 4.

Таким образом, при управлении портфелем ценных бумаг модель, использующая функцию риска в метрике l_2 и свертку типа отношения, может оказаться более привлекательной для инвестора, избегающего риска, по сравнению с моделью (42) при некоторых r_p .

В задачах фондового инвестирования предлагается также рассматривать вероятностные функции риска. Задачи минимизации риска при этом могут быть сформулированы следующим образом:

$$\min_{x \in X} P \left(\sum_{i=1}^n r_i x_i + r_0 x_0 < r_p \right), \quad (43)$$

$$X = \{x \mid x_i \geq 0, i = 0, \dots, n, \sum_{i=0}^n x_i = 1\}.$$

$$\max_x \sum_{i=1}^n \bar{r}_i x_i + r_0 x_0 \quad (44)$$

$$P \left(\sum_{i=1}^n r_i x_i < \sum_{i=1}^n \bar{r}_i x_i \right) \leq \alpha, \quad x_i \geq 0, i = 0, \dots, n, \sum_{i=0}^n x_i = 1.$$

$$\max_x \sum_{i=1}^n \bar{r}_i x_i + r_0 x_0 \quad (45)$$

$$P \left(\sum_{i=1}^n \bar{r}_i x_i + r_0 x_0 - \sum_{i=0}^n r_i x_i \geq \delta \right) \leq \beta, \quad \delta > 0, x_i \geq 0, i = 0, \dots, n, \sum_{i=0}^n x_i = 1.$$

$$\max_x r_0 x_0$$

$$P\left(\sum_{i=1}^n r_i x_i < r_0 x_0\right) \leq \gamma, \quad x_i \geq 0, i = 0, \dots, n, \sum_{i=0}^n x_i = 1. \quad (46)$$

$$\min_{x \in X} P\left(\sum_{i=1}^n r_i x_i < r_p\right), \quad (47)$$

$$X = \{x \mid x_i \geq 0, i = 1, \dots, n, \sum_{i=1}^n x_i = 1\}.$$

На примере задачи (47) продемонстрируем механизм сведения таких задач к ЗКП.

Пусть случайная величина $\sum_{i=1}^n r_i x_i$ имеет нормальный закон распределения, т.е.

$$P\left(\sum_{i=1}^n r_i x_i < r_p\right) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{r_p} e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}} dt, \quad \text{где } a = \sum_{i=1}^n \bar{r}_i x_i \text{ — математическое ожидание,}$$

$$\sigma = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sigma_{ij} x_i x_j\right)^{1/2} \text{ — среднеквадратическое отклонение случайной величины } \sum_{i=1}^n r_i x_i.$$

Для вычисления величины $P\left(\sum_{i=1}^n r_i x_i < r_p\right)$ в данном случае удобно воспользоваться функ-

цией Лапласа: $\Phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^y e^{-\frac{t^2}{2}} dt$. Итак, имеем равенство

$$P\left(\sum_{i=1}^n r_i x_i < r_p\right) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{r_p} e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}} dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{r_p-a}{\sigma}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz,$$

где $z = \frac{t-a}{\sigma}$ или $t = a + \sigma z$.

Далее имеем

$$\begin{aligned} P\left(\sum_{i=1}^n r_i x_i < r_p\right) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{z^2}{2}} dz + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{r_p-a}{\sigma}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \\ &= \frac{1}{2} + \Phi(0) - \Phi\left(\frac{a-r_p}{\sigma}\right) = \frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{a-r_p}{\sigma}\right). \end{aligned}$$

Тогда задача эквивалентная (47) имеет вид

$$\frac{\sigma}{a-r_p} \rightarrow \min. \quad (48)$$

Возвращаясь к переменной x , окончательно получаем

$$\min_x \frac{(\sum_{i,j=1}^n \sigma_{ij} x_i x_j)^{1/2}}{\sum_{i=1}^n \bar{r}_i x_i - r_p}, \quad (49)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1, x_i \geq 0, i = 1, \dots, n.$$

Далее, аналогично задаче (36), задача (49) сводится к ЗКП и в конечном счете к системе линейных алгебраических уравнений.

Заключение

Таким образом, в работе представлены задачи управления риском при стратегическом и фондовом инвестировании, в которых использовались линейная свертка критериев эффективности и риска и свертка этих критериев типа отношения. Целесообразность применения подхода к управлению риском с использованием тех или иных функций риска в значительной степени зависит от специфики решаемой прикладной задачи и характера возможных рисков в изучаемой системе. Показано, что все представленные задачи сводятся к задаче математического программирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акимов, В. А. Риски в природе, техносфере, обществе и экономике / В. А. Акимов, В. В. Лесных, Н. Н. Радаев. – М. : Деловой экспресс, 2004. – 352 с.
2. Бурков, В. Н. Как управлять проектами / В. Н. Бурков, Д. А. Новиков. – М. : НПО «СИНТЕГ»: ИЧП «Гео», 1997. – 188 с.
3. Владимиров, В. А. Управление риском: Риск. Устойчивое развитие. Синергетика / В. А. Владимиров, Ю. Л. Воробьев, С. С. Салов [и др.]. – М. : Наука, 2000. – 429 с.
4. Горелик, В. А. Основы исследования операций : учеб. пособие / В. А. Горелик, Т. П. Фомина. – М. : Московский пед. гос. ун-т, 2004. – 248 с.
5. Милосердов, А. А. Рыночные риски: формализация, моделирование, оценка качества моделей / А. А. Милосердов, Е. Б. Герасимова. – Тамбов : Изд-во Тамбовского гос. техн. ун-та, 2004. – 116 с.
6. Соловьев, В. И. Математические методы управления рисками : учеб. пособие / В. И. Соловьев. – М. : ГУУ, 2003. – 100 с.
7. Шарп, У. Инвестиции / У. Шарп, Г. Александер, Дж. Бейли ; пер. с англ. – М. : ИНФРА-М, 2004. – XII, 1028 с.
8. Konno, H, Yamazaki, H. Mean-absolute deviation portfolio optimization models and its application to Tokyo stock market, Management Sciences, 1991, 37 – Pp. 519-531.
9. Markowitz, H.M. Portfolio selection, Journal of Finance, 1952, 7 – pp. 77-91.
10. Cai X.Q., Teo K.L., Yang X.Q., Zhou X.Y. Portfolio optimization with l_∞ risk measure, 35th IEEE Conference on Decision and Control, Kobe, Japan, 1996 – Pp. 3682-3687.

Комаровский Ю. А.
Yu. A. Komarovskiy

ПОГРЕШНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПРОХОДИМЫХ РАССТОЯНИЙ ПО ДАННЫМ ОТ GPS-ПРИЁМНИКОВ

ERRORS IN TRAVERSED DISTANCE CALCULATIONS BASED ON DATA FROM A GPS-RECEIVER



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, Admiral Nevelskoy State Maritime University (city of Vladivostok). E-mail: komarovskiy@msun.ru.

Аннотация. Показано, что расстояния, определяемые по приращениям координат, устойчиво меньше расстояний, рассчитываемых по абсолютной скорости. Получены оценки случайных компонент вычисляемых расстояний по информации от судового GPS-приёмника.

Summary. We demonstrate that traversed distances determined on the basis of coordinate increments tend to be systematically shorter than those calculated using the absolute speed. We derive estimates for random components in the traversed distance calculation based on data from with a vessel's GPS-receiver.

Ключевые слова: GPS-приёмник, пройденное расстояние, случайная погрешность.

Keywords: GPS-receiver, traversed distance, random error.

УДК 621.396.932.1:629.783

Определение точного расстояния, преодолеваемого транспортным средством и человеком, до сих пор представляет сложную техническую проблему. Сложилось так, что для каждого вида транспортного средства создавались свои устройства измерения пройденных дистанций. Ввод в эксплуатацию спутниковых радионавигационных систем (СРНС) Навстар GPS и Глонасс открыл перспективу создания универсального устройства. До мая 2000 г. в работе СРНС Навстар GPS действовал режим избирательной доступности, который не позволял получать гражданским потребителям координаты и параметры движения с точностью, приемлемой для вычисления точного преодолеваемого расстояния. К сожалению, подавляющее большинство GPS-приёмников, изготовленных уже после отмены режима избирательной доступности, не имеют встроенной функции расчёта пройденного пути. Поэтому возникла необходимость изучения пригодности современных навигационных приёмников СРНС предоставлять исходную информацию для достижения высокой точности вычисления преодолеваемых расстояний.

Любой современный приёмник СРНС выводит на экран индикатора и на внешние устройства следующие данные: геодезическую широту φ , геодезическую долготу λ , направление вектора абсолютной скорости COG (Course Over Ground) и модуль вектора абсолютной скорости SOG (Speed Over Ground). Бытует неправильное мнение, что COG и SOG в су-

довых приёмниках СРНС вычисляются по изменениям координат. На самом деле в них обсервованные геодезические координаты определяются по кодовым измерениям навигационных сигналов от спутников, а элементы вектора абсолютной скорости – по доплеровским смещениям несущих частот спутников [1, 2]. Следовательно, в одном и том же навигационном приёмнике элементы вектора абсолютной скорости и обсервованные геодезические координаты определяются по разным измерительным каналам. Поэтому можно предположить неодинаковую точность вычисления пройденных расстояний, полученных по приращениям координат и по элементам вектора абсолютной скорости. Цель предлагаемой работы посвящена проверке этой гипотезы.

Пусть Δt – неизменный интервал времени обновления данных в навигационном приёмнике СРНС. Современные судовые навигационные приёмники СРНС Навстар GPS в зависимости от их типа обновляют информацию через половину секунды, каждую секунду или через 2 с. Обозначим через $\Delta\varphi'_i$ и $\Delta\lambda'_i$ приращения в угловых минутах широты и долготы соответственно за i -й интервал обновления, $\Delta\varphi'_i = \varphi'_i - \varphi'_{i-1}$, $\Delta\lambda'_i = \lambda'_i - \lambda'_{i-1}$.

Пусть $\Delta S_i^{(d)}$ – расстояние в метрах, рассчитанное по приращениям координат за i -й интервал обновления,

$$\Delta S_i^{(d)} = \sqrt{[\Delta\varphi'_i \times l_m]^2 + [\Delta\lambda'_i \times l_p]^2}, \quad (1)$$

где l_m и l_p – длины в метрах дуги одной минуты меридиана и одной минуты дуги параллели данного референц-эллипсоида в данной точке его поверхности.

В геодезии и в морской навигации величины l_m и l_p принято рассчитывать по следующим формулам:

$$l_m = \frac{a(1 - e^2) \text{arc}1'}{\sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^3}}, \quad l_p = \frac{a \times \cos \varphi \times \text{arc}1'}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}},$$

где a – большая полуось референц-эллипсоида; e – его первый эксцентриситет; φ – широта места, в котором располагается в данный момент антенна GPS-приёмника.

В последние годы в международной морской практике широко используется референц-эллипсоид WGS-84, у которого $a = 6378173$ м, $e = 0,0818191908426$ [3, 4].

Представленные выше формулы для вычислений длины дуги одной минуты меридиана и параллели требуют высокой разрядности. Поэтому с целью удобства расчётов автором для референц-эллипсоида WGS-84 были получены следующие простые формулы вычислений l_m и l_p [5]:

$$\begin{cases} l_m = K_{11} - K_{22} \cos 2\varphi + K_{33} \cos 4\varphi, \\ l_p = [C_{11} - C_{22} \cos 2\varphi + C_{33} \cos 4\varphi] \cos \varphi. \end{cases} \quad (2)$$

Значения коэффициентов формул (2) содержатся в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты формул (2)

K_{11}	K_{22}	K_{33}
1852,34406	9,32907	0,01935
C_{11}	C_{22}	C_{33}
1858,4416	3,12065	0,00389

Формулы (3) обеспечивают точность вычислений не хуже $\pm 0,1$ мм.

Пройденное расстояние за интервал Δt можно рассчитать по величине SOG. Судовые GPS-приёмники способны отображать на экране индикатора величины SOG в узлах (1 узел =



= морской миле за 1 ч = 1,852 км/ч = 0,51444 м/с), в км/ч (0,27778 м/с) и в милях за 1 ч (одна статутная (сухопутная) миля за 1 ч = 1,609344 км/ч = 0,44704 м/с). Узлы используются при плавании в акваториях, отнесённых к морю. Единицы измерения абсолютной скорости в милях за 1 ч и км/ч применяются на внутренних водных путях. На внешние устройства судовые GPS-приёмники выводят SOG в формате NMEA 0183 только в узлах [6].

Обозначим через v_i абсолютную скорость в узлах, выводимую на внешние устройства GPS-приёмником как SOG_i на интервале обновления Δt_i . Тогда расстояние в метрах $\Delta S_i^{(v)}$, проходимое носителем приёмника СРНС Навстар GPS за постоянный i -й интервал обновления информации Δt , определится как

$$\Delta S_i^{(v)} = 0,51444 v_i \Delta t_i. \quad (3)$$

Таким образом, по информации от GPS-приёмника можно двумя способами рассчитать расстояние, пройденное за время T , $T = n \times \Delta t$, где n – число интервалов обновления.

$$S^{(d)} = \sum_{i=1}^n \Delta S_i^{(d)}, \quad S^{(v)} = \sum_{i=1}^n \Delta S_i^{(v)}. \quad (4)$$

На процессы измерения радионавигационных параметров GPS-приёмником воздействуют различные факторы, изменяющиеся непредсказуемым образом. Поэтому величины $\Delta S^{(d)}$ и $\Delta S^{(v)}$ надо считать случайными. Обозначим через $f_d(m_d, \sigma_d)$ и $f_v(m_v, \sigma_v)$ двухпараметрические плотности распределения случайных величин $\Delta S^{(d)}$ и $\Delta S^{(v)}$ соответственно с математическими ожиданиями m_d , m_v и средними квадратическими отклонениями (СКО) σ_d , σ_v .

Если $m_d = m_v$, то можно предположить, что при $n \rightarrow \infty$ абсолютная величина разности между расстоянием, рассчитанным по приращению координат, и расстоянием, рассчитанным по величинам SOG, будет меньше любого сколь угодно малого положительного числа ε , т.е.

$$\left| \sum_{i=1}^n \Delta S_i^{(d)} - \sum_{i=1}^n \Delta S_i^{(v)} \right| < \varepsilon. \quad (5)$$

Если условие (5) выполняется, то оба измерительных канала приёмника равнозначны для подсчёта пройденных расстояний. При этом в тех случаях, когда необходимо получать расстояние за короткие промежутки времени, то предпочтение следует отдавать тому каналу, который обеспечивает меньшее среднее квадратическое отклонение.

Для проверки выполнимости условия (5) были исследованы данные, полученные автором во время рейсов пассажирского парома “Бригадир Ришко” между Владивостоком и о. Попова в 2008 г. На борту парома был временно установлен судовой GPS-приёмник GP-37, изготовленный компанией Furuno. Информация от него в формате NMEA 0183 через каждую секунду ($\Delta t = 1$ с) автоматически заносилась на жёсткий диск ноутбука. Для анализа взят прямолинейный участок перехода между моментами траверзов о. Уши и мыса Низменный в Амурском заливе 3 августа 2008 г. Результаты вычислений $\Delta S^{(d)}$ и $\Delta S^{(v)}$ можно видеть на рис. 1.

На рис. 1 видно гораздо большее рассеивание величин расстояний, рассчитанных по приращениям обсервованных координат по формуле (1). Кроме того, на графиках можно видеть влияние струй течений, действующих вдоль северо-западных берегов островов Русский и Попова. Коэффициент корреляции между $\Delta S^{(d)}$ и $\Delta S^{(v)}$ равен 0,523. Такое малое значение коэффициента корреляции объясняется высокой дисперсией расстояний, рассчитываемых по приращениям координат. Приращение координат дало среднее расстояние 4,972 м и

СКО 0,089 м. Вычисление расстояний по формуле (3) предоставило среднее 4,985 м и СКО 0,049 м.

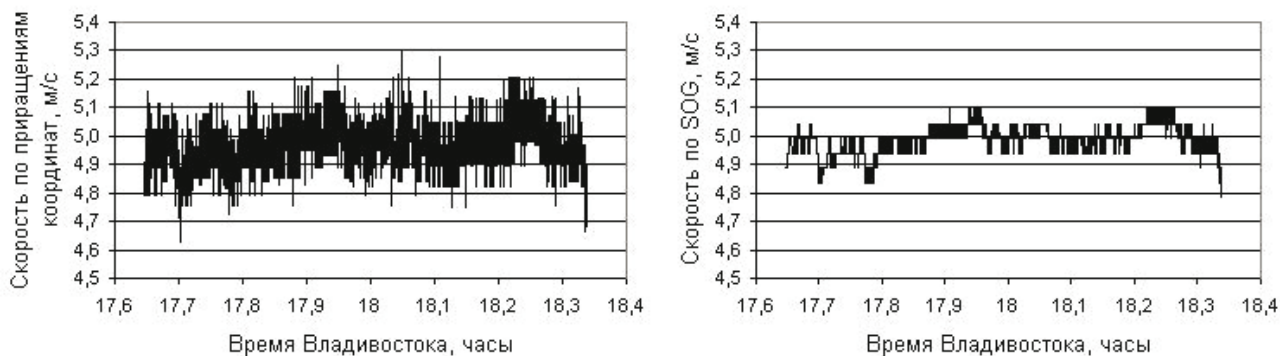


Рис. 1. Графики изменения расстояний, пройденных за 1 с паромом “Бригадир Ришко” в рейсе 3 августа 2008 г.

Чтобы сравнивать между собой характеристики распределений $\Delta S^{(d)}$ и $\Delta S^{(v)}$, необходимо устранить присутствие тренда, обусловленного влиянием течения. Для этого применялись процедуры простого линейного сглаживания скользящим средним и аппроксимация участками парабол с коэффициентами, рассчитанными методом наименьших квадратов. Обозначим через $\Delta S_i^{(sm)}$ сглаженное значение расстояния на интервале обновления информацией Δt_i . Тогда случайная величина расстояния, рассчитанная по приращениям координат, определится как

$$S_i^{(d)} = \Delta S_i^{(d)} - \Delta S_i^{(dsm)}. \quad (6)$$

Таким же образом определится случайная величина расстояния $S_i^{(v)}$, рассчитанная по абсолютной скорости. Точечные оценки математического ожидания \bar{m}_d и СКО $\bar{\sigma}_d$ случайной величины расстояния, рассчитанной по приращению координат, определяются соответственно по следующим формулам:

$$\bar{m}_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta S_i^{(d)} - \Delta S_i^{(dsm)}), \quad \bar{\sigma}_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i^{(d)} - \bar{m}_d)^2}{n}}. \quad (7)$$

По формулам, аналогичным формулам (7), рассчитывались \bar{m}_v и $\bar{\sigma}_v$.

Экспериментальные данные, зарегистрированные 3 августа 2008 г., сначала были обработаны простым линейным сглаживанием скользящим средним с окном 15 с. Результаты сглаживания можно видеть на рис. 2.

Чтобы оценить результат сглаживания, имеет смысл графики рис. 1 сравнить с графиками рис. 2. Во-первых, видно значительное уменьшение случайной компоненты в изменениях расстояний, рассчитанных по приращениям координат, во-вторых, стал более заметен тренд, вызываемый течениями, из-за чего коэффициент корреляции сглаженных значений возрос до 0,945. На левой панели рис. 2 видно, что случайная компонента устранена далеко не полностью.

Полученные таким образом массивы центрированных случайных величин $S_i^{(d)}$ и $S_i^{(v)}$ были подвергнуты стандартной процедуре статистической обработки. Результаты обработки внесены в табл. 2.

Результаты обработки простым линейным сглаживанием

Статистическая оценка	Расстояния, полученные	
	по приращению координат	по абсолютной скорости
Среднее, м	0,0000544	0,0000457
СКО, м	0,076	0,021
Медиана, м	0,000212	0
Мода, м	- 0,067	0
Экссесс	- 0,105	- 0,192
Асимметрия	0,066	- 0,038
Размах варьирования, м	0,605	0,147
Объём выборки	2475	2475

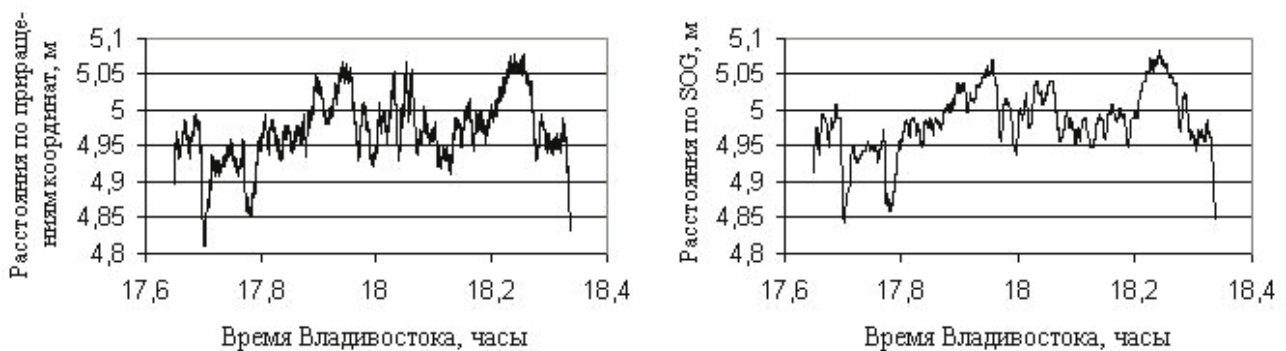


Рис. 2. Графики изменения сглаженных расстояний

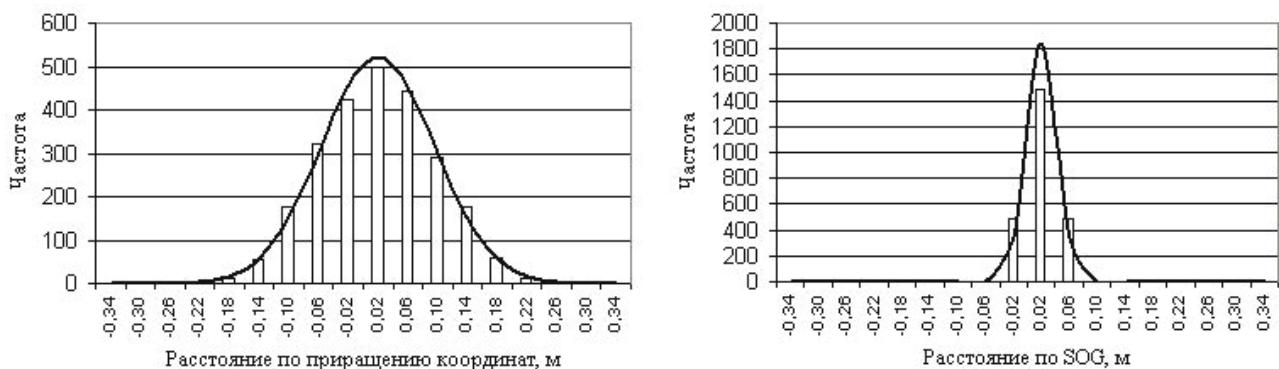


Рис. 3. Гистограммы распределений $S_i^{(d)}$ (слева) и $S_i^{(v)}$

Из табл. 2 следует, что средние значения случайных величин расстояний практически равны нулю, $\bar{m}_d \approx \bar{m}_v \approx 0$. Значения точечных оценок средних, близких к 0, можно объяснить эффективностью использованного способа сглаживания. Из табл. 2 следует, что СКО случайных величин расстояний, определяемых по SOG, в 3,6 раза меньше, $\bar{\sigma}_d > \bar{\sigma}_v$. Их размах варьирования меньше в 4 раза.

Эти факты, а также коэффициент корреляции между $S_i^{(d)}$ и $S_i^{(v)}$, равный 0,197, позволяют выдвинуть обоснованное предположение о независимости и неоднородности случайных величин $S_i^{(d)}$ и $S_i^{(v)}$. Иными словами, случайные величины $S_i^{(d)}$ и $S_i^{(v)}$ принадлежат

разным генеральным совокупностям. Этот вывод подтверждает то, что элементы вектора абсолютной скорости и обсервованные геодезические координаты определяются по разным измерительным каналам.

О виде плотности распределения случайных величин $S_i^{(d)}$ и $S_i^{(v)}$ можно судить по их гистограммам на рис. 3.

Для анализа предварительного характера на гистограммы рис. 3 нанесены кривые теоретического распределения Гаусса, рассчитанные по средним и СКО табл. 2. Видно, что эмпирические распределения достаточно хорошо совпадают с кривыми теоретических распределений. Гистограммы практически симметричны. Различия в СКО и в эксцессах эмпирических распределений также можно наблюдать на рис. 3.

Результаты статистической обработки случайных компонент $S_i^{(d)}$ и $S_i^{(v)}$, полученных аппроксимацией участками парабол с коэффициентами, рассчитанными методом наименьших квадратов, сведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты обработки методом наименьших квадратов

Статистическая оценка	Расстояния, полученные	
	по приращению координат	по абсолютной скорости
Среднее, м	0,000519	0,000514
СКО, м	0,08	0,03
Медиана, м	0,000027	0,00419
Мода, м	0,13	0,0033
Эксцесс	-0,126	0,582
Асимметрия	0,055	-0,409
Размах варьирования, м	0,615	0,232
Объём выборки	2489	2489

Сравнивая содержимое табл. 2 и табл. 3, можно сделать вывод о более эффективном устранении тренда простым линейным сглаживанием. Способ сглаживания участками парабол с коэффициентами, рассчитанными методом наименьших квадратов, даёт более грубые результаты, в чём можно убедиться, сопоставляя средние значения табл. 2 и табл. 3, а также эксцессы, асимметрии и размахи варьирования. Тем не менее, метод наименьших квадратов подтвердил близость средних $S_i^{(d)}$ и $S_i^{(v)}$ и превышение величины $\bar{\sigma}_d$ над $\bar{\sigma}_v$. Коэффициент корреляции между $S_i^{(d)}$ и $S_i^{(v)}$ при обработке методом наименьших квадратов равен 0,315. При сглаживании скользящим средним коэффициент корреляции между случайными величинами $S_i^{(d)}$ и $S_i^{(v)}$, как было отмечено выше, равен 0,197. Следовательно, при сглаживании участками парабол тренд устранился далеко не полностью.

Так как факт близости средних установлен, то следует ожидать выполнение условия (5) и равенства $S^{(d)}$ и $S^{(v)}$ (4). Расчёты для участка перехода между моментами траверзов о. Уши и мыса Низменный в Амурском заливе 3 августа 2008 г. дали следующие результаты: $S^{(d)} = 12375,311$ м, $S^{(v)} = 12408,955$ м. Разность в пройденных по информации от приёмника СРНС Навстар GPS GP-37 расстояниях составила 33,644 м (0,271 %). Учитывая высокую разрядность вычислений, полученный результат нельзя считать подтверждающим выполнение условия (5).

Обозначим через δ разность в метрах между получаемыми значениями расстояний, $\delta = S^{(d)} - S^{(v)}$. Важным показателем точности определения расстояний будет характер изменения δ во времени. Чтобы получить представление о динамике δ , для перехода о. Уши – мыс Низменный были рассчитаны пройденные расстояния $S^{(d)}$ и $S^{(v)}$ по мере увеличения времени перехода. График изменения накопленной разности δ можно видеть на левой панели рис. 4. График δ представляет устойчивое убывание отрицательной величины. Этот факт следует интерпретировать как постоянное превышение расстояния, рассчитываемого по абсолютной скорости, над расстоянием, определяемым по координатам, т.е. $S^{(v)} > S^{(d)}$.

Зададимся для начала моделью линейной регрессии зависимости δ от оперативного времени перехода τ . После вычисления коэффициентов регрессии методом наименьших квадратов зависимость получила следующий вид:

$$\delta(\tau) = -0,3499 - 0,8216\tau, \quad (8)$$

где τ – время от момента начала перехода, мин.

График зависимости (8) изображён в виде прямой на левой панели рис. 4. Визуальное сравнение положений точек вычисленных значений δ с графиком зависимости (8) позволяет сделать предположение о колебательном характере изменения δ . Для проверки этого предположения для каждого значения τ были получены разности между δ и $\delta(\tau)$. График изменения этих разностей представлен на правой панели рис. 4.

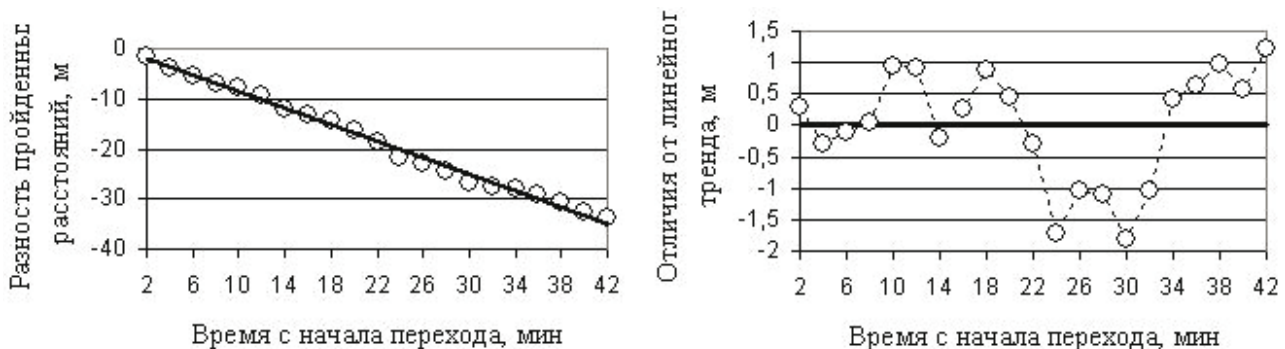


Рис. 4. Динамика разности расстояний

На правой панели рис. 4 можно видеть, что разность пройденных расстояний изменяется со временем с периодом, приблизительно равным 12 мин. Следовательно, расстояние $S^{(d)}$ или $S^{(v)}$ содержит компоненту погрешности, амплитуда которой периодически изменяется во времени. Этот вывод настраивает на продолжение исследований с целью определения параметров постоянных и систематических компонент погрешностей.

Обозначим через δ_r относительную разность расстояний, выраженную в процентах,

$$\delta_r = \frac{S^{(d)} - S^{(v)}}{S^{(d)}} 100\% . \quad (9)$$

Характер изменения во времени относительной разности расстояний на том же переходе представлен на рис. 5.

По рис. 5 можно убедиться в том, что относительная разность имеет тенденцию к уменьшению по абсолютной величине. Происходит это из-за того, что скорость приращения числителя формулы (9) меньше скорости приращения знаменателя.

Характер изменения относительной разности в первом приближении можно выразить следующим линейным регрессионным равенством:

$$\delta_r(\tau) = 0,0004\tau - 0,2932 . \quad (10)$$

Вполне возможно, что при $\tau \rightarrow \infty$ δ_r будет асимптотически приближаться к нулю.



Рис. 5. График изменения относительной разности расстояний

Подводя итог, надо отметить значительные отличия характеристик постоянных и случайных компонент погрешностей вычисляемых проходимых расстояний по приращениям координат и по абсолютной скорости. Это подтверждает определение obserвованных координат и элементов вектора абсолютной скорости в GPS-приёмниках по разным каналам измерения. Полученные в данной работе результаты пока не позволяют назначить наиболее точный из рассмотренных способов расчёта расстояний с позиции постоянных и систематических компонент. Здесь необходимы эксперименты с участием дополнительного высокоточного выверенного приёмника СРНС Навстар GPS.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : моногр. : в 2 т. Т. 1 / К. М. Антонович. – М. : ФГУП «Картгеоцентр», 2005. – 334 с.
2. Elliot D. Kaplan. Understanding GPS: Principles and applications [Текст] / Artech House. Boston, London, 1996. – 554 p.
3. Department of Defense World Geodetic System 1984. DMA TR 8350.2 Second edition 1 September 1991. U.S. Geological Survey. October, 1993. – 152 p.
4. Комаровский, Ю. А. Использование различных референц-эллипсоидов в судовождении : учеб. пособие / Ю. А. Комаровский. – Владивосток : ДВГМА, 1999. – 170 с.
5. Комаровский, Ю. А. Точные вычисления пройденных расстояний на земных эллипсоидах / Ю. А. Комаровский // Современные проблемы развития и методики преподавания естественных и точных наук : сб. материалов Всероссийской научн.-практ. конф. 16-18 декабря 2009 г. – Уссурийск : Изд-во УГПИ, 2009. – С. 154-161.
6. National Marine Electronics Association Standard for Interfacing Marine Electronic Devices NMEA 0183. Version 3.00. July 1, 2000. – 115 p.

Вильдяйкин Г. Ф.
G.F. Vildiajkin

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИИ

PHYSICAL MODELS OF INFORMATION



Вильдяйкин Геннадий Федорович – кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального директора, начальник лаборатории ОАО «Амурская ЭРА» (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: wildgen@kmscom.ru.

Mr. Gennadiy F. Vildiajkin – PhD in Engineering, Associate Professor, Deputy General Director and Head of Laboratory at JSC “Amurskaya ERA” (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: wildgen@kmscom.ru

Аннотация. С позиций понятия информации как многообразия физических полей, их суперпозиции и нелинейных взаимодействий рассмотрены модели электромагнитных, акустических и гравитационных полей. Показана аналогия описания физических полей с помощью волновых уравнений. Для решения задачи защиты информации представлены технические каналы физических полей.

Summary: Models of electromagnetic, acoustic and gravitational fields are considered from the perspective of information as a variety of physical fields, their superposition and nonlinear interactions. The analogy of the description of physical fields by wave equations is shown. Technical channels of physical fields are viewed as a method of solving the task of information protection.

Ключевые слова: защита информации, поля.

Keywords: information protection, fields.

УДК 681.3278:519.72.5

Понятие информации. Имеются различные понятия определения информации. Есть философские понятия информации, определение информации в широком смысле как понимают люди, в узком научном смысле, какой ему придал Шеннон, и другие подходы. Например, по Н. Винеру, «Информация – обозначение содержания, полученного из внешнего мира в процессе приспособления к нему», по Д. Нейману, «Информация – совокупность сведений, информация – устранения неопределенности». ГОСТ Р 50922-96 определяет информацию как сведения о лицах, предметах, фактах, событиях, явлениях и процессах независимо от формы их представления.

В данной работе рассматривается физическая модель информации. Вводится понятие информация – физическое поле.

Физическим полем называется область пространства, где проявляют себя физические, достоверно зарегистрированные и точно измеренные силы. В рамках современной физики известны и изучены четыре вида материальных полей: гравитационное, электромагнитное – магнитное и/или электрическое, поля сильных взаимодействий – ядерное, слабых взаимодействий (см. рис. 1).

Имеются силовые поля в веществе и в средах, которые проявляются только при наличии материальной среды. К таким полям относятся: акустические, вибрационные, гидроакустические поля и др. Эти поля отсутствуют, если будет отсутствовать среда. Они характеризуются давлением, скоростью, ускорением и другими характеристиками.

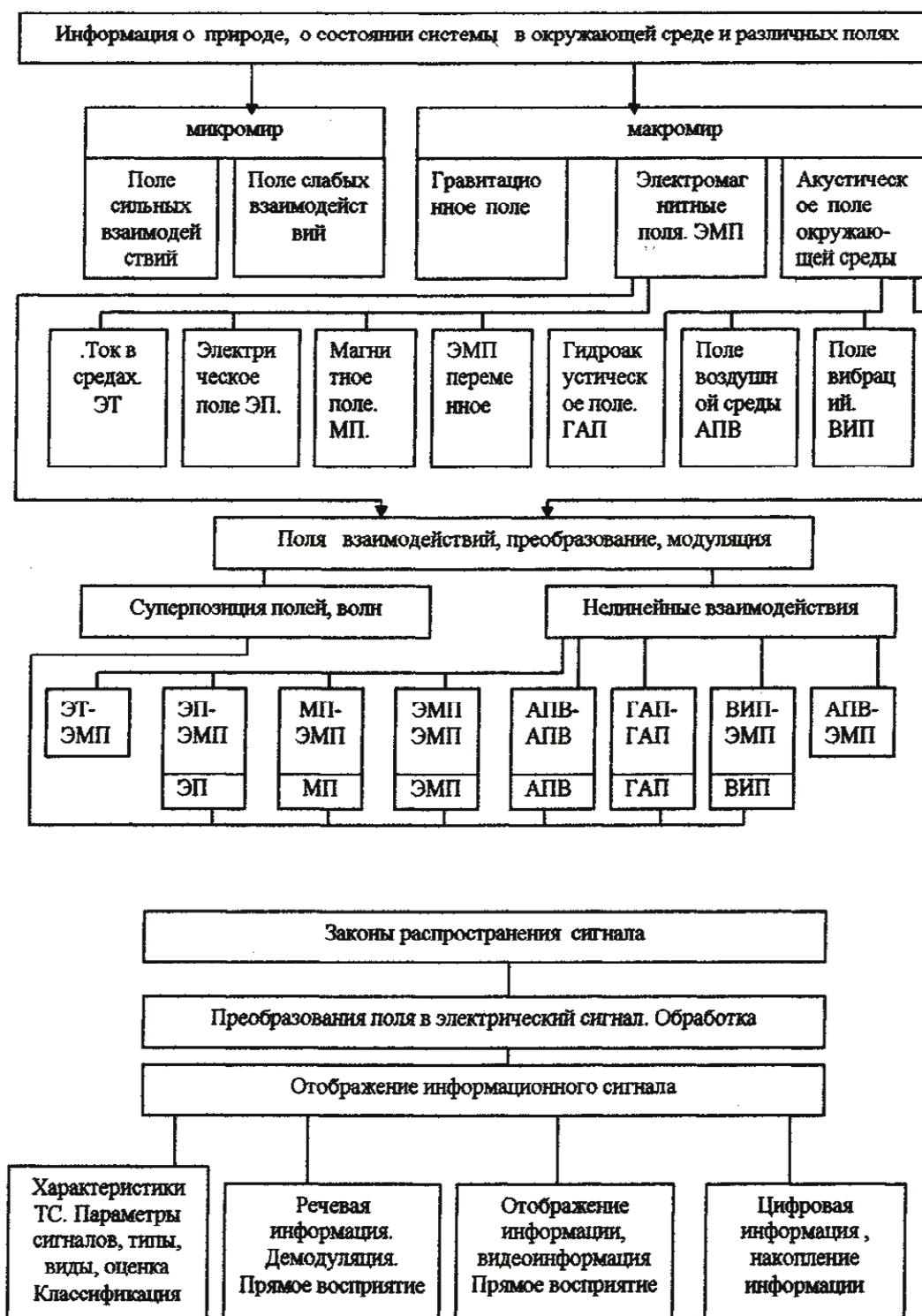


Рис. 1. Структура физических полей, информация, направление защиты

Рассмотрим ряд элементарных примеров для понятия «информация – это поле».

Человек видит окружающий мир – это отражение от объектов в видимом спектре электромагнитного *поля*. Восприятие или создание звука – это акустическое *поле*. Электрический ток – движение заряженных частиц под действием электрического или электромагнитного *поля*. Передача и прием сообщений по каналам связи обеспечиваются в различных частотных диапазонах электромагнитного *поля*.



Перемещение материальных частиц и тел, их информационное взаимодействие происходит в поле тяготения, в гравитационном *поле*.

Процессы в микромире происходят в *полях* сильных и слабых взаимодействий. Ряд примеров легко продолжить, но на каком конкретном случае мы бы ни остановились, принципы и идеи определяющие, раскрывающие *физические* процессы создания информации и ее отображения везде оказываются одинаковыми, – это физическое *поле*. Следовательно, физическое поле, как и информация, существует независимо от того воспринимается или регистрируется кем-то или чем-то.

Физическое поле – это особый вид материи. Материя – объективная реальность, данная нам в ощущениях. Считается, что материя существует либо *в виде вещества*, либо *в виде поля*.

Основное отличие *поля* от тел или частиц заключается в том, что оно локализовано в пространстве. Для описания состояния частицы требуется задать ограниченное число параметров, равное числу степеней свободы. (Для материальной точки это радиус-вектор r , задаваемый тремя проекциями на оси координат).

Чтобы знать параметры поля в любой точке пространства, нужно задать закон, по которому меняется поле в пространстве, и начальные параметры. Поле проявляется в силовом воздействии на тела или частицы (действует сила F). Одной из важных количественных характеристик поля является *напряженность*. Напряженность поля определяется как отношение силы, действующей на тело, к величине той количественной характеристики, которая участвует в создании поля и определяется полем, поэтому напряженность называют силовой характеристикой поля. Существенно, что напряженность поля является векторной величиной, так же как и сила, через которую она определяется. Таким образом, поле задано, если в каждой точке пространства известна его напряженность.

Создание, формирование поля, его распространение, регистрация, прием, измерение характеристик поля и преобразованного поля в электрический сигнал для отображения информации – это физическая суть создания и получения информации.

Если использовать конструктивный подход к понятию информации и рассматривать понятие «информация» как объект защиты, то этот объект будет описываться меньшим числом факторов, свойств, признаков.

Поэтому целесообразно информацию представить в виде многообразия физических полей, которые отражают среду переноса проявления источников информации, но не сущность информации.

Физические поля (информация) формируются, создаются природой, техническими системами, средствами (ТС), биологическими объектами.

Технические средства имеют так называемые техногенные физические поля. Эти поля несут данные, сведения как о самом техническом средстве, так и о содержании сведений, которые циркулируют в техническом средстве (например, речевое сообщение в средствах связи, сведения в видеосистемах, в ЭВМ и др.).

Информация – это не только физическое поле определенного вида, но это и так называемые поля взаимодействия электромагнитных полей, поля взаимодействия электромагнитных и акустических полей. При этом наблюдается два вида взаимодействий *Суперпозиция* полей, волн и *Нелинейные* взаимодействия (см. рис. 1).

Принцип суперпозиции. В общем случае, принцип суперпозиции – это допущение, согласно которому результирующий эффект сложного процесса воздействия эквивалентен сумме эффектов от каждого воздействия в отдельности. Разумеется, это определение предполагает, что эффекты не влияют друг на друга.

Сформулированный принцип справедлив, если система описывается линейными уравнениями. Слабое гравитационное поле с хорошей точностью подчиняется принципу суперпозиции. Для ряда случая электромагнитных полей принцип суперпозиции применим к системе, описываемой нелинейными уравнениями, т.е. меняющейся под действием внешних

эффектов, принцип суперпозиции неприменим. Примером нарушения принципа суперпозиции может служить магнитное поле в ферромагнетике. Другой пример – свет (сильное световое поле) в среде. Такое поле может генерировать в среде за счет нелинейного взаимодействия с ней, свет на длине волны в два, три или более раз меньший.

Сильное гравитационное поле не подчиняется принципу суперпозиции, поскольку оно описывается нелинейными уравнениями Эйнштейна. Разделы физики, которые изучают явления, в которых нарушается принцип суперпозиции, обычно называют нелинейными. Например, нелинейная оптика.

В математической модели будут рассмотрены слабые гравитационные, электромагнитные, акустические поля, к которым принцип суперпозиции применим. В дальнейшем рассмотрим суперпозицию и взаимодействия таких полей: электромагнитного поля (ЭМП), электрического поля (ЭП), магнитного поля (МП), гидроакустического поля (ГАП), акустического поля (АПВ), вибрационного поля (ВП). Примером такого взаимодействия может являться любое излучение акустическое или электромагнитное, в реальных условиях распространения при отражениях.

Нелинейные взаимодействия. Приведем ряд примеров описания преобразований составляющих ЭМП с ЭМП при наличии нелинейных элементов или структур. Кроме того, будем рассматривать взаимодействие акустического и вибрационного полей с электромагнитным полем на нелинейных элементах и нелинейных средах. Обратимся к рис. 1.

ЭТ-ЭМП. Классическим примером такого взаимодействия является модуляция электрическим током излучения переменного электромагнитного поля. Это передающие средства связи, телекоммуникаций, радиолокации, телевидения и т.д.

ЭП-ЭМП, МП-ЭМП. Составляющая ЭМП – электрическое поле и магнитное поле воздействуют на радиотехнические цепи радиопередающих устройств, где путем наводки или воздействия на нелинейные элементы транспонируются в другой частотный диапазон. Кроме того, наводятся на линии связи, электропитания и коммуникаций.

ЭМП-ЭМП. Наиболее объемное взаимодействие полей на нелинейных структурах. Охватывает широкий частотный диапазон электромагнитных волн. Воздействие на электрические цепи аналогично ЭП и МП, только защита от такого воздействия сложна. Сведения, которые находятся в таких сформированных полях, иногда очень объемные и не всегда дешифруются. Например, излучение от биологической структуры человека [1].

АПВ-ЭМП. Информационное акустическое поле преобразуется в электрический сигнал, который прямо или после последующих преобразований формируется в ЭМП. Например, акустоэлектрическое преобразование на поверхности.

ВП-ЭМП. Вибрационные колебания модулируют высокочастотные электромагнитные колебания на отражающихся поверхностях. Информация передается ЭМП.

ГАП-ГАП. За счет нелинейности жидкой среды формируются поля и спектры частот, которые содержат сведения о технических средствах. Например, кавитационный спектр, модуляционный спектр и др.

АПВ-АПВ. Формирование и снятие данных за счет взаимодействия акустических волн низких и высоких частот на нелинейных структурах.

Математическая модель физических полей макромира. Математическая модель охватывает класс неопределяемых абстрактных, символических математических объектов, таких как числа или векторы, и отношения между этими объектами.

Под математической моделью понимают количественную формализацию абстрактных представлений об изучаемой системе. Математическая модель – это формальное описание системы с помощью математических средств, дифференциальных, интегральных, разностных, алгебраических уравнений, а также неравенств, множеств и т.д.

Рассмотрим математическую модель физических полей макромира (гравитационного, электромагнитного, акустического) (см. рис. 1), которая характеризует информацию.

1. Математическая модель гравитационного поля

Математическую модель гравитационного поля представим дифференциальным уравнением гравитационного поля в ньютоновской механике [2]. Такое уравнение получается переходом от закона всемирного тяготения Ньютона, где сила взаимного притяжения двух тел, которые могут быть приняты за материальные точки, прямо пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними, к дифференциальным уравнениям в теории ньютоновского потенциала.

Итак, имеются две материальные точки с массами m и m_k , они притягиваются друг к другу по закону Ньютона и на точку m со стороны точки m_k действует сила, которая равна

$$F = -\gamma \frac{mm_k}{r_k^2} r_k^0,$$

где r_k – расстояние между точками m и m_k ; γ – гравитационная постоянная; r_k^0 – единичный вектор направления от m_k к m .

Потенциальный характер сил тяготения, т.е. $F_k = \text{grad } \Phi_k$, позволяет ввести скалярную характеристику гравитационного поля – потенциал, который для двух материальных точек равен: $\Phi_k = \gamma \frac{mm_k}{r_k}$.

Если в пространстве имеется n материальных точек с массами m_k ($k = 1, 2, \dots, n$) и рассматривается их влияние на одну материальную точку массы $m = 1$, которая может быть помещена в разные точки пространства (пробная масса), то со стороны всех точек m_k на пробную массу $m = 1$ будет действовать сила $F = \sum F_k$ и ее потенциал

$$\Phi = \sum \Phi_k = \gamma \sum m_k / r_k, \quad F_k = \text{grad } \Phi_k. \quad (1.1)$$

Распределение масс m_k создает в пространстве гравитационное поле с потенциалом Φ , которое можно обнаружить с помощью пробной массы, помещенной в рассматриваемую точку пространства. Напишем дифференциальное уравнение, которому должен удовлетворять потенциал сил тяготения Φ [2]. Рассмотрим функцию $1/r_k$, где $r_k = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 + (z - z_k)^2}$ – расстояние между точкой x, y, z , в которой помещена пробная масса, и точкой x_k, y_k, z_k , в которой находится k -я масса, создающая гравитационное поле, является гармонической функцией. Во всех точках x, y, z , для которых $r_k \neq 0$, функция $1/r_k$ удовлетворяет уравнению

Лапласа: $\nabla^2 \frac{1}{r_k} = \frac{\partial^2(1/r_k)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(1/r_k)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(1/r_k)}{\partial z^2} = 0$. Следовательно, потенциал Φ_k гравитационного поля одной материальной точки удовлетворяет уравнению: $\nabla^2 \Phi_k = 0$ или $\text{div } F_k = 0$, $F_k = \text{grad } \Phi_k$, т.е. $\text{rot } F_k = 0$. Уравнение Лапласа является линейным уравнением.

Потенциал гравитационного поля $\Phi(x, y, z)$, создаваемого непрерывным распределением масс по некоторому объему V , на основании (1.1) можно написать в виде:

$$\Phi(x, y, z) = \gamma \int \rho dV / r, \quad (1.2)$$

где $\rho dV = dm$; ρ – плотность распределения массы элемента объема dV ; dm – прирост массы.

Эта функция $\Phi(x, y, z)$ удовлетворяет уравнению Лапласа $\nabla^2 \Phi = 0$ в точках, где нет масс. Уравнение Лапласа для Φ равносильно уравнениям:

$$\text{div } F = 0, \quad \text{rot } F = 0, \quad F = \text{grad } \Phi. \quad (1.3)$$

Можно показать при весьма общих практически приемлемых допущениях относительно распределения плотности ρ , что потенциал Φ гравитационного поля (1.2) для точек x, y, z , расположенных внутри V , удовлетворяет уравнению Пуассона:

$$\text{div grad } \Phi = \nabla^2 \Phi = -4\pi\rho\gamma, \quad \Delta\Phi + 4\pi\rho\gamma = 0. \quad (1.4)$$

Уравнение (1.4) равносильно уравнениям:

$$\operatorname{div} F = -4\pi\rho\gamma, \operatorname{rot} F = 0, F = \operatorname{grad} \Phi. \quad (1.5)$$

Практически приходится обычно иметь дело со слабыми гравитационными полями, для которых уравнения поля линейны. Для таких полей в первом приближении справедлив принцип суперпозиции. Волновое уравнение слабого гравитационного поля можно получить, если добавить вторую производную по времени в уравнение (1.4), превратив уравнение Пуассона в уравнение Даламбера.

2. Математическая модель акустического поля

Акустика – область физики, исследующая упругие колебания и волны, их взаимодействие с веществом и применение.

Во всех средах (жидких, газообразных и твердых) распространение упругих волн происходит так: частицы среды в волне приобретают скорость, деформируются и в них возникают упругие напряжения, которые и передают волну дальше.

Акустика жидкостей и газов рассматривается на основе гидродинамики, где возмущения передаются силами давления, которые возникают при сжатии и расширении частиц. В твердых телах возникают еще и поля (сдвиговые) упругих напряжений.

Математическая модель акустического поля представлена полной системой уравнений акустики, которая состоит из уравнений движений, уравнения непрерывности и уравнения состояния. Уравнения акустики кратко можно характеризовать так [3].

Уравнения Эйлера – уравнения движения частиц под действием сил упругости среды. Рассмотрим частицу среды малого объема, ограниченную поверхностью. Так как частица мала, а характеристики среды непрерывны, можем считать плотность по всей среде постоянной, массу частицы приравнять произведению плотности на объем. Далее, полагая, что вся частица движется как одно целое, найти ее ускорение как производную dv/dt ее скорости v по времени t . Рассмотрим давление p и сторонние силы $F_{a.cm}$, действующие на частицу со стороны окружающей среды, – силы давления.

Применяя к частице, находящейся под действием только сил давления, второй закон Ньютона и используя теорему Гаусса-Остроградского заменяя интеграл по поверхности интегралом по объему, а также учитывая непрерывности всех характеристик среды, что позволяет градиент давления на протяжении малой частицы считать постоянным, получить уравнение Эйлера:

$$\frac{dv}{dt} + \nabla p = 0. \quad (2.1)$$

Если помимо сил давления на среду действуют сторонние силы $F_{a.cm}$, распределенные с плотностью ρ на единицу объема, то уравнение (2.1) примет вид: $\rho \frac{dv}{dt} + \nabla p = F_{a.cm}$.

Уравнение движения среды есть *нелинейное* векторное уравнение первого порядка относительно характеристик среды p, v, ρ .

Уравнение неразрывности среды. Если в среде не образуется разрывов (как, например, разрывы при кавитации), то уравнение неразрывности применимо к исследуемой среде.

Рассмотрим объем среды, ограниченный неподвижной поверхностью S . Если разрывов нет, то приращение массы в объеме равно массе среды, втекающей через поверхность S . Запишем скорость приращения массы в малом объеме, массу, втекающую за единицу времени через элемент поверхности dS , равную $\rho v dS$.

Заменяя интеграл по поверхности интегралом по объему, получим уравнение неразрывности в виде:

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla (\rho v) = 0. \quad (2.2)$$

Уравнение неразрывности скалярно и как уравнение Эйлера нелинейно относительно характеристик среды. В дальнейшем встретятся случаи движения среды, удовлетворяющие вместо уравнения неразрывности уравнению вида:

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla (\rho v) = \rho V.$$

Это уравнение можно так же интерпретировать, как уравнение неразрывности, но примененное к среде, куда поступает «из ниоткуда» дополнительное «стороннее» количество среды. Величину $V_{ст}$ называют плотностью сторонней объемной скорости: она дает дополнительный объем, поступающий за единицу времени в единичный объем.

Уравнение состояния связывает давление, плотность (или сжатие) и температуру среды. Уравнение состояния не имеет какого-либо стандартного вида для всех веществ, наподобие уравнения Эйлера или уравнения неразрывности. В общем виде уравнение можно записать так:

$$f(P, \rho, T) = 0. \quad (2.3)$$

Уравнение состояния также нелинейно.

Если при данном движении среды плотность однозначно связана с давлением (так бывает обычно в акустике), то уравнение состояния можно записать в виде:

$$\rho = \rho(P) \quad \text{или} \quad s = s(p). \quad (2.4)$$

Система уравнений (2.1), (2.2) и (2.3) или (2.4) является *полной системой уравнений гидродинамики*.

Волновое уравнение. Полная система уравнений гидродинамики – это нелинейные, точные уравнения. В дальнейшем будем пользоваться приближенными уравнениями линейного типа. Исключая все величины, характеризующие волну, кроме давления, приведем полную систему уравнений акустики к одному уравнению относительно давления p :

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0. \quad (2.5)$$

Это волновое уравнение второго порядка для давления, где c – скорость звука.

Если записать выражение для давления гармонического колебания волн и затем подставить его в волновое уравнение (2.5), то получим волновое уравнения Гельмгольца:

$$\nabla^2 p - k^2 p = 0, \quad (2.6)$$

где $k = \omega / c$.

3. Математическая модель электромагнитного поля

Математическая модель электромагнитного поля представляет систему уравнений электромагнитного поля в полном виде или систему уравнений Максвелла [4].

Электромагнитное поле характеризуется следующими векторными величинами: E и H – векторы напряженности электрического и магнитного полей, D и B – векторы электрической и магнитной индукции, I и I_m – плотность токов электрической и магнитной проводимости, ρ и ρ_m – плотность электрических и магнитных зарядов.

Дифференциальная форма системы уравнений выглядит так:

$$\text{rot } H = \frac{\partial}{\partial t} D + \delta, \quad (3.1) \quad \text{rot } E = - \frac{\partial}{\partial t} B, \quad (3.2)$$

$$\text{div } D = \rho, \quad (3.3) \quad \text{div } B = 0, \quad (3.4)$$

$$B = \mu H, \quad (3.5) \quad D = \xi E, \quad (3.6) \quad \delta = \sigma E, \quad (3.7)$$

где μ – магнитная проницаемость; ξ – диэлектрическая проницаемость; σ – удельная проводимость.

Эти уравнения будут исходными при рассмотрении переменных электромагнитных полей и процессов.

Первое уравнение Максвелла является дифференциальной формулировкой закона полного тока. Физический смысл 1-го уравнения Максвелла: источниками вихревых магнитных полей являются токи проводимости и токи смещения.

Величина δ в правой части (3.1) есть плотность тока проводимости. Это вектор, указывающий направление движения зарядов.

Законы электромагнетизма – это законы макроскопических процессов, в которых усредняется действие огромных количеств элементарных частиц материи. С точки зрения этих законов, среда представляется сплошной.

Второе уравнение Максвелла (3.2) является дифференциальной формулировкой закона электромагнитной индукции и выражает скорость изменения магнитной индукции B через пространственную производную (rot) напряженности электрического поля E .

Физический смысл: вихревое электрическое поле создается переменным магнитным полем.

Третье уравнение Максвелла является дифференциальной формулировкой теоремы Гаусса для электрических полей. Физический смысл: источниками электрического поля (векторов E и D) являются заряды с плотностью ρ . Дифференциальные уравнения (3.3) показывают, что расходимость электрической индукции равна объемной плотности заряда.

Четвертое уравнение Максвелла является дифференциальной формулировкой теоремы Гаусса для магнитных полей. Физический смысл. Дивергенция вектора B в любой точке пространства равняется нулю, т.е. – источников нет (магнитные заряды в природе отсутствуют). Нет ни стыков, ни источников. Линии магнитной индукции непрерывны.

Из уравнений (3.1) и (3.3) можно сделать вывод: $\text{div } \delta = \frac{\partial}{\partial t} \rho$. Это уравнение непрерывности, закон сохранения заряда.

Уравнения (3.5), (3.6), (3.7) характеризуют связь векторов поля с материальной средой.

Установим волновой характер ЭМП. При распространении ЭМП с конечной скоростью происходит запаздывание его по фазе, результатом чего является волновой характер распространения. Можно записать первые два уравнения Максвелла в комплексной форме и заменить в них индукции B и D напряженностями $\text{rot } E$ и $\text{rot } H$ и ввести функцию комплексной диэлектрической проницаемости проводящей среды при монохроматическом поле. Затем получится полная система уравнений монохроматического ЭМП с комплексными проницаемостью и напряженностями E и H . Волновой характер ЭМП этого гармонического во времени процесса в области без источников получается, если исключить вектор E или вектор H в уравнениях (3.1) и (3.2), применив оператор rot и учитывая, что расходимость (div) вектора $H = 0$.

Для однородной непроводящей среды волновое уравнение переходит в уравнение Гельмгольца, которое запишется так:

$$\nabla^2 H + k^2 H = 0, \quad (3.8)$$

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0, \quad (3.9)$$

где $k^2 = \omega^2 \varepsilon \mu$ – волновое число.

Об аналогии описания физических полей. Из рассмотренных математических моделей физических полей микромира видно, что гравитационное, акустическое и электромагнитное поля описываются при определенных условиях волновыми уравнениями (1.4), (2.5), (2.6), (3.8), (3.9). Мы имеем ситуацию, когда различные физические явления (поля) описываются аналогичными дифференциальными и другими уравнениями. То есть между физическими явлениями существует аналогия, которая основывается на сходстве уравнений, лежащих в основе описания данных физических явлений.



Аналогия ЭМП и акустического поля.

Например, акустические волны описываются уравнениями Гельмгольца (2.6). Электромагнитные волны описываются уравнениями Максвелла, которые после соответствующих преобразований также переходят в уравнения Гельмгольца для однородной среды (3.8). То есть в двумерном случае уравнения Максвелла сводятся к двум независимым уравнениям для векторов напряженности электрического и магнитного полей:

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0;$$

$$\nabla^2 H + k^2 H = 0.$$

Такие же уравнения можно записать для каждой из составляющих векторов вдоль осей x , y , z . В результате для каждой составляющей получаем уравнение Гельмгольца. Поэтому в двумерном случае решения акустических и электромагнитных задач совпадают. Однако при сопоставлении решений задач необходимо привести в соответствие и граничные условия. Рассмотрим примеры [5].

При абсолютно мягкой поверхности (для ЭМП – абсолютная проводящая поверхность и для АП – давление на поверхности равно нулю), если электромагнитная волна, падающая на поверхность имеет E -поляризацию (вектор E параллелен оси y), решение для вектора E полностью переносится на величину звукового давления p для абсолютно мягкой поверхности.

При абсолютно жесткой поверхности решение для вектора H , поляризованного параллельно образующей оси y , переносится на величину звукового давления p для абсолютно жесткой поверхности.

Промежуточный случай для электромагнитных волн, когда векторы E и H не параллельны границам раздела, распадается на два рассмотренных случая.

Задача об отражении звуковых волн от плоской границы раздела двух различных сред аналогична задаче об отражении ЭМВ от плоской границы двух диэлектрических сред. Было получено, что аналогом звукового давления p в рассматриваемой задаче будет E_y , а аналогом нормальной составляющей колебательной скорости V_z – величина H_x . Выражение, определяющее коэффициент отражения для вектора $E = E_y$, будет аналогично формуле для коэффициента отражения звуковой волны (по давлению).

Для акустических волн сохраняется известный закон преломления в оптическом диапазоне ЭМВ. Сохраняются также другие закономерности.

В трехмерном случае за редким исключением векторные уравнения Максвелла не сводятся к скалярным и найти решения для электромагнитных волн, которые бы соответствовали и звуковым волнам, невозможно. Однако несоответствие между решениями акустических и электромагнитных задач постепенно уменьшается при увеличении волнового размера тела.

Поэтому все результаты, полученные в теории излучения электромагнитных волн, остаются справедливыми и в акустическом случае.

Аналогия ЭМП и гравитационного поля.

В математической модели гравитационное поле описывается уравнениями (1.4) и (1.5). Покажем, что это уравнение аналогично уравнению Максвелла для электростатического поля. Так как задача определения потенциала гравитационного поля и силы, действующей со стороны поля на пробную единичную массу, может быть поставлена как задача об определении функции $\Phi(x,y,z)$, исчезающей в бесконечности и удовлетворяющей уравнению Лапласа всюду вне V и уравнению Пуассона всюду внутри V , или как задача определения сил F , удовлетворяющих уравнениям (1.3) и (1.5). Такого рода постановка задачи в теории ньютоновского потенциала полностью аналогична постановке задачи электростатики на основе уравнений Максвелла. Можно показать, что решение в бесконечном пространстве задачи об отыскании функции $\Phi(x,y,z)$, исчезающей в бесконечности, приводит к формуле (1.2), выражающей собой закон гравитационного тяготения.

Векторной характеристикой гравитационного поля является его напряженность – силовая характеристика точки поля тяготения, равная отношению силы тяготения F , действующей на помещенную в него материальную точку к массе этой точки m .

Предположение о существовании гравитационных волн есть один из вариантов решения уравнений Эйнштейна.

Существование электромагнитных волн также было результатом одного из возможных решений уравнений Максвелла (переменное движение электрических зарядов и переменные электрические токи являются источниками электромагнитных волн).

Точно также считается, что переменное движение массы приводит к излучению гравитационных волн. В настоящее время гравитационные волны определяют как переменное гравитационное поле, распространяющееся со скоростью света и проявляющееся в возникновении относительных ускорений тел.

Интерпретация модели для реальных объектов защиты информации.

На рис. 2 представлена реальная картина наличия физических полей, их суперпозиция и взаимодействия для простого объекта информатизации, в качестве которого выбрано автоматизированное рабочее место на базе одного персонального компьютера. Разнообразие параметров физических полей представлено напряженностью электрического поля E , напряженностью магнитного H и электромагнитного E, H полей, частотой f , коэффициентом модуляции, спектром сигнала, напряжением, током и другими параметрами.

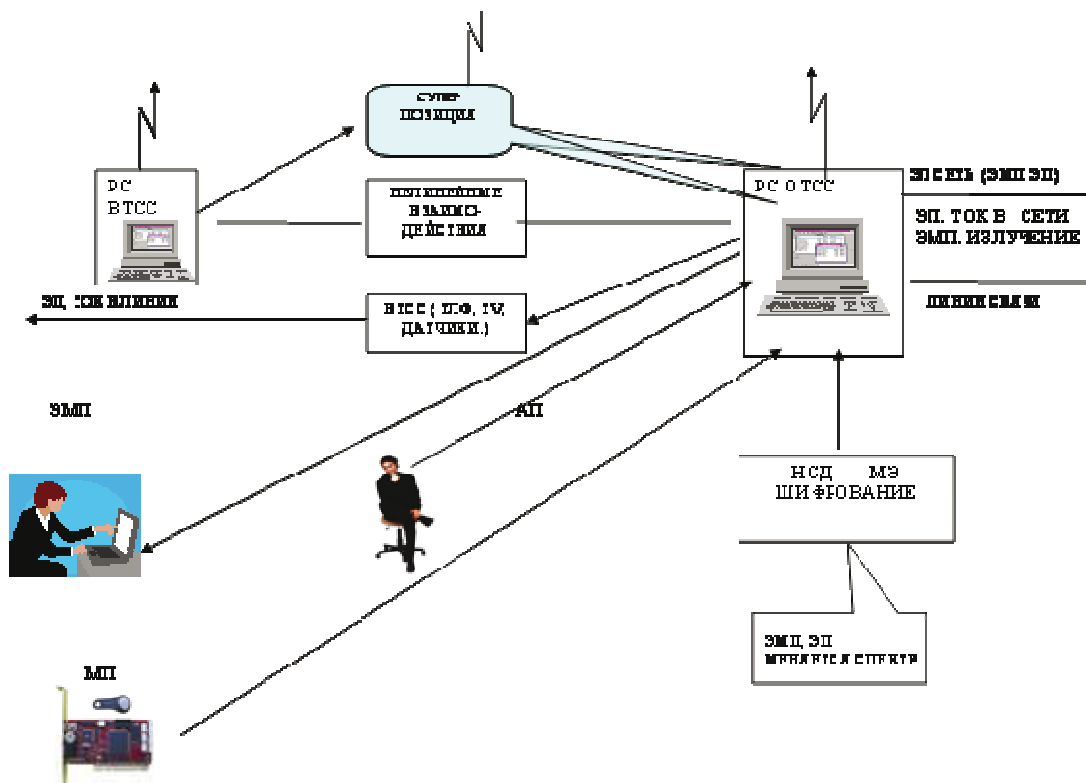


Рис. 2. Картина физических полей, их суперпозиция и взаимодействия для автоматизированного рабочего места на базе одного персонального компьютера

Рис. 3 отражает картину акустического поля, его суперпозицию и нелинейные взаимодействия на примере помещения, где циркулирует защищаемые акустические поля. Поле характеризуется такими параметрами, как частота f , давление P , колебательная скорость V_k , ускорение a , разборчивость речи W и др.

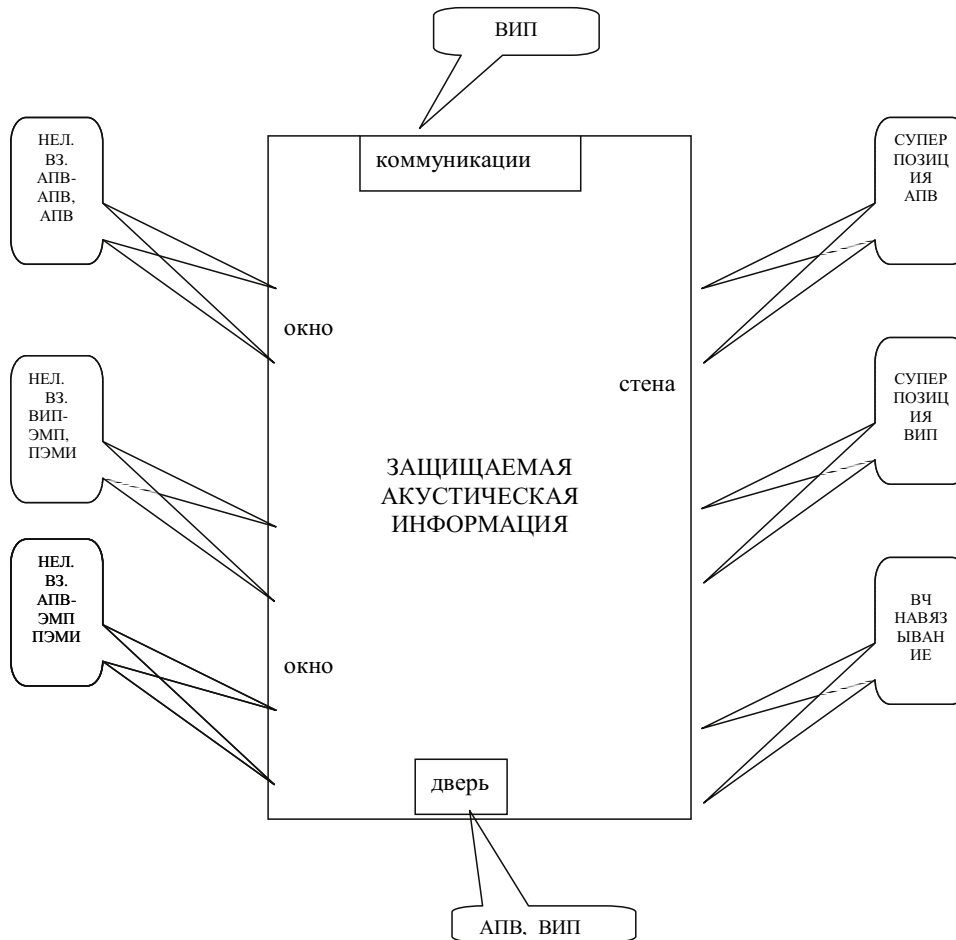


Рис. 3. Картина акустического поля, его суперпозиция и нелинейные взаимодействия на примере одного помещения

Выводы:

1. Введено понятие информации как физическое поле.
2. Показано, что вся информация, сформированная и воспринимаемая, – это физическое поле или суперпозиция и взаимодействие полей.
3. Представлена математическая модель физических полей.
4. Показана аналогия описания и изучения физических полей с помощью волновых уравнений.
5. Материал данной работы является исходными данными для реализации модели исследования согласно рис. 1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вильдяйкин, Г. Ф. Об информативности электромагнитного излучения биологических систем : тезисы докладов / Г. Ф. Вильдяйкин, С. Ф. Воропаев. – Хмельницкий : Хмельницкое высшее артиллерийское училище, 1983.
2. Седов, Л. И. Механика сплошной среды. Т. 1, Т. 2 / Л. И. Седов. – М. : Наука, 1976.
3. Исаакович, М. А. Общая акустика / М. А. Исаакович. – М. : Наука, 1973.
4. Никольский, В. В. Теория электромагнитного поля / В. В. Никольский. – М. : Высш. шк., 1964.
5. Шендеров, Е. Л. Волновые задачи гидроакустики / Е. Л. Шендеров. – Л. : Судостроение, 1972.

Мешков А. С., Суздорф В. И.

ФОРМИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ МАССОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Мешков А. С., Суздорф В. И.

A.S. Meshkov, V.I. Susdorf

ФОРМИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ МАССОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

MODELLING THE PARAMETERS OF A LARGE ELECTRIC DRIVE



Мешков Александр Сергеевич – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kepapu@knastu.ru.

Mr. Alexander S. Meshkov – PhD Candidate, Department of Electro Drive Engineering and Industrial Automation, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: kepapu@knastu.ru.



Суздорф Виктор Иванович – кандидат технических наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kepapu@knastu.ru.

Mr. Victor I. Susdorf - PhD in Engineering, Professor at the Department of Electro Drive Engineering and Industrial Automation, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: kepapu@knastu.ru.

Аннотация. Рассмотрен способ стабилизации частоты вращения однофазного коллекторного электродвигателя, сигналом обратной связи в котором служит время спада ЭДС самоиндукции двигателя до нуля. Представлена математическая модель электропривода. С помощью программного комплекса MatLab получены статические характеристики двигателя.

Summary. The paper considers a method for stabilizing the rotation frequency of a single-phase commutator motor, with the feedback signal being the time of the fall of self-induced electromotive force of the drive down to zero. A mathematical model of the actuator is presented. Using the Matlab software, static characteristics of the engine are obtained.

Ключевые слова: однофазный коллекторный двигатель, стабилизация скорости, статическая характеристика, ЭДС самоиндукции.

Keywords: Single-phase commutator motor, speed hold, static characteristic, self-induction voltage.

УДК 621.313

Введение

Среди всех типов электродвигателей, применяемых в электроприводе массового назначения, одним из наиболее распространенных является однофазный коллекторный двигатель (ОКД) последовательного возбуждения. Высокоскоростные электродвигатели малой мощности находят широкое применение в медицинском оборудовании, бытовой технике и электрифицированном инструменте. Наличие таких качеств, как мягкие механические характеристики и большая перегрузочная способность по моменту, по большей части и определяют широкое применение этих электродвигателей.

При реализации регулируемого электропривода на основе ОКД возникают определённые трудности с формированием требуемых статических и динамических характеристик

и, в частности, с созданием систем стабилизации скорости. Они вызваны в первую очередь двумя факторами: 1) наличием относительно большого момента потерь, обусловленного потерями на вентиляцию и трением в подшипниках, из-за чего подключение к валу двигателя датчика скорости приведёт к ещё большему увеличению таких потерь; 2) отсутствием простых и надежных промышленно выпускаемых датчиков скорости для измерения скоростей выше 15000 об/мин.

Вследствие приведённых выше причин становится неэффективным использование традиционного датчика скорости при скоростях ниже 15000 об/мин и невозможным при скоростях выше 15000 об/мин. Ряд разработчиков (Bosch, MerloniProgetti и др.) предложил использовать косвенное измерение скорости двигателя. Для этого, как правило, необходимо измерять внутренние координаты электропривода. Одним из возможных решений было бы использование обратной связи по ЭДС вращения двигателя, но в приводах с ОКД последовательного возбуждения такая связь является трудно реализуемой из-за слабовыраженной зависимости ЭДС от частоты вращения, кроме того, в присущих для данного типа привода режимах прерывистого тока ЭДС равна нулю. По тем же причинам мне могут найти применения обратная связь по напряжению двигателя, а также осуществление стабилизации частоты вращения путем отслеживания частоты коллекторных пульсаций напряжения. Удобным является применение положительной обратной связи по току двигателя. Указанная связь проще реализуется либо с помощью шунта, либо трансформатора тока или же в зависимости от ЭДС самоиндукции цепи двигателя. Недостатком такого типа обратной связи служит то, что сигнал на её выходе не несет полной информации о частоте вращения и её изменениях, вызванных отдельными возмущениями (нагрев обмоток, изменение напряжения сети).

Решением описанных проблем может быть использование структуры, формирующей сигнал обратной связи в виде частного от текущих значений тока и частоты вращения двигателя при импульсном питании последнего. Для этого измеряется время спада ЭДС самоиндукции двигателя до нуля. Это время с большой степенью точности пропорционально значению тока якоря и обратно пропорционально частоте вращения двигателя. Достоинством указанного метода является возможность учесть большое число возмущений, в том числе нагрев обмоток двигателя, изменение напряжения сети и т.д.[1].

В данной статье рассмотрены реализация указанного способа стабилизации скорости ОКД при питании от широтно-импульсного преобразователя и статические характеристики такого привода.

Математическая модель электропривода с ОКД в системе стабилизации скорости

Якорная цепь ОКД описывается следующим стандартным уравнением [2]:

$$i(t) \cdot r_{яц} + \frac{di(t)}{dt} \cdot L_{яц} + c \cdot k_{\Phi} \cdot i(t) \cdot \omega(t) = U_{пит}(t), \quad (1)$$

где $U_{пит}(t)$ – напряжение питания двигателя (на выходе ШИП), В; $i(t)$ – ток якоря ОКД, А; $r_{яц}$ – суммарное активное сопротивление обмоток якорной цепи, Ом; $L_{яц}$ – суммарная индуктивность обмоток якорной цепи, Гн; c – конструктивный коэффициент электродвигателя; k_{Φ} – коэффициент пропорциональности между током двигателя и магнитным потоком; $\omega(t)$ – угловая частота вращения двигателя, c^{-1} .

Время спада ЭДС ОКД до нуля прямо пропорционально электромагнитной постоянной времени двигателя, и измерение её производится в момент, когда транзистор ШИП выключен и двигатель отключен от сети, а ток якоря протекает по шунтирующей якорь разрядной цепочке. Для этого случая перепишем уравнение (1) в операторной форме записи:

$$i(p) \cdot r_{яц} + i(p) \cdot p \cdot L_{яц} + c \cdot k_{\Phi} \cdot i(p) \cdot \omega(p) = 0. \quad (2)$$

Из последнего уравнения можно выразить постоянную времени, она определяется выражением:

$$T_{окд} = \frac{L_{яц}}{R_{яц} + c \cdot k_{\Phi} \cdot \omega(p)}. \quad (3)$$

Из представленных уравнений видно, что для поддержания стабильной скорости вращения двигателя необходимо поддерживать постоянным время спада ЭДС самоиндукции до нуля. Это осуществляется регулированием ширины импульсов питающего напряжения.

При решении поставленной задачи сделано допущение о том, что кривая намагничивания двигателя аппроксимируется двумя прямыми линиями, соответствующие режиму, когда сталь ещё не насыщена, и режиму насыщения. Но так как ток самоиндукции двигателя составляет 10-15% от номинального тока, то в расчетах используется только одно значение $k_{\Phi} = const$, соответствующее режиму ненасыщения.

Итак, как было сказано, от значения электромагнитной постоянной времени напрямую зависит время спада тока самоиндукции до нуля. И также оно обратно пропорционально текущей частоте вращения. Отсюда можно выделить два варианта построения модели данной системы управления: 1) определение постоянной времени, используя значение времени спада тока самоиндукции до нуля; 2) вычисление электромагнитной постоянной времени согласно уравнению (3). Для моделирования данного способа стабилизации частоты вращения не принципиально, каким из этих вариантов пользоваться. Гораздо удобнее второй вариант, тем более, что среда моделирования MatLab легко позволяет рассчитать скорость вращения. Но как было сказано ранее, на практике производить измерение скорости весьма затруднительно.

В соответствии с предложенным способом стабилизации скорости разработана функциональная схема такого электропривода. Она представлена на рис. 1.

Электропривод подключается к бытовой питающей сети напряжением 220 В (50 Гц), которое выпрямляется неуправляемым выпрямителем (В). Затем выпрямленное напряжение поступает на вход одноплечевого широтно-импульсного преобразователя (ШИП) с симметричным законом управления.

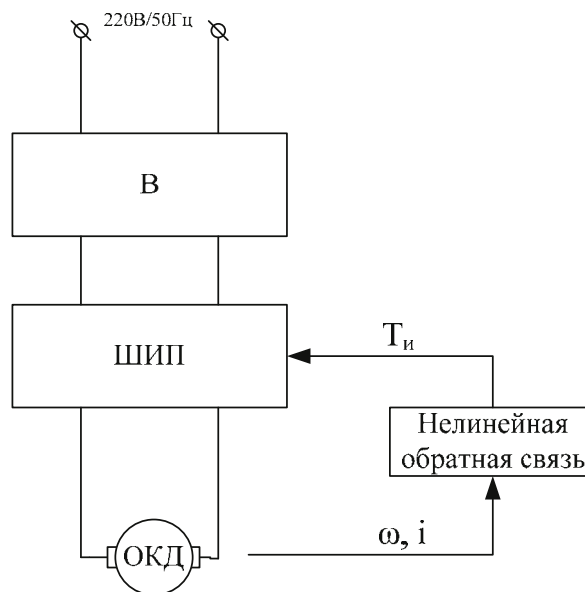


Рис. 1. Функциональная схема системы стабилизации скорости с ОКД

Непосредственно к ШИП подключается ОКД, с которого снимаются значения его внутренних координат. В блоке нелинейной обратной связи вычисляется значение электромагнитной постоянной времени и формируется пропорциональный ей управляющий сигнал для ШИП.

В качестве среды разработки и моделирования системы управления ОКД с нелинейной обратной связью использовался пакет инженерных и специализированных вычислений MatLab, как наиболее мощный на сегодняшний день инструмент анализа и синтеза систем автоматического управления. Модель представлена на рис. 2.

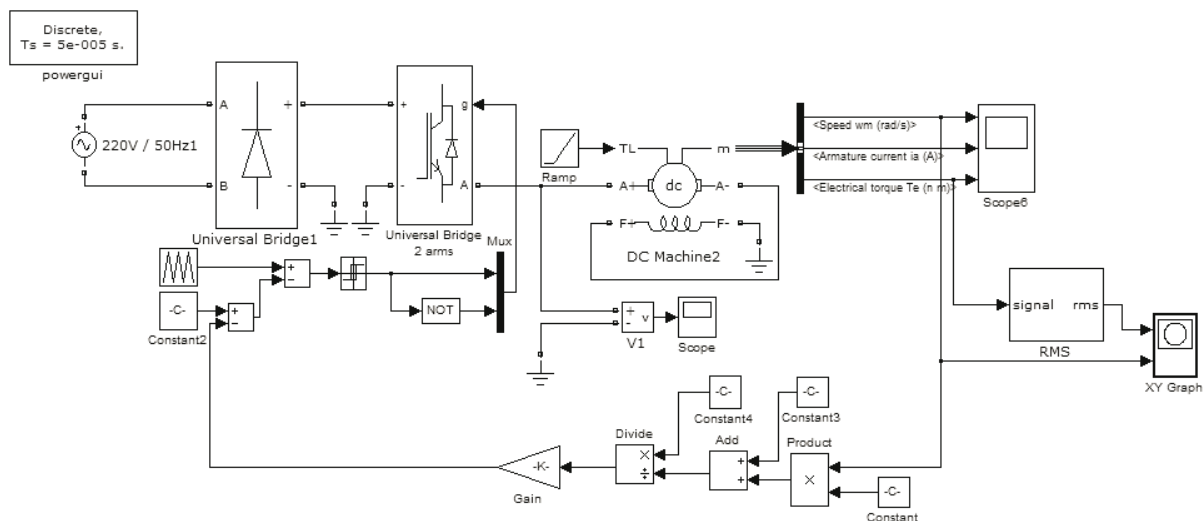


Рис. 2. Модель разрабатываемой системы управления

При моделировании использовались данные двигателя серии КОО-5361: $U_n = 220$ В, $P_n = 300$ Вт, $n_n = 12000$ об/мин, $M_n = 0.252$ Н·м.

Целью моделирования системы электропривода является получение статических механических характеристик для оценки стабилизации скорости. Результаты моделирования разомкнутой системы представлены на рис. 3.

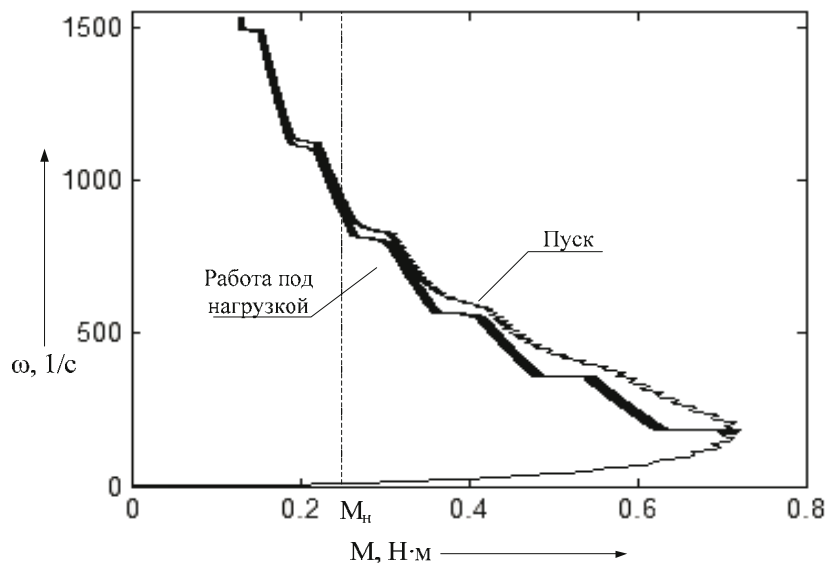


Рис. 3. Статическая характеристика разомкнутой системы электропривода

На нем четко виден участок пуска ОКД. Когда скорость достигает своего максимального значения при минимальном статическом моменте, который определяется постоянным

моментом потерь, подается линейно нарастающий момент нагрузки и скорость постепенно падает.

На рис. 4 представлена статическая характеристика замкнутой системы с нелинейной обратной связью. Здесь также хорошо представлен режим пуска. При работе на номинальную нагрузку статическая характеристика является абсолютно жесткой. Когда статический момент достигает критического значения, скорость начинает падать.

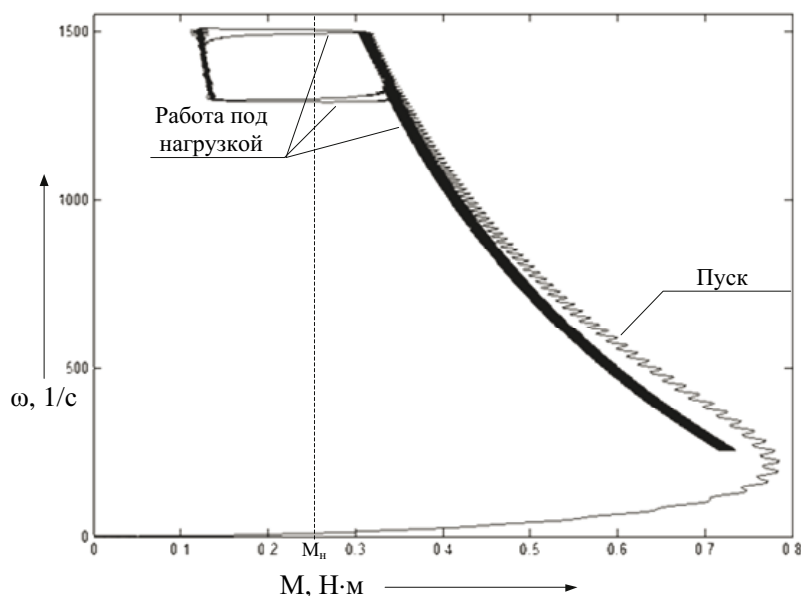


Рис. 4. Статическая характеристика замкнутой системы

Основным критерием сравнения качества статических характеристик является их жесткость в рабочем диапазоне нагрузок (от 0.12 до 0.35 Н·м). Жесткость статической характеристики разомкнутой системы, согласно результатам проведенного моделирования, равна: $\beta_p = 2.121 \cdot 10^{-4}$. Жесткость механической характеристики замкнутой системы: $\beta_p \approx \infty$.

Заключение

В статье предложен способ стабилизации частоты вращения ОКД и приведено моделирование такой системы управления. Проведенные исследования показали возможность формирования статических механических характеристик с заданными показателями жесткости. Разработанная модель обеспечила высокую сходимость с экспериментом, результаты которого приведены в статье [3], для того же электродвигателя серии КОО 561. Разработанный способ позволяет решать проблему стабилизации скорости высокоскоростных ОКД последовательного возбуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 997216 СССР, МКЛ³ Н 02 Р 5/12. Способ стабилизации частоты вращения однофазного коллекторного электродвигателя / А. Е. Алехин, А. С. Бобровский, Я. В. Петров, В. И. Суздорф (СССР) №3240934/24-07 ; заявл. 28.01.81 ; опубл. 15.02.83, Бюл. № 6-3 с.
2. Андреев, В. П. Основы электропривода / В. П. Андреев, Ю. А. Сабинин. – Л. : Госэнергоиздат, 1963.
3. Алехин, А. Е. Структура и характеристики однофазного электропривода массового назначения / А. Е. Алехин, В. И. Суздорф // Автоматизация электромеханических систем. – Новосибирск : НЭТИ, 1983.

Сарилов М. Ю.
M.Yu. Sarilov

**ПРИМЕНЕНИЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ИССЛЕДОВАНИЮ
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ПРОЦЕССА**

A SYNERGY APPROACH TO THE STUDY OF ELECTROEROSION PROCESSES



Сарилов Михаил Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Mr. Mikhail Yu. Sarilov – Doctor of Engineering, Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: sarilov@knastu.ru

Аннотация. В данной статье дано краткое понятие синергетики и синергетического подхода к электроэрозионной обработке (ЭЭО). Даны представления об изменении энтропии в процессе ЭЭО в виде соответствующих формул, позволяющих моделировать эти изменения.

Summary. This paper deals with the synergetic approach to electrical discharge machining. It presents the idea of how entropy changes during the process of EDM, with formulas to model such changes.

Ключевые слова: синергетика, энтропия, неравновесный процесс, ЭЭО, колебания, устойчивость, диссипативная структура, энергия, эффективность, критерий.

Keywords: synergetics, entropy, non-equilibrium processes, EDM, vibrations, stability, dissipative structure, energy, efficiency, criterion.

УДК 621.9.048.4: 681.324

Синергетика показывает, как законы природы приводят к появлению определенного порядка в неупорядоченных системах и затем к усложнению и развитию образовавшихся упорядоченных структур. М. Эйгеном было показано, что в сложных сильно неравновесных системах возможно возникновение записи информации в виде некоторого кода, с помощью которого управляется самовоспроизведение образовавшихся структур. Общая теория процессов самоорганизации в открытых, сильно неравновесных системах развивается в нелинейной термодинамике на основе установленного Гленсдорфом и Пригожиным универсального критерия эволюции. Этот критерий является обобщением принципа минимального производства энтропии на нелинейные процессы и состоит в следующем [1].

Полное производство энтропии в системе равно:

$$P = \int_V \sigma dV = \int_V \sum_i I_i X_i dV. \quad (1)$$

Представим производную dP/dt в виде двух слагаемых:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \int_V \sum_i I_i \frac{\partial X_i}{\partial t} dV + \int_V \sum_i \frac{\partial I_i}{\partial t} X_i dV = \frac{\partial_X P}{\partial t} + \frac{\partial_I P}{\partial t}, \quad (2)$$

первое из которых определяет скорость изменения производства энтропии, обусловленную изменением термодинамических сил, а второе обусловлено изменением потоков. В области

линейных процессов оба слагаемых одинаковы и производная $\partial P/\partial t$ выражает принцип минимума производства энтропии. В самом деле, используя линейный закон (1) и соотношения Онсагера (2), имеем

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_x}{\partial t} &= \int_V \sum_i I_i \frac{\partial X_i}{\partial t} dV = \int_V \sum_{i,k} L_{ik} X_k \frac{\partial X_i}{\partial t} dV = \int_V \sum_{i,k} X_k \frac{\partial}{\partial t} (L_{ki} X_i) dV = \\ &= \int_V \sum_k \frac{\partial I_k}{\partial t} X_k dV = \frac{\partial I P}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{\partial P}{\partial t} \leq 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Неравенство (3) следует из принципа о минимальном производстве энтропии. В нелинейной области величина скорости производства энтропии $\partial P/\partial t$ не имеет какого-либо общего свойства. Однако, как показали Гленсдорф и Пригожин, величина $d_x P/\partial t$ удовлетворяет неравенству общего характера:

$$\frac{\partial_x P}{\partial t} \leq 0, \quad (4)$$

которое является обобщением принципа минимального производства энтропии. Это неравенство не зависит ни от каких предположений о характере связей между потоками и силами в условиях локального равновесия. Ввиду большой общности, соотношение (4) называется универсальным критерием эволюции Гленсдорфа-Пригожина. Согласно этому критерию, в любой неравновесной системе с фиксированными граничными условиями процессы идут так, что скорость изменения производства энтропии, обусловленная изменением термодинамических сил, уменьшается. Знак равенства в (4) относится к стационарному состоянию.

Заметим, что универсальный критерий эволюции Гленсдорфа-Пригожина является косвенным следствием второго начала термодинамики для неравновесных процессов. Критерий эволюции (4) определяет только часть прироста энтропии, связанную с изменением термодинамических сил, поэтому он не позволяет ввести такую функцию состояния – термодинамический потенциал, который бы в стационарном состоянии имел экстремум, подобно энтропии, энергии Гельмгольца, энергии Гиббса при малых (спонтанных) отклонениях от равновесия. Однако при некоторых условиях форма $d_x P$ приобретает свойства полного дифференциала, что позволяет и в сильно неравновесной области ввести локальные потенциалы с экстремальными свойствами.

Упорядоченные структуры, возникающие согласно критерию (4) при необратимых процессах в открытых системах вдали от равновесия в нелинейной области, когда параметры систем превышают определенные критические значения, Пригожин назвал диссипативными структурами. Существуют пространственные, временные и пространственно-временные диссипативные структуры.

Первый закон термодинамики – закон сохранения энергии: ни одна материальная система не может развиваться или функционировать, не потребляя энергии ΔE , которая расходуется на совершение работы A_T , на изменение внутренней энергии системы ΔU и на рассеивание тепла в окружающую среду Q_{oc} :

$$\Delta E = \Delta U + A_T + Q_{oc}.$$

Работа A_T может совершаться в различных формах (механическая, электрическая и т.д.) и расходуется на изменение состояния систем, например, упорядочение структуры и т.д.

Второй закон термодинамики – закон возрастания энтропии: реальные изолированные макроскопические системы стремятся самопроизвольно перейти из менее вероятного состояния в более вероятное или из менее упорядоченного в более упорядоченное [2].

Самопроизвольные процессы в системах идут в направлении уменьшения свободной энергии: $F = U - QS$, где Q – тепло; S – энтропия.

В конечном счете, устойчивым является такое состояние системы, в котором свободная энергия F имеет наименьшее возможное при данных условиях значение.



Синергетика представляет собой системный подход при изучении динамических систем с иерархическим устройством. По-видимому, наиболее общим механизмом диссипации энергии в динамических системах являются различного вида релаксационные явления. Эти процессы можно описать только с помощью нелинейных уравнений, что объясняет запаздывание и нелинейность подсистем ЭЭО, а следовательно, ее хаотизацию.

Если в равновесном состоянии подсистемы ЭЭО могут вести себя самостоятельно, то переход в неравновесное состояние устанавливает когерентность, т.е. согласованность их действия, а самоорганизация, захватившая низший уровень системы, приводит к качественным изменениям функционирования всей системы. В результате самоорганизации деформационных процессов в системе обработки, система приобретает и новые количественные параметры – устойчивое состояние с определенным уровнем, совершая неравновесный фазовый переход с формированием пространственно-временной диссипативной структуры, математическим образом которой в фазовом пространстве является предельный цикл.

В системах с диссипацией в процессе эволюции фазовый объем сокращается. Если диссипативная система имеет много степеней свободы, то у нее может быть много зон притяжения в фазовом пространстве. Если они составлены из нескольких устойчивых циклов, то система стремится к одной из точек устойчивого равновесия. Поэтому устойчивое состояние возможно лишь в определенном интервале времени работы оборудования и обусловлено уменьшением числа степеней свободы в фазовом пространстве. Это означает, что в период перестройки системы ряд степеней свободы уже отмирает, а новые еще не развились. С позиций теории синергетики каждая стационарная диссипативная структура представляет собой одно из устойчивых состояний системы и характеризуется своей областью притяжения в фазовом пространстве.

В связи с изложенным возникает острая проблема изыскания новых подходов к оценке динамики хаотических колебаний и устойчивости. Проведенные исследования позволили предложить ряд динамических характеристик оценки устойчивости в процессе эволюции процесса ЭЭО – это скорость изменения энтропии в системе ЭЭО, время релаксации неустойчивости в системе ЭЭО, фрактальная размерность акустического сигнала, информационная энтропия, критерии Ляпунова. Таким образом, самоорганизующиеся технологические системы – это замкнутые нелинейные динамические системы, способные обеспечить устойчивость и оптимальное функционирование за счет согласованного перераспределения энергии и ее диссипации в подсистемах в процессе обработки.

Выявленные механизмы самоорганизации в технологической системе позволяют целенаправленно управлять устойчивостью процесса обработки, износом инструмента, обеспечивая повышение точности изготовления деталей в процессе обработки. В этой связи система диагностики устойчивости процесса обработки конструктивно может выполняться как составная часть системы ЧПУ типа CNC. Все вычислительные процедуры обеспечиваются процессором ЧПУ либо специализированным сопроцессором в соответствии с алгоритмом функционирования. Применение интеллектуальных контролеров в совокупности с персональным компьютером позволит существенно повысить эффективность систем ЧПУ [3].

Продолжительность единичного воздействия при ЭЭО составляет $10^{-4} \dots 10^{-3}$ с, но длительность активной фазы не превышает $10^{-6} \dots 10^{-5}$ с. Период температурной релаксации зависит от объема рассматриваемой зоны, и для поверхностного слоя, воспринимающего энергию электрического разряда, толщиной 10 мкм составляет порядка 10^{-4} с. Следовательно, время активного взаимодействия материала с электрическим разрядом в среднем на 1-2 по-

рядка меньше периода формирования активного диссипативного теплового стока, функционирующего за счет теплопроводности.

Образование поверхностей при ЭЭО происходит в условиях воздействия электрического разряда, приводящего к эрозии электродных материалов, развитию анодного массового потока, выделению тепла на поверхности электродов и поглощению энергии за счет формирования измененной структуры. Энергию разряда можно представить с позиций первого начала термодинамики:

$$W = A + Q + \Delta U, \quad (5)$$

где W – энергия разряда; A – работа, затраченная на разрушение электрода; Q – тепло; ΔU – приращение внутренней энергии.

В случае образования одного структурного состояния величина поглощенной внутренней энергии остается постоянной, т.е. $\Delta U = \text{const}$, тогда уравнение (5) можно представить в дифференциальной форме:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dA}{dt} + T \frac{dS}{dt} + S \frac{dT}{dt}, \quad (6)$$

где S – энтропия; T – температура; t – время.

В таких системах энтропия возрастает со скоростью:

$$\sigma[S] = \frac{dS}{dt} + \sigma_e[S], \quad (7)$$

где σ – производство энтропии; σ_e – поток энтропии, возникающий вследствие взаимодействия с внешней средой.

После подстановки получим

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dA}{dt} + T(\sigma[S] - \sigma_e[S]) + S \frac{dT}{dt}. \quad (8)$$

Плотность подводимой мощности и время активного воздействия таковы, что не позволяют сформироваться тепловым каналам отвода энергии, поэтому образующаяся несбалансированная часть расходуется в виде работы эрозионного разрушения. Уравнение энергетического баланса процесса взаимодействия материала с единичным разрядом примет вид:

$$W_a = Q + \Delta H_{\phi c} + A_{\text{э}}, \quad (9)$$

где W_a – энергия единичного разряда в активный момент времени; $\Delta H_{\phi c}$ – энтальпия полиморфных превращений; $A_{\text{э}}$ – работа эрозионного разрушения. В дифференциальном виде уравнение (5) имеет вид:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dA_{\text{э}}}{dt} + T(\sigma[S] - \sigma_e[S]) + S \frac{dT}{dt} + \sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial t} \right) \cdot V_i. \quad (10)$$

Структурные превращения в материале относятся к инерционным процессам. Интенсивность этих процессов достигает своего максимума после прекращения активного действия искрового разряда, следовательно, доля энергетических затрат на структурные превращения незначительна. Уравнение (9) в момент действия активного времени воздействия искрового разряда может быть представлено в виде

$$\frac{dW}{dt} \approx \frac{dA_{\text{э}}}{dt} + T(\sigma[S] - \sigma_e[S]) \quad (11)$$

или

$$\frac{dW}{dt} \approx a_{\text{э}} \frac{dM}{dt} + T(\sigma[S] - \sigma_e[S]), \quad (12)$$



где a_3 – удельная работа, затраченная на эрозионное разрушение; $\frac{dM}{dt}$ – скорость эрозионного разрушения.

Синергетика изучает процессы самоорганизации систем, а нелинейная динамика исследует сценарии возникновения порядка из хаоса. ЭЭО является синергетическим процессом. Процесс ЭЭО обладает свойством саморегулирования благодаря наличию внутренней обратной связи между производством и эвакуацией частиц двумя совершенно различными по своей природе физическими процессами, хотя процесс эвакуации и порожден процессом эрозии и они имеют общий источник энергии – электрический разряд. Поскольку первый процесс не может быть непрерывным без второго и выходные характеристики метода определяются совокупностью обоих физических процессов, они должны одновременно удовлетворять иногда совпадающим, иногда различным требованиям [4].

Такие процессы, которые включают в себя как детерминированные, так и стохастические составляющие, крайне трудно анализировать с позиции стандартных математических методов – анализа Фурье, статистического анализа и т.п. Поэтому наиболее приемлемым подходом к исследованию процессов ЭЭО является применение методов нелинейной динамики. Нелинейная динамика позволяет разделить истинно случайные процессы и процессы со сложной, но вполне предсказуемой динамикой, которые внешне выглядят случайными. Использование алгоритмов нелинейной динамики для исследования процессов ЭЭО позволило выявить закономерности влияния параметров обработки на ее эффективность и качество получаемой поверхности. Проведенные исследования показали, что основным критерием, определяющим производительность и качество обработки, является устойчивость рабочих процессов ЭЭО в различных масштабах времени. С позиций термодинамики открытых систем колебание параметров D , λ и S_u означает периодический переход системы в новое состояние с образованием диссипативных структур. При этом важным моментом оказывается существование определенного соотношения между производством и обменом энтропии с внешней средой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кабалдин, Ю. Г. Управление динамическими процессами в технологических системах механообработки на основе искусственного интеллекта / Ю. Г. Кабалдин, С. В. Биленко, С. В. Серый. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КнАГТУ», 2003. – 201 с.
2. Кабалдин, Ю. Г. Повышение устойчивости процесса электроэрозионной обработки и качества обработанной поверхности на основе подходов искусственного интеллекта / Ю. Г. Кабалдин, М. Ю. Сариллов, С. В. Биленко. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КнАГТУ», 2007. – 191 с.
3. Малинецкий, Г. Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Г. Г. Малинецкий, А. Б. Потапов. – М. : Эдиториал УРСС, 2000. – 336 с.
4. Пригожин, И. Р. Термодинамическая теория структур, устойчивости и флуктуации / И. Р. Пригожин, Л. Гленсдорф. – М. : Мир. 1973. – 280 с.

Щелкунов Е. Б., Сопко М. Ю., Щелкунова М. Е., Порошин О. Н.
БЫСТРОПЕРЕНАЛАЖИВАЕМАЯ ФРЕЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ
ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ НОВЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Щелкунов Е. Б., Сопко М. Ю., Щелкунова М. Е., Порошин О. Н.
E.V. Schelkunov, M.Yu. Sopko, M.E. Schelkunova, O.N. Poroshin

**БЫСТРОПЕРЕНАЛАЖИВАЕМАЯ ФРЕЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ
НОВЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**QUICK-SET CUTTRESR FOR DEFINING OPTIMUM PARAMETERS
FOR EDGE-CUTTING MASHINING OF NEW CONSTRUCTION MATERIALS**



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

Сопко Михаил Юрьевич – заместитель начальника цеха ОАО «Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение» (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Mr.Mikhhaul Yu.Sopko – Deputy Works Manager at the JSC Yury Gagarin Aviation Plant

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: kmopevm@knastu.ru.

Ms.Marina Ye. Schelkunova – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Computer Software and Computing, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: kmopevm@knastu.ru

Порошин Олег Николаевич – инженер-технолог ОАО «КнААПО» (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Mr. Oleg N. Poroshim – Process Control Engineer, JSC КнААПО

Аннотация. Представлена оригинальная конструкция быстропереналаживаемой фрезы с изменяемым передним углом, предназначенная для упрощения процесса проектирования геометрии режущего инструмента и определения оптимальных режимов резания при внедрении в производство новых конструкционных материалов.

Summary. The paper presents an original design of a quickly readjusted cutter with changeable rake angle, used for simplification of the process of designing the geometry of cutting edge tools and for definition of optimum cutting parameters when new structural materials are implemented.

Ключевые слова: резание, режим, инструмент, наладка, геометрия, передний угол, новые конструкционные материалы.

Keywords: cutting, mode, tool, adjustment, geometry, rake angle, new structural materials.

УДК 53.089

В настоящее время для промышленных производств всё более доступными становятся новые конструкционные материалы с уникальными свойствами – сверхлегкие, сверхпрочные, особо жаростойкие и т.д. В процессе освоения таких материалов технологические службы предприятий сталкиваются с отсутствием готовых рекомендаций по расчету режимов их механической обработки и геометрии применяемого режущего инструмента.

Применение для обработки новых материалов стандартных режущих инструментов и типовых режимов резания [1; 2] в большинстве случаев не дает ожидаемого результата, что выражается в низкой стойкости инструмента и неудовлетворительном качестве получаемой поверхности. Поэтому в современном конкурентоспособном производстве остро требуются методики ускоренного проектирования режущего инструмента и определения оптимальных режимов резания для механической обработки новых перспективных конструкционных материалов.

Время проектирования режущего инструмента существенным образом определяет общую трудоемкость запуска в производство изделий из новых конструкционных материалов, так как связано с длительной отладкой отдельной операции на рабочем месте, а именно выбором режима обработки для каждого конкретного случая. Изменение таких параметров, как скорость резания, подача, обычно не вызывают затруднений. Изменение же геометрических параметров (переднего и заднего углов, угла наклона зуба и др.) невозможно без переточки инструмента или перебора большого количества инструментов с разными углами.

С целью упрощения работы по подбору оптимальных условий резания разработана специальная фреза (см. рис. 1). Ее особенностью является возможность изменения переднего угла в пределах от 0° до -5° с шагом $0,5^\circ$.

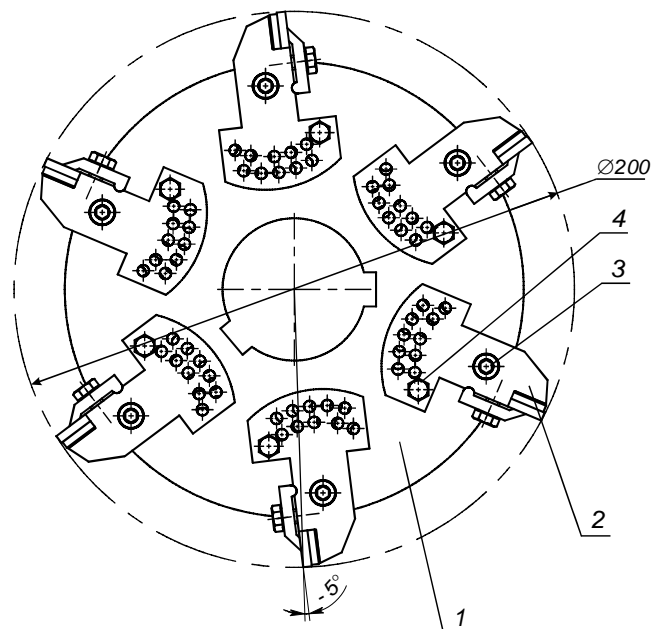


Рис. 1. Конструкция фрезы с отрицательным передним углом:
1 – корпус; 2 – нож; 3 – осевой винт; 4 – фиксирующий болт

Фреза состоит из корпуса 1 с шестью зубьями-ножами 2, оснащенными четырёхгранными режущими пластинами. Корпус фрезы и державки ножей изготовлены из стали марки 50ХФА и закалены (50 HRC_3).

В корпусе 1 выполнены отверстия, каждое из которых соответствует заданному переднему углу. Нож 2, закрепляемый на диске осевым винтом 3, также выполнен с отверстиями таким образом, что может поворачиваться вокруг винта и фиксироваться в заданном положении через отверстия в державке ножа и в корпусе фиксирующим болтом 4. Винт 3 и болт 4 изготовлены из стали 40Х (45 HRC_3). Они служат одновременно базовыми и крепежными элементами. Их цилиндрические направляющие поверхности отшлифованы и образуют с отверстиями ножей и корпуса фрезы посадку с минимальным зазором. Это обеспечивает достаточную жесткость соединения зубьев с диском. Торцевое крепление ножей дает возможность для их поворота и изменения переднего угла.

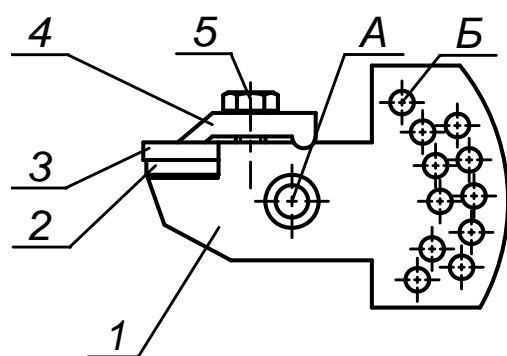


Рис. 2. Нож с закреплением режущей пластины прихватом: 1 – державка; 2 – опорная пластина; 3 – режущая пластина; 4 – прихват; 5 – болт; А – осевое отверстие; Б – отверстия под фиксирующий болт

Нож выполнен в виде резца с короткой жесткой державкой 1. Конструкция предусматривает два варианта закрепления режущей пластины на державке: прихватом – при использовании твердосплавных пластин без отверстия (см. рис. 2); винтом – при использовании твердосплавных пластин с центральным отверстием. Положение осевого отверстия А в державке и соответствующего ему в диске рассчитано так, чтобы при переднем угле, равном 0° , передние поверхности противоположных зубьев и осевая линия фрезы лежали в одной плоскости.

Конструкция фрезы позволяет производить ускоренную процедуру подбора оптимальной геометрии режущего инструмента для обработки новых конструкционных материалов с заранее неизвестными технологическими свойствами.

Для этого фреза устанавливается на оправку в шпинделе фрезерного станка. По заданной программе обрабатывается плоская поверхность с определенной подачей и скоростью резания. По окончании обработки измеряется шероховатость полученной поверхности и величина износа режущих пластин по передней и задней поверхностям. Затем производится переналадка фрезы на новые углы резания и, при необходимости, заменяются изношенные пластины, причем переналадка производится прямо на станке без снятия фрезы с оправки.

Так как при обработке новых материалов достаточно трудно заранее предугадать характер деформационных и адгезионных процессов, происходящих в зоне резания, то подбор геометрии инструмента и определение оптимальных режимов резания производится методом полного факторного эксперимента. В качестве влияющих факторов используются скорость резания, подача, передний и задний углы инструмента, а выходным параметром является шероховатость получаемой поверхности.

Первоначально задаются достаточно широкие интервалы варьирования факторов, которые разбиваются на три уровня для скорости резания и подачи на два – для переднего и заднего углов. По окончании эксперимента, состоящего из 36 испытаний, определяются режимы обработки и углы резания, соответствующие наилучшему для данного эксперимента качеству получаемой поверхности. Далее, определенные в ходе предыдущего эксперимента параметры обработки задаются в качестве основных уровней нового полного факторного эксперимента, диапазоны варьирования сужаются в два раза и испытания повторяются.

Таким образом, путем итерационного приближения достаточно быстро можно найти оптимальные режимы резания и наилучшие геометрические характеристики режущего инструмента для механической обработки любого нового, внедряемого в производство конструкционного материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Общемашиностроительные нормативы режимов резания : справ. В 2 т. Т. 2 / А. Д. Локтев, И. Ф. Гущин, Б. Н. Балашов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1991. – 304 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Суслова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 5-е изд. перераб. и доп. – М. : Машиностроение-1, 2001. – 944 с.



Шишкин С. Б., Шишкин Б. В.
S.B. Shishkin, B.V. Shishkin

**ПРОВЕРКА УГЛОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ПРИ СБОРОЧНЫХ ОПЕРАЦИЯХ**

TESTING ANGLE MEASUREMENT EQUIPMENT DURING ASSEMBLY OPERATIONS

Шишкин Сергей Борисович – магистр техники и технологии. E-mail: usu@knastu.ru.
Mr.Sergey B. Shishkin – Master of Engineering and Technology, usu@knastu.ru

Шишкин Борис Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: usu@knastu.ru.
Mr.Boris V.Shishkin – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Chemical Production Machinery and Equipment, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur).
E-mail: usu@knastu.ru

Аннотация. В статье приводится математическая модель систематической погрешности углоизмерительного оборудования типа «TPS System-призма». Математическая модель поведения погрешности проверена на экспериментальной установке.

Summary. The paper proposes a mathematical model of systematic error of “TPS System-Prism” type angle measurement equipment. This mathematical model of error behaviour has been tested at an experimental installation.

Ключевые слова: углоизмерительное оборудование, эксцентриситет, несоосность.

Keywords: angle measurement equipment, eccentricity, misalignment.

УДК 53.089

Погрешность измерительной системы приводит к снижению точности углоизмерительного оборудования типа «TPS System-призма». Разработка математической модели для минимизации систематических погрешностей для горизонтальных угловых перемещений является целью данной работы.

При проведении измерительных опытов основными источниками возникновения погрешности измерения являются:

1. Погрешность установки горизонтального угла при помощи двадцатичетырёхгранной призмы. Эта погрешность носит случайный характер и обусловлена точностью наведения визирной трубы на грань призмы (совмещения шкалы визирной трубы и биссектора), зависящей от оператора, производящего измерение. Опытным путём выявлено максимально возможное значение вносимой погрешности, равное 0,2 с.

2. Погрешность совмещения шкалы визирной трубы тахеометра и шкалы автоколлиматора. Погрешность носит случайный характер. Возникает из-за слишком большой подачи микровинта горизонтального перемещения тахеометра и недостаточного увеличения визирной трубы. Среднеквадратичное отклонение значений, получаемых одним оператором при многократном наведении визирной трубы при помощи микровинта, составляет две угловые секунды. В практике для уменьшения этой погрешности проводились серия измерений из шести подводов визирной трубы и их усреднение. Таким образом, повторяемость значения при повторном прохождении этой грани обеспечивалась с точностью в 0.7 с.

3. Погрешность, вносимая непараллельностью оси тахеометра и оси вращения двадцатичетырёхгранной призмы. Эта погрешность носит систематический характер.

4. Погрешность, вносимая несоосностью призмы и тахеометра. Эта погрешность носит систематический характер.

Рассмотрим математическую модель возникающей погрешности. При этом одной из наиболее важных составляющих систематической погрешности при измерениях является погрешность, возникающая при неточной установке угломерного прибора (эксцентриситет e).

На рис. 1 показано положение осей углоизмерительной установки и углоизмерительного прибора. Частные положения углоизмерительного прибора обозначены O_1, O_2, O_3 .

В начальный момент (соответствует индекс 1) эксцентриситет $e = OO_1$ находится под $\angle \varphi$ относительно оси x . Прямая линия, проведенная от точки O_1 до удаленной в бесконечности точки M , является перпендикуляром к оси x по условию выбора системы координат.

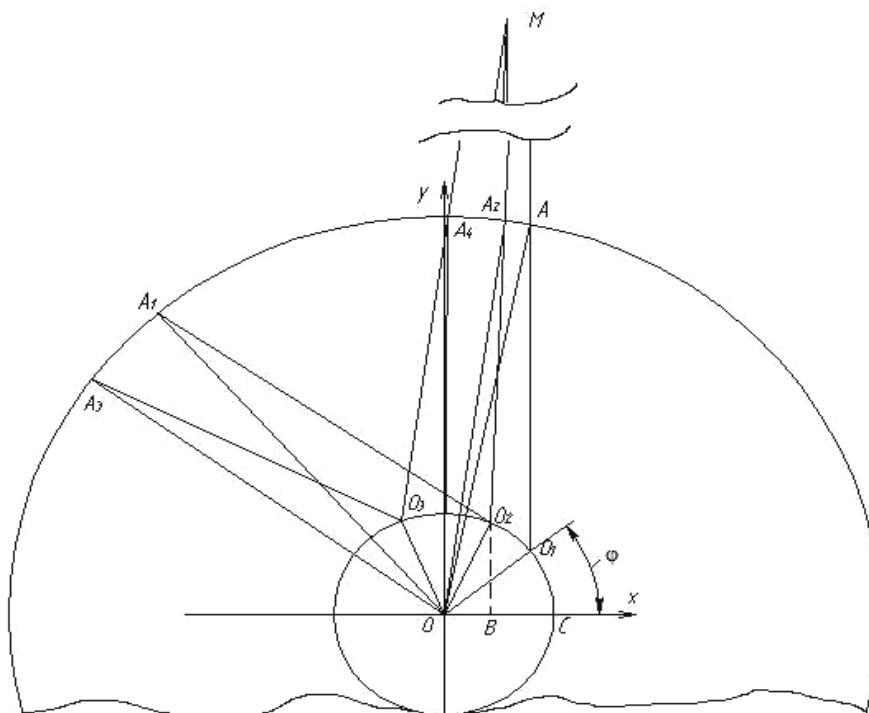


Рис. 1. Схема возникновения систематической погрешности

При повороте на $\angle \alpha$ точка O_1 , определяющая ось прибора, переходит в точку O_2 . В связи с этим поворотом точка A переходит в точку A_1 .

Относительно точки O_2 поворачиваем систему так, чтобы настроиться на точку M . При этом точка A_1 переходит в точку A_2 . $\angle A_1O_2A_2$ отсчитываем по шкале прибора. $\angle O_1OO_2 = \alpha$ определяется углом призмы с поправкой.

Погрешность измерительной системы Δ определяется разностью углов

$$\Delta = \angle A_1OA_2 - \alpha.$$

Оценим влияние $\angle M$ на точность проводимых расчетов.

Пусть $O_1M = l$; $O_1C = l \times \sin(\varphi)$; $OC = e \times \cos(\varphi)$.

В силу малости величины e примем $OB = OO_2 \times \cos(\alpha + \varphi) = e \times \cos(\alpha + \varphi)$.

Тогда $BC = OC - OB = e \times \cos(\varphi) - e \times \cos(\alpha + \varphi) = 2 \times e \times \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \times \sin\left(\varphi + \frac{\alpha}{2}\right)$.

Значение угла $\angle M$ определяем из

$$\tan(\angle M) = \frac{BC}{CM} = \frac{2 \times e \times \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \times \sin\left(\frac{\alpha}{2} + \varphi\right)}{1 + e \times \sin \varphi}.$$



Если $l = \infty$, то $\angle M = 0$. Пусть $e = 0,005$, $\alpha = 15^\circ$, $\varphi = 30^\circ$, $l = 10,5$ м, тогда $\angle M = 0,07557 \times 10^{-6}$ рад. Это соответствует $15,6 \times 10^{-3}$ угловых секунд. При таких условиях $\angle M$ можно пренебречь.

Для определения погрешности Δ рассмотрим систему координат XOY . Найдём $\angle AOC$:

$$\tan(\angle AOC) = \frac{AC}{OC},$$

где $AC = AO_1 + O_1C$.

Соответственно

$$\tan(\angle AOC) = \frac{1 + \frac{e}{R} \times \sin(\varphi)}{\frac{e}{R} \times \cos(\varphi)}.$$

Точка A_1 имеет координаты $(x_1; y_1)$,

где $x_1 = R \times \cos(\alpha + \angle AOC)$, $y_1 = R \times \sin(\alpha + \angle AOC)$.

Точка O_2 имеет координаты $(x_2; y_2)$,

где $x_2 = e \times \cos(\varphi + \alpha)$, $y_2 = e \times \sin(\varphi + \alpha)$.

Составим уравнение прямой, проходящей через точки A_1 и O_2 :

$$\frac{y - y_2}{y_1 - y_2} = \frac{x - x_2}{x_1 - x_2};$$

$$y = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} x - \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} x_2 + y_2.$$

Угловой коэффициент прямой A_1O_2 определяем из уравнения $k = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}$:

$$k = \frac{R \times \sin(\alpha + \angle AOC) - e \times \sin(\varphi + \alpha)}{R \times \cos(\alpha + \angle AOC) - e \times \cos(\varphi + \alpha)} = \frac{\sin(\alpha + \angle AOC) - \frac{e}{R} \times \sin(\varphi + \alpha)}{\cos(\alpha + \angle AOC) - \frac{e}{R} \times \cos(\varphi + \alpha)}.$$

По причине малости величины e примем:

$$\sin(\alpha + \angle AOC) - \frac{e}{R} \times \sin(\varphi + \alpha) \rightarrow \sin(\varphi + i \times \alpha);$$

$$\cos(\alpha + \angle AOC) - \frac{e}{R} \times \cos(\varphi + \alpha) \rightarrow \cos(\varphi + i \times \alpha).$$

При изменении положения точки от O_1 к O_2 и далее к O_3 изменяется и $\angle \varphi$. от $\angle \varphi$ к $\angle(\varphi + \alpha)$ и далее к $\angle(\varphi + 2\alpha)$. Что в итоге определяет $\angle(\varphi + (i - 1)\alpha)$, где $i = 1, 2, 3 \dots 24$.

При изменении точки $(x_2; y_2)$ изменяется и $\angle AOC$. Таким образом,

$$\angle AOC = \arctan \frac{1 + \frac{e}{R} \times \sin(\varphi + (i - 1)\alpha)}{\frac{e}{R} \times \cos(\varphi + (i - 1)\alpha)};$$

$$\angle M = \tan \angle M = \frac{2 \times e \times \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \times i \times \sin\left(\varphi + i \frac{\alpha}{2}\right)}{l + e \times \sin(\varphi + (i - 1)\alpha)}.$$

Угол $\angle A_1O_2A_2 = \arctan(R) + 90^\circ + \angle M$.

Погрешность $\Delta = \angle A_1O_2A_2 - \alpha = \arctan(R) + 90^\circ + \angle M - \alpha$.

Установленный вид погрешности позволяет сделать вывод о полигармоническом характере радиального биения оси вращения стола. При этом паспортное значение прибора составляет 0,12 мкм. Модель поведения погрешности проверена на экспериментальной установке «Универсальный метрологический комплекс МИИГАиК». Вычислительные эксперименты показали уменьшение систематической погрешности для системы «электронный тахеометр-призма» в три раза.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
METALLURGY AND MATERIALS TECHNOLOGY

Сулицин А. В., Мысик Р. К., Брусницын С. В., Смирнов С. Л., Ильиных М. В.
R.K. Mysik, A.V. Sulitsin, S.V. Brusnitsyn, S.L. Smirnov, M.V. Ilyinikh

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ МЕДИ

**ON THE PROBLEM OF THE MECHANISM
OF COPPER STRUCTURE MODIFICATION**



Сулицин Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и упрочняющие технологии» Уральского государственного технического университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, Екатеринбург). E-mail: kafedralp@mail.ru.

Mr. Andrey V. Sulitsin – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of «Foundry engineering and strengthening technology», the Urals State Technical (city of Ekaterinburg). E-mail: kafedralp@mail.ru.



Мысик Раиса Константиновна – доктор технических наук, профессор кафедры «Литейное производство и упрочняющие технологии» Уральского государственного технического университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, Екатеринбург). E-mail: kafedralp@mail.ru.

Ms. Raisa K. Mysik – Doctor of Engineering, Professor, Department of «Foundry engineering and strengthening technology», the Urals State Technical (city of Ekaterinburg). E-mail: kafedralp@mail.ru.



Брусницын Сергей Викторович – доктор технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и упрочняющие технологии» Уральского государственного технического университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, Екатеринбург). E-mail: kafedralp@mail.ru.

Mr. Sergey V. Brusnitsyn – Doctor of Engineering, Associate Professor, Department of «Foundry engineering and strengthening technology», the Urals State Technical (city of Ekaterinburg). E-mail: kafedralp@mail.ru.



Смирнов Сергей Леонидович – ассистент кафедры «Литейное производство и упрочняющие технологии» Уральского государственного технического университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, Екатеринбург). E-mail: kafedralp@mail.ru.

Mr. Sergey L. Smirnov - Assistant Lecturer, Department of «Foundry engineering and strengthening technology», the Urals State Technical (city of Ekaterinburg). E-mail: kafedralp@mail.ru.



Ильиных Максим Владимирович – аспирант кафедры «Литейное производство и упрочняющие технологии» Уральского государственного технического университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, Екатеринбург). E-mail: kafedralp@mail.ru.

Mr. Maxim V. Ilyinikh – PhD Candidate, Department of «Foundry engineering and strengthening technology», the Urals State Technical (city of Ekaterinburg). E-mail: kafedralp@mail.ru.



Аннотация. В работе проанализированы возможные механизмы модифицирования меди, предложены элементы, которые могут оказывать модифицирующий эффект. Исследовано влияние редкоземельных металлов в составе лигатуры мишметалл на формирование структуры меди с различным содержанием примесей.

Summary The article deals with potential mechanisms for modification of copper, and proposes some elements that can render a modifying. We show the influence of rare-earth metals as a part of a rich *misch-metal* alloy on making up of copper structure with different impurity level.

Ключевые слова: медь, модифицирование, полунепрерывное литье, кластер.

Keywords: copper, modification, semi-continuous casting, cluster

УДК 621.74:669.35.6

Важнейшая тенденция развития техники и технологии обработки цветных металлов – широкий переход от дискретных к непрерывным и совмещенным процессам. Уже сейчас непрерывным и совмещенным процессами в мире производят 96 % медной проволочной заготовки и лишь 4 % методом прокатки вайербарсов на сортовом стане. Примерно половина всего объема производства рафинированной меди перерабатывается в проволочную заготовку или катанку диаметром около 8 мм для последующего производства проволоки, кабеля и других проводников тока.

При непрерывном производстве катанки методами совмещенного литья и прокатки ее класс существенно зависит от качества непрерывно-литой заготовки. Для повышения качества непрерывно-литой заготовки необходимо устранять характерные дефекты, присущие ей, такие, как газовая пористость, поверхностные трещины, неслитины. Кроме того, в структуре непрерывнолитой заготовки наблюдается ярко выраженная транскристаллизация, которая является причиной возникновения трещин, так как для крупнозернистой столбчатой структуры характерны более слабые межзеренные связи, чем для мелкозернистой равноосной структуры [5]. Для устранения характерных дефектов литой заготовки необходимо измельчить структуру металла. Измельчения структуры металла можно добиться за счет применения электромагнитного перемешивания, воздействия вибрации на кристаллизующийся расплав, использования микрохолодильников, но наиболее действенный способ управления структурой – это введение в расплав малого количества добавок модификатора.

Степень модифицирующего влияния того или иного элемента можно оценивать по знаку разности эффективных ионизационных потенциалов матрицы и модификатора $U_{ме} - U_{мод}$ [4]. Если эта разность больше нуля, т.е. положительна, то данный элемент может быть модификатором. Если эта разница меньше нуля, то данный элемент является демодификатором. Вторым фактором, характеризующим способность элемента оказывать влияние на рост кристаллов, следует считать фактор растворимости примеси в данной матрице. Модификатор, наиболее сильно измельчающий зерно, должен образовывать химические связи с кластерами, но не входить в их состав, т.е. модификатор должен образовывать фрактальные кластеры – это кластеры металла, химически связанные с кластером модификатора, где кластер модификатора располагается между кластерами металла. Соответственно элемент, обладающий свойствами модификатора, должен иметь низкую растворимость в твердом металле и ограниченную – в жидком.

Оба выделенных фактора можно выделить в полуэмпирическую формулу для расчета коэффициента модифицирующей активности модификаторов:

$$\mu = (U_{ме} - U_{мод}) / C_s,$$

где μ – коэффициент модифицирующей активности; $U_{ме}$ – эффективный ионизационный потенциал матрицы; $U_{мод}$ – эффективный ионизационный потенциал модификатора; C_s – растворимость модификатора в твердом металле, ат. %.

Величина μ имеет только относительное значение и служит для сравнения коэффициентов модифицирования различных элементов. Значения коэффициента μ для различных модификаторов и демодификаторов второго рода применительно к чистой меди приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты модифицирующей активности элементов применительно к чистой меди

Элемент	C_s , ат. %	$U_{\text{мод}}$	μ
Демодификаторы			
Fe	0,3	3	-0,3
Co	9	3,11	-0,022
Ni	100	3,2	-0,002
Ir	1	3,26	-0,350
Pt	14	3,34	-0,030
Pd	8	3,45	-0,068
Mn	25	3,66	-0,030
Ru	0,0001	3,45	-5400
Zn	39	3,17	-0,007
Cr	0,2	3,47	-2,8
Al	20	3,14	-0,012
Mo	0,0001	3,29	-3800
Ge	10,7	3,27	-0,034
Si	7	3,84	-0,133
C	0,0001	4,86	-19500
Nb	0,0001	3,42	-5100
Sn	0,0001	3,31	-4000
V	8	3,71	-0,1
Ta	0,0001	3,44	-5300
W	7	3,81	-0,129
P	0,6	4,3	-2,317
O	1,54	5,5	-1,682
S	1,5	4,76	-1,233
Модификаторы			
La	0,001	2,15	760
Ce	0,001	2,25	660
Pr	0,001	2,24	670
Nd	0,001	2,35	560
Ti	0,001	2,85	60
Zr	0,001	2,87	40
Mg	3	2,42	0,163
Ca	20	1,86	0,053
B	0,5	1,44	2,94
Y	0,001	2,3	610

К модификаторам согласно табл. 1 относятся в порядке убывания их модифицирующей способности: La, Pr, Ce, Y, Nd, Ti, Zr. Поскольку в каждом сплаве содержится какое-то свое сочетание контролируемых и неконтролируемых демодификаторов, очень трудно, а часто и невозможно с помощью какого-то одного модификатора подавить демодифицирующий эффект всего набора известных и неизвестных примесей. Это вызвано тем, что разные элементы имеют разное химическое сродство друг к другу, по-разному взаимодействуют или оказываются инертными друг к другу. Поэтому целесообразно для модифицирования меди применить комплексный модификатор, в состав которого входят элементы, имеющие наи-

большую модифицирующую способность. В данном случае таким модификатором может быть мишметалл (Ce – 60%, La – 22%, Nd – 15%, Pr – 3%).

На основании вышеизложенного был проведен эксперимент по модифицированию меди марки М00 и М1 мишметаллом. Плавка меди марки М1 производилась в промышленной печи ИЛК-1,6, а плавка меди марки М00 – в промышленной печи AZARKO. Нагрев металла производился до температуры 1120 °С. Расплав меди модифицировался в ковше ёмкостью 5 кг, затем выливался в подогретый до 250 °С стальной кокиль с внутренним диаметром 50 мм. Модификатор предварительно запрессовывался в медную трубку, которая вводилась в расплав. Было отлито пять образцов для каждой марки меди, в которых вводимое содержание модификатора изменялось от 0,0025 до 0,0125 мас.%. Для оценки эффективности модифицирования заливался контрольный образец без модификатора.

Был выполнен металлографический анализ, в ходе которого определялась средняя площадь сечения зерна согласно методике ГОСТ 21073.2-75 [3]. Макроструктура слитков и зависимость средней площади сечения зерна от количества введенного модификатора представлены на рис. 1 – 4.

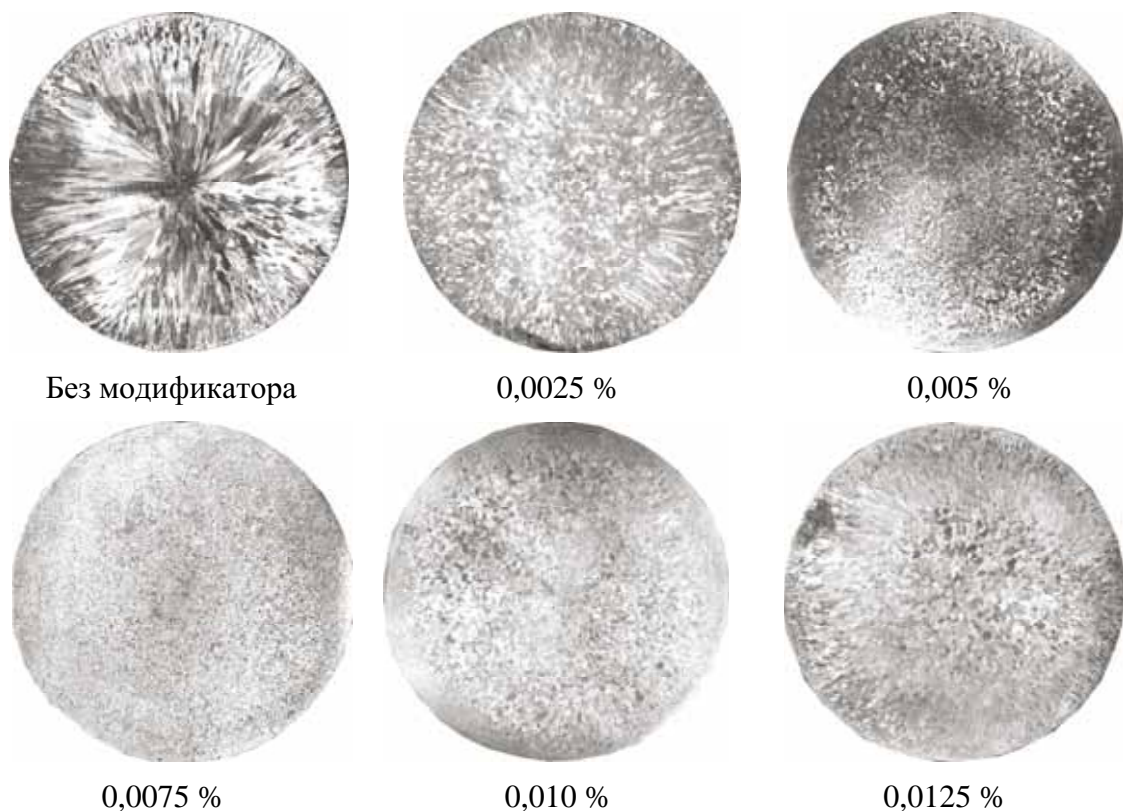


Рис. 1. Макроструктура слитков меди марки М00 в зависимости от количества введенного мишметалла

Из рис. 1, 2 видно, что при введении модификатора в медь марки М00 и М1 устраняется столбчатая структура и образуется равноосная, при этом средняя площадь сечения зерна меди марки М00 уменьшается от 1,2 до 0,05 мм² при введении 0,0075 мас.% мишметалла, а средняя площадь сечения зерна меди марки М1 уменьшается от 1,3 до 0,12 мм² при добавлении 0,01 мас.% мишметалла.

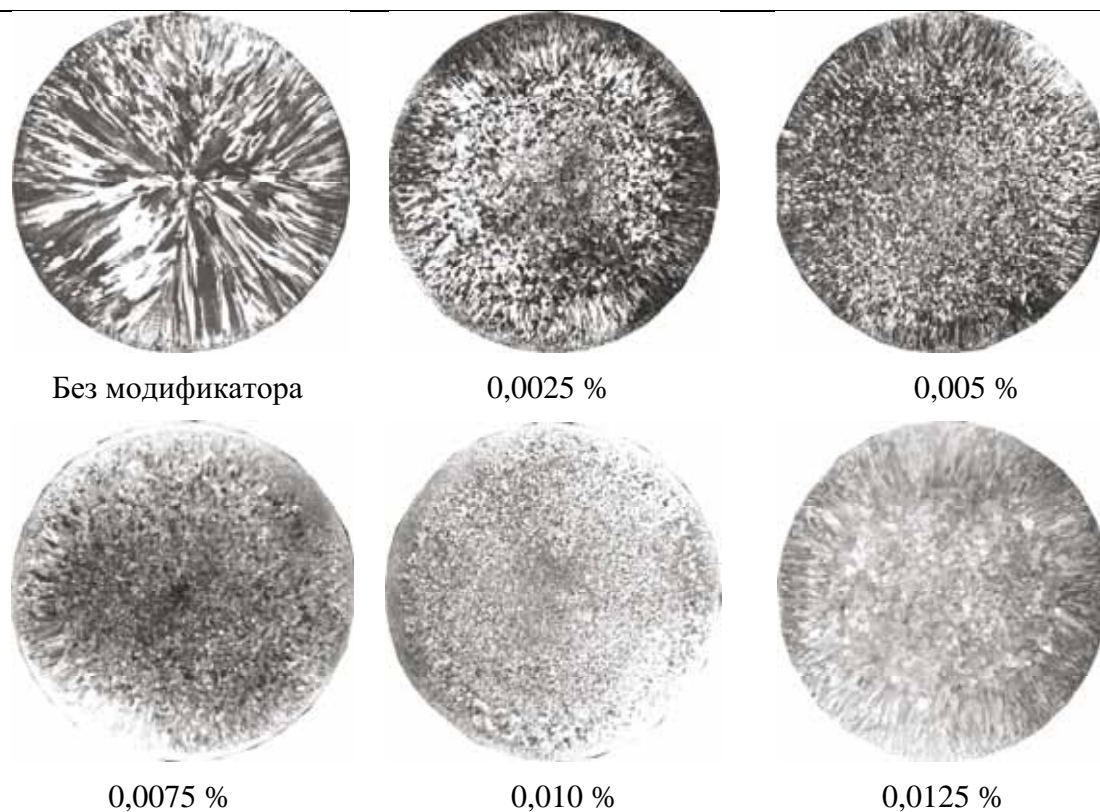


Рис. 2. Макроструктура слитков меди марки М1 в зависимости от количества введенного мишметалла

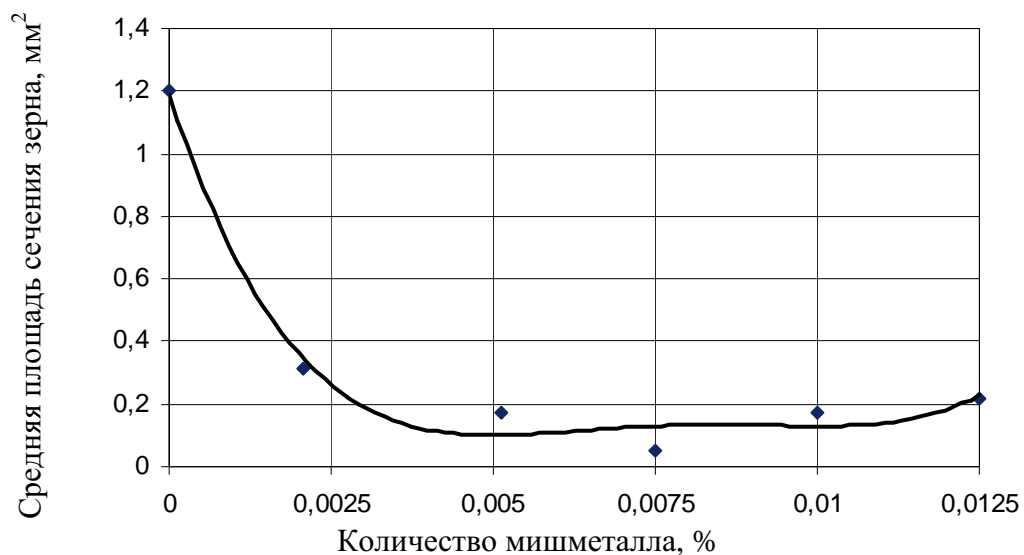


Рис. 3. Зависимость средней площади сечения зерна от количества введенного мишметалла для меди марки М00

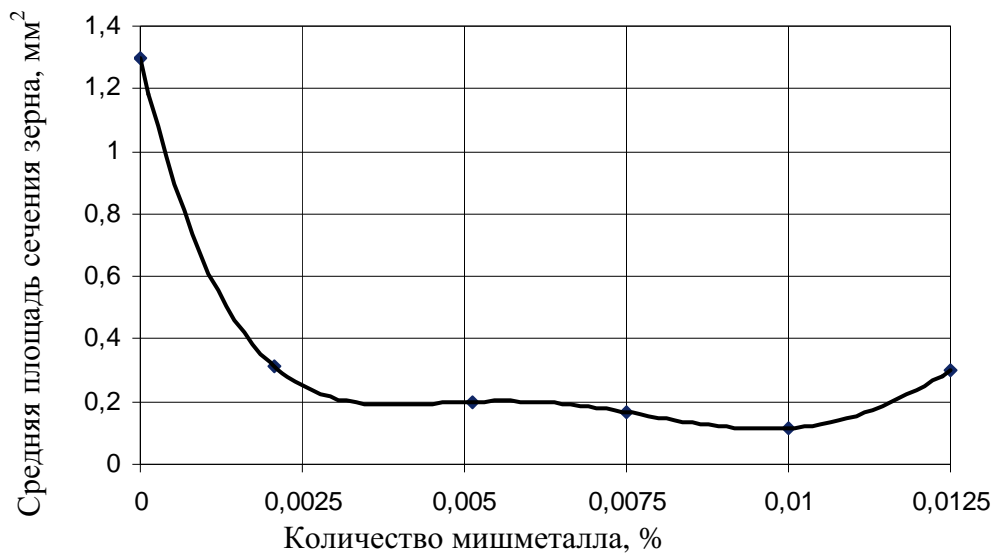


Рис. 4. Зависимость средней площади сечения зерна от количества введенного мишметалла для меди марки М1

Кроме исследования макроструктуры образцов была изучена и микроструктура образцов меди марок М00 и М1 (см. рис. 5, 6).



Без модификатора



0,0025 %



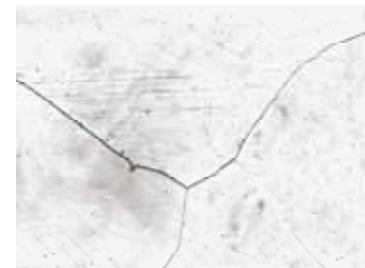
0,005 %



0,0075 %



0,010 %



0,0125 %

Рис. 5. Микроструктура меди марки М00 в зависимости от количества введенного мишметалла

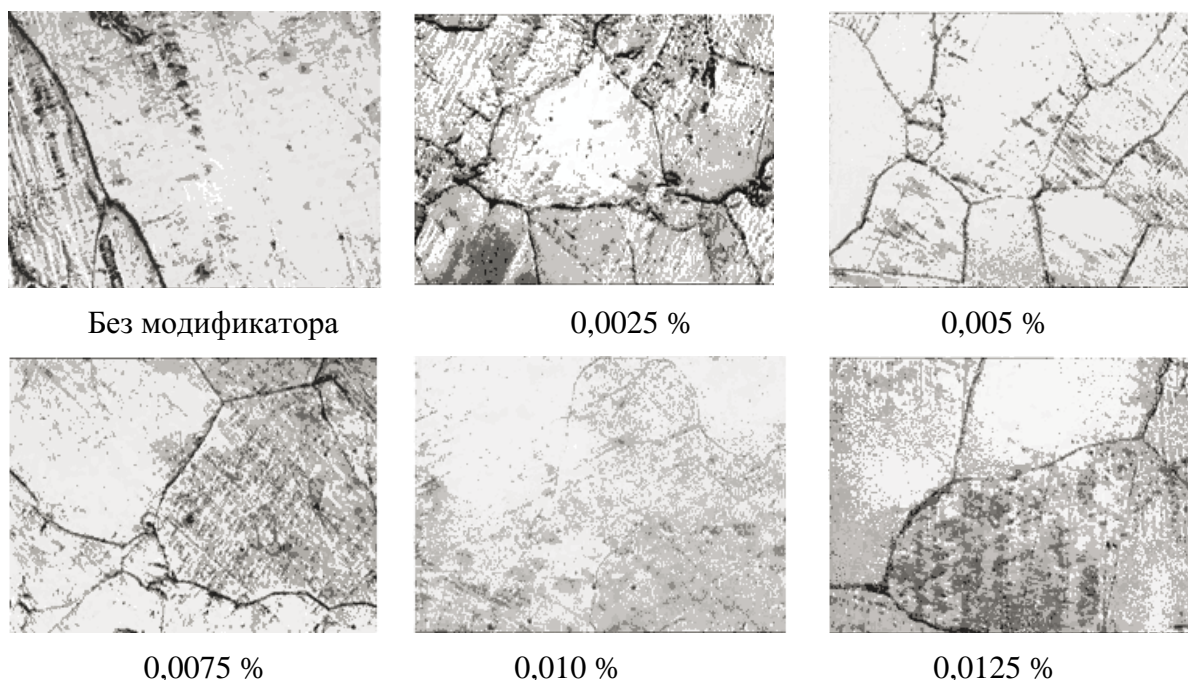


Рис. 6. Микроструктура меди марки М1 в зависимости от количества введенного мишметалла

Следует отметить, что границы зерен в немодифицированном образце меди марки М1 имеют большую толщину, чем границы зерен в немодифицированном образце меди марки М00, что обусловлено различной толщиной и чистотой меди по примесям (см. табл. 2).

Таблица 2

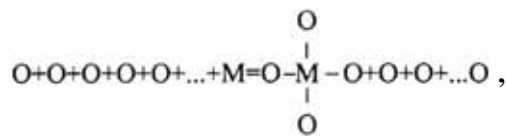
Химический состав выплавляемой меди М00 и М1

Марка	Примеси, %										
	Ag	Bi	Sb	As	Fe	Ni	Pb	Sn	S	Si	P
М00	0,0006	0,00006	0,00015	0,00005	0,0001	0,00011	0,00015	0,00008	0,0005	0,0002	0,00004
М1	0,0006	0,0003	0,00075	0,0002	0,0003	0,00011	0,001	0,00012	0,0013	0,0003	0,00005

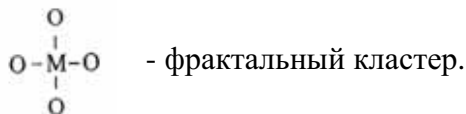
По-видимому, при введении модификатора в расплав меди происходит взаимодействие примесей и модификатора с образованием тугоплавких соединений, которые могут являться центрами кристаллизации. Косвенным доказательством взаимодействия модификатора и примесей служит уменьшение толщины межзеренных границ с увеличением количества введенного модификатора. Причем достижение максимального эффекта измельчения зерна происходит в различных марках меди при различном количестве вводимого модификатора, кроме того, не удастся достичь в различных марках меди одинаково сильного измельчения зерна. Так, для достижения наибольшего модифицирующего эффекта в меди марки М00 необходимо ввести 0,0075 мас.% мишметалла, при этом средний размер площади зерна уменьшается до 0,05 мм², а для достижения наибольшего модифицирующего эффекта в меди марки М1 необходимо ввести 0,01 мас.% мишметалла, при этом средний размер площади зерна становится 0,12 мм² (см. рис. 3, 4). Более крупное зерно при модифицировании меди марки

М1 обусловлено наличием большего количества примесей в металле, которые могут являться демодификаторами. По всей видимости, модификатор оказывает рафинирующий эффект, при этом при связывании примесей могут образовываться тугоплавкие соединения, которые в свою очередь могут являться центрами кристаллизации. Вероятно, механизм модифицирования заключается не только в образовании дополнительных тугоплавких соединений, но и в химическом взаимодействии модификатора и металла растворителя.

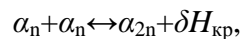
С учетом современной теории жидкого состояния металлы состоят из кластеров различного размера 1...5 нм, содержащих от тысячи до сотен тысяч атомов. При модифицировании кластеры модификатора химически взаимодействуют с кластерами модифицируемого металла, образуя динамические группировки разных размеров. Эти динамические группировки являются фрактальными кластерами. Схема образования фрактального кластера в жидком металле выглядит следующим образом:



где O – кластеры жидкого металла; M – кластер модификатора; – | – химические связи между кластерами модификатора и кластерами жидкого металла;



Если учесть, что уравнение элементарного акта кристаллизации-плавления имеет вид:



где a_n – кластер металла; a_{2n} – элементарный кристалл; $\delta H_{\text{кр}}$ – элементарное количество скрытой теплоты кристаллизации, то согласно этому равенству элементарный кристалл образуется слиянием любых двух соседних кластеров с выделением строго определенного количества тепла $\delta H_{\text{кр}}$.

Для того чтобы элементарный кристалл образовался, теплота $\delta H_{\text{кр}}$ должна быть поглощена расплавом без разогрева последнего выше температуры плавления. Вероятно, кластеры модификатора химически взаимодействуют с кластерами металла растворителя, причем при схлопывании межкластерной границы выделяется скрытая теплота кристаллизации, которая необходима для образования химической связи между металлом растворителем и модификатором, т. е. образования фрактального кластера. Механизм образования фрактального кластера связывается с изменением электронной концентрации вокруг примесного иона в связи с различием зарядов ионов примеси и растворителя [1].

Следует сказать о том, что кристаллы могут расти одновременно на разных размерных уровнях с использованием разного строительного материала. Согласно И. В. Гаврилину [2], может существовать не один, а несколько механизмов роста кристаллов в отливках.

В качестве основных можно назвать моноатомный механизм роста кристаллов, когда основным строительным материалом для кристаллов являются отдельные атомы, кластерный

механизм, когда строительным материалом служат кластеры, и микрокристаллический механизм, когда строительным материалом для роста крупных кристаллов служат мелкие и мельчайшие кристаллики.

Если придерживаться кластерного механизма роста, то в связи с тем, что фрактальные кластеры крупнее, чем кластеры металла, они выигрывают в условиях конкурентного роста, причем срастание фрактальных кластеров затруднено в связи с необходимостью подгонки большой площади структур, и таким образом в металле формируются отдельные центры кристаллизации.

Возможность конкурентного срастания кристаллов определяется наличием твердожидкой зоны, временем и условиями контакта кристаллов в этой зоне. Фактор времени во многом является определяющим для этого процесса. Нужно время для подгонки структур соседних витающих кристаллов. Чем больше время витания кристаллов в твердожидкой зоне, тем более крупными вырастают кристаллы, тем меньше их количество в отливке. Напротив, если отливка охлаждается быстро, то время на корреляцию, на подгонку структур соседних кристаллов уменьшается, они не успевают срастись и образуют в структуре отливки самостоятельные кристаллы с собственной границей раздела. Отливка в этом случае имеет мелкозернистую первичную кристаллическую структуру. Поэтому модификатор нужно вводить на стадии разлива металла при возможно более низкой температуре расплава.

Таким образом, при модифицировании меди марки М00 и М1 мишметаллом процесс модифицирования может складываться из двух параллельных процессов: процесса образования фрактальных кластеров и процесса образования тугоплавких центров кристаллизации.

Работа выполнялась при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мальцев, М. В. Модифицирование структуры металлов и сплавов / М. В. Мальцев. – М. : Металлургия, 1964. – 213 с.
2. Григорович, В. К. Электронное строение и термодинамика сплавов железа / В. К. Григорович. – М. : Наука, 1970. – 400 с.
3. ГОСТ 21073.2-75. Определение величины зерна методом подсчета зерен / под ред. В. В. Чекменева. – М. : Изд-во стандартов, 1975.
4. Базин, Ю. А. О механизме модифицирования сплавов растворимыми добавками / Ю. А. Базин, Б. А. Баум // Цветные металлы. – 1994. – № 7. – С. 55-58.
5. Гаврилин, И. В. Плавление и кристаллизация металлов и сплавов / И. В. Гаврилин. – Владимир : Владим. гос. ун-т, 2000. – 260 с.



Ри Хосен, Евстигнеев А. И., Ри Э. Х., Дорофеев С. В., Якимов В. И.
Hosen Ree, A.I. Yevstigneev, E.H. Ree, S.V. Dorofeev, V.I. Yakimov

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АМПЛИТУДЫ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ
ГЕНЕРАТОРА НАНОСЕКУНДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ
НА ПРОЦЕССЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ, СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ
И СВОЙСТВА СИЛУМИНА (АК7ч)**

**THE INFLUENCE OF VOLTAGE PULSE AMPLITUDE OF A NEMI GENERATOR
UPON THE PROCESSES OF CRISTALLIZATION, STRUCTURE FORMATION
AND ON THE PROPERTIES OF SILUMINE**

Ри Хосен – доктор технических наук, профессор Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.

Mr.Hosen Ri – Doctor of Engineering, Professor, Head of Department, the Pacific State University, city of Khabarovsk, 680035, 136 Tikhookeanskaya str.

Евстигнеев Алексей Иванович – доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: nis@knastu.ru.

Mr.Alexey I. Yevstigneev – Doctor of Engineering, Professor, Provost for Research, Kovsomolsk-on-Amur State Technical University, 27, Lenina prospect, 681013 Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsky region, Russian Federation, nis@knastu.ru

Ри Эрнест Хосенович – доктор технических наук, профессор Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.

Mr.Ernest H.Ri – Doctor of Engineering, Professor, the Pacific State University, city of Khabarovsk, 680035, 136 Tikhookeanskaya str.

Дорофеев Станислав Вячеславович – кандидат технических наук, доцент Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.

Mr.Stanislav V. Dorofeev – PhD in Engineering, Associate Professor, the Pacific State University, city of Khabarovsk, 680035, 136 Tikhookeanskaya str.

Якимов Виктор Иванович – кандидат технических наук, ОАО «Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение им. Ю.А. Гагарина» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681018, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Советская, 1; (4217) 25-63-64.

Mr.Victor I. Yakimov – PhD in Engineering, JSC Yury Gagarin Aviation Plant, 681018 Komsomolsk-on-Amur, 1 Sovetskaya str., Phone: + 7 (4217) 25-63-64

Аннотация. Представлены результаты исследований обработки алюминиевого сплава АК7ч различной (регулируемой) амплитудой импульсов напряжения до 15 кВ (5, 10 и 15 кВ) генератора НЭМИ. Показано влияние амплитуды импульсов напряжения (АИН) на температуру начала кристаллизации, время кристаллизации, степень уплотнения расплава, коэффициенты термического сжатия, теплопроводность, структурные составляющие, микротвердость.

Summary. The paper presents the results of a study in which an aluminum alloy AK7ch was treated by volt pulses of different (controlled) amplitude up to 15 kWt (5, 10 and 15 kWt) produced by the NEMI generator. We demonstrate that volt pulse amplitude can impact the chill point, crystallization time, packing degree of the melt, thermal compression coefficient, thermal conductivity, constituents, microhardness.

Ключевые слова: импульс, кристаллизация, микротвердость, теплотвердость, сплав, структура.

Keywords: pulse, crystallization, microhardness, heat conduction, alloy, structure.

УДК 621.74:669.35.6

Эксплуатационные характеристики литых из цветных металлов определяются физико-механическими свойствами сплава, которые формируются в предкристаллизационный и кристаллизационный периоды. Известно влияние на данные параметры термовременной и термоскоростной обработки, модифицирования, различных физических полей [1; 2; 3]. С этих позиций были проведены работы по управлению процессом формирования отливок с определенным комплексом свойств воздействием на расплав несинусоидальными электромагнитными импульсами [4; 5], в которых приведены результаты исследований влияния продолжительности облучения жидкой фазы НЭМИ на строение, кристаллизацию и структурообразование, физико-механические (плотность, электро- и теплопроводность, твердость, микротвердость структурных составляющих и др.) и эксплуатационные (жаростойкость, коррозионностойкость, износостойкость) свойства разных сплавов. При проведении данной работы использовался генератор НЭМИ ГИН-01-1-6, имеющий постоянную амплитуду импульсов напряжению 6 кВ.

В данной работе был использован генератор наносекундных электромагнитных импульсов (НЭМИ) марки ГИН-15-1 с регулируемыми амплитудами импульсов (от 5 до 15 кВ).

В качестве объектов исследования были использованы электролитическая медь в качестве модельного металла и силумин АК7С. Методика исследований заключалась в следующем.

Медь перегревали до 1300 °С, и силумин АК7С – до 780 °С, после 5-минутной выдержки обрабатывали (облучали) жидкую фазу с различной амплитудой импульсов напряжения при постоянной частоте в течение 5, 10 и 15 мин.

Параллельно исследовалось влияние термовременной обработки необлученного силумина АК7С. Затем охлаждали жидкую фазу со скоростью 20 °С/мин до температуры 500 °С. В процессе охлаждения измерялась интенсивность γ – проникающих излучений и строилась параллельно термограмма кристаллизации.

Из рис. 1, *a – в* следует, что независимо от величины амплитуды импульсов напряжения генератора НЭМИ наблюдается следующая закономерность изменения кристаллизационных параметров меди от продолжительности облучения жидкой фазы НЭМИ (ПОН):

1. С повышением ПОН намечается тенденция снижения температуры начала $t_{кр}$ и времени $\tau_{кр}$ кристаллизации меди до определенной ПОН (до 10 мин). При длительном облучении НЭМИ (15 мин) с большой амплитудой импульсов напряжения (10 и 15 кВ) температура и время кристаллизации меди увеличиваются (см. рис. 1, *a – в*).

2. Степень уплотнения жидкой меди от 1300 °С до температуры начала кристаллизации $t_{кр}$ ($-\Delta J_{ж}$) возрастает до 5-10-минутного облучения НЭМИ с последующим резким снижением ее до 15 мин, причем увеличение амплитуды способствует уменьшению значений $-\Delta J_{ж}$ (см. рис. 1, *г – е*). Степень уплотнения меди при кристаллизации $-\Delta J_{кр}$ также изменяется по аналогичной зависимости от ПОН.

3. Коэффициент термического сжатия $\alpha_{ж}$ жидкой меди изменяется от ПОН также по экстремальной зависимости от ПОН с максимумом его значения при 10-минутном облучении НЭМИ и амплитудах импульсов 5 и 10 кВ. При амплитуде импульсов 15 кВ значения $\alpha_{ж}$ постепенно уменьшаются от ПОН (см. рис. 1, *ж – и*). Коэффициент термического сжатия твердой меди ($\alpha_{тв}$) при амплитуде 5 кВ постоянно возрастает до 15-минутного облучения, а при амплитуде 10 кВ изменяется по экстремальной зависимости от ПОН и по абсолютной величине данный коэффициент значительно меньше, чем при амплитудах импульсов 5 и 10 кВ.

4. Теплопроводность меди зависит от ПОН и амплитуды импульсов напряжения генератора НЭМИ (см. рис. 2, *a – в*):

- независимо от величины амплитуды импульсов напряжения генератора НЭМИ максимумы теплопроводности меди наблюдаются при ПОН, равной 10 мин (см. рис. 2, *a*);

- с увеличением амплитуды импульсов теплопроводность меди резко возрастает до 6 кВ с последующим ее снижением по мере увеличения амплитуды импульсов напряжения генератора до 15 кВ;

- при амплитудах импульсов 5-6 кВ теплопроводность меди возрастает в 1,73 раза при 5-6 кВ; 1,42 раза при 10-15 кВ.

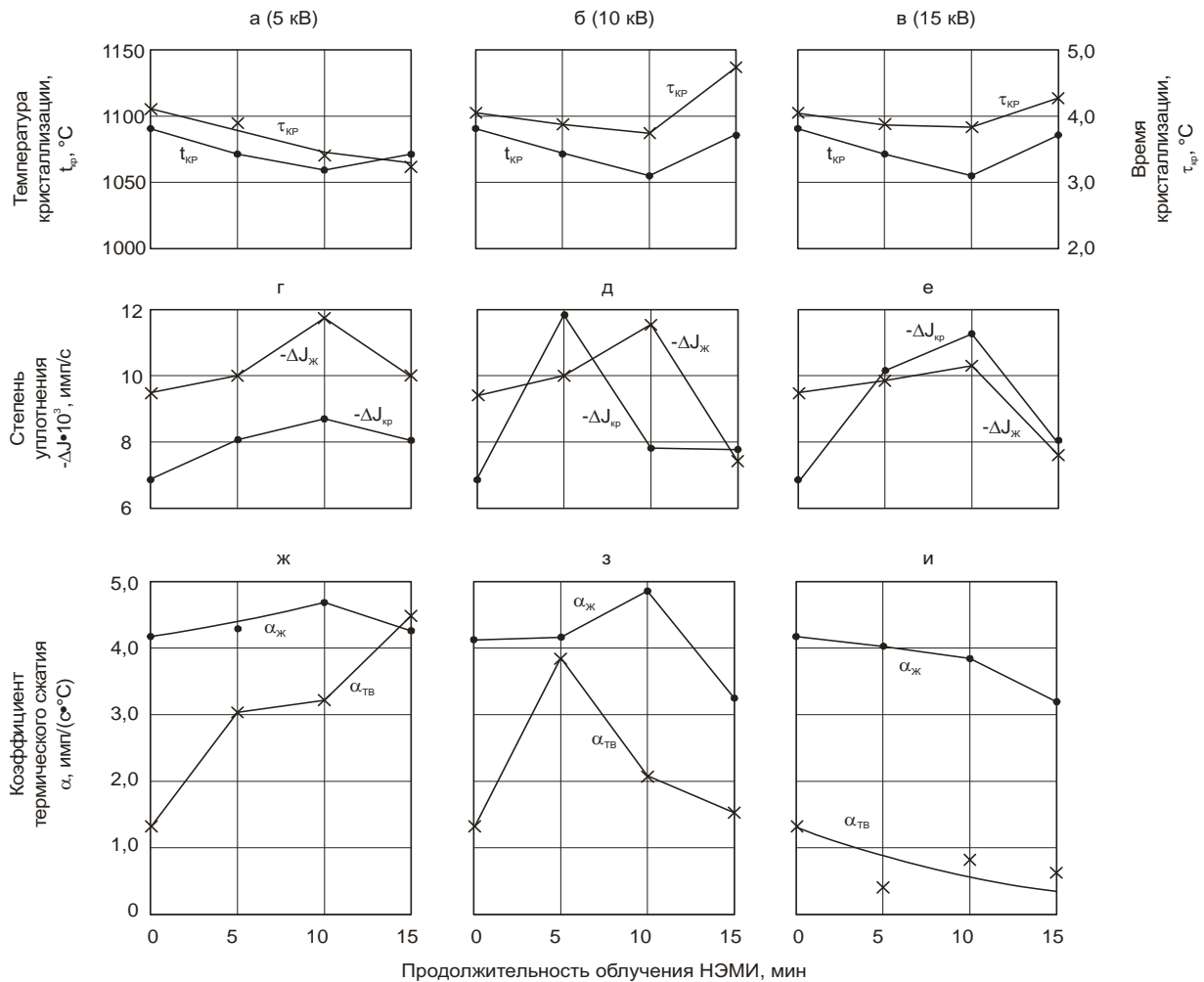


Рис. 1. Влияние амплитуды напряжения генератора НЭМИ на кристаллизационные параметры меди

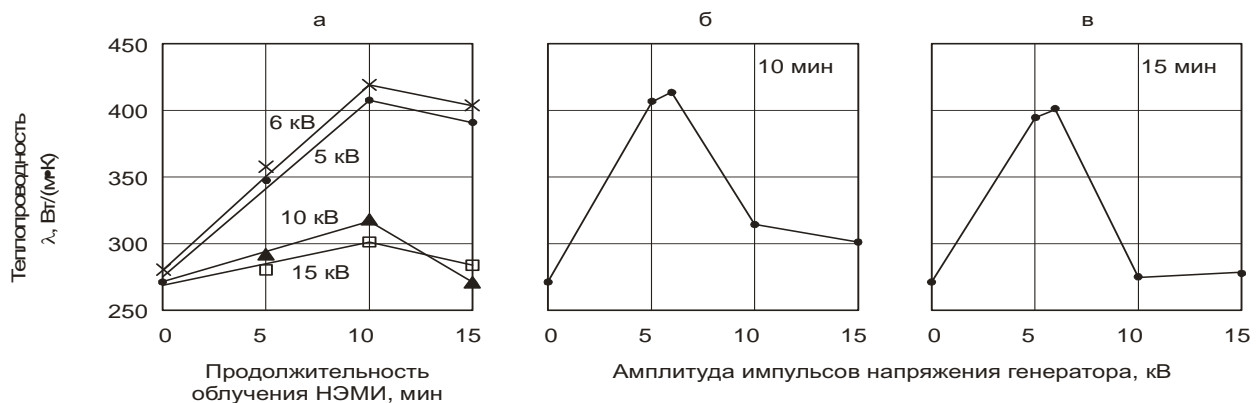


Рис. 2. Влияние амплитуды импульсов напряжения генератора НЭМИ и продолжительности облучения на теплопроводность меди

Таким образом, оптимальными амплитудами импульсов напряжения генератора НЭМИ при выбранном объеме металла и ПОН является соответственно 5-6 кВ и 10-минутное облучение жидкой меди НЭМИ. При этом теплопроводность меди возрастает в 1,73 раза в сравнении с необлученной медью в жидком состоянии.

При исследовании влияния амплитуды импульсов напряжения генератора НЭМИ на кристаллизационные параметры и структурообразование силумина, прежде всего, необходимо уточнить влияние термовременной обработки расплава на вышеуказанные параметры.

Из рис. 3, *a* следует, что увеличение продолжительности термовременной обработки (выдержки) при температуре 780 °С в течение до 20 мин практически не влияет на кристаллизационные параметры, хотя наблюдается некоторое измельчение его структурных составляющих – α -твердого раствора и эвтектики. При этом теплопроводность силумина также не зависит от термовременной обработки (см. рис. 3, *a*).

Статистический анализ ширины эвтектических зерен показал (см. рис. 4, *a*), что по мере увеличения времени изотермической выдержки наблюдается существенное увеличение размера эвтектических зерен в различных сечениях отливки: в центре, крае и середине.

Микротвердость H_{20} α -твердого раствора изменяется от времени выдержки по экстремальной зависимости с максимумом ее значения при 10-минутной выдержке (см. рис. 4, *b*). Микротвердость эвтектики ($\alpha + Si$) также изменяется по аналогичной зависимости (см. рис. 4, *b*).

Результаты влияния амплитуды импульсов напряжения генератора на кристаллизационные параметры силумина АК7Ч приведены на рис. 3, *e – к*. Как видно, увеличение амплитуды способствует резкому повышению температур начала кристаллизации α -твердого раствора t_{α} и эвтектики t_e (см. рис. 3, *e*). Время кристаллизации α -твердого раствора τ_{α} и эвтектики τ_e уменьшается (см. рис. 3, *ж*).

В соответствии с сокращением температурного интервала кристаллизации степени уплотнения расплава при кристаллизации α -твердого раствора $-\Delta J_{\alpha}$ и эвтектики $-\Delta J_e$ уменьшаются (см. рис. 3, *з*), следовательно, сплав становится более доэвтектическим.

Коэффициенты термического сжатия $\alpha_{ж}$ жидкого сплава от температуры 780 °С до температуры начала кристаллизации α -твердого раствора и твердого силумина $\alpha_{ТВ}$ возрастают по мере повышения величины амплитуды импульсов до 15 кВ (см. рис. 3, *и*).

Повышение температуры начала кристаллизации α -твердого раствора, по-видимому, связано с диспергированием неметаллических включений, например оксида алюминия, под воздействием НЭМИ с большей амплитудой, которые являются потенциальными зародышами центров кристаллизации α -твердого раствора. По аналогичному механизму кристаллизуется эвтектика. При этом также диспергируются кремнистые включения, входящие в состав эвтектики. По этой причине также повышается температура начала кристаллизации эвтектики.

Максимальная теплопроводность силумина наблюдается при амплитудах импульсов 5-6 кВ (см. рис. 3, *к*), и она возрастает в 1,53 раза в сравнении с необлученным силумином.

На рис. 5, *a* и *b* приведены результаты измерения микротвердости структурных составляющих силумина от амплитуды импульсов. Обработка расплава НЭМИ с различной амплитудой импульсов повышает микротвердость α -твердого раствора и эвтектики. Микротвердость α -твердого раствора возрастает в 1,25 раза, а микротвердость эвтектики – в 1,33 раза.

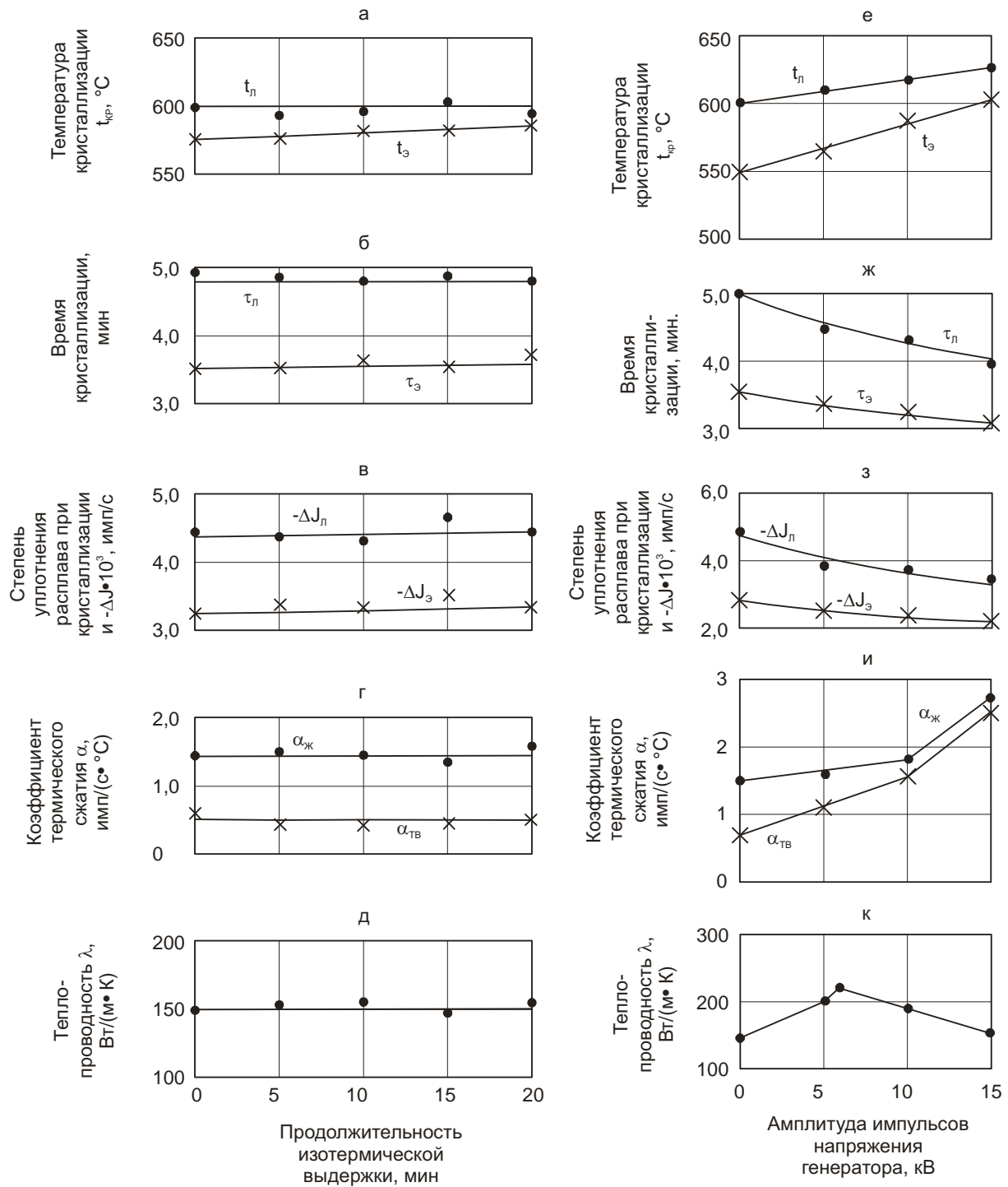


Рис. 3. Влияние термовременной обработки (а – д) и облучения расплава НЭМИ (е – к) на кристаллизационные параметры и теплопроводность силумина АК7ч

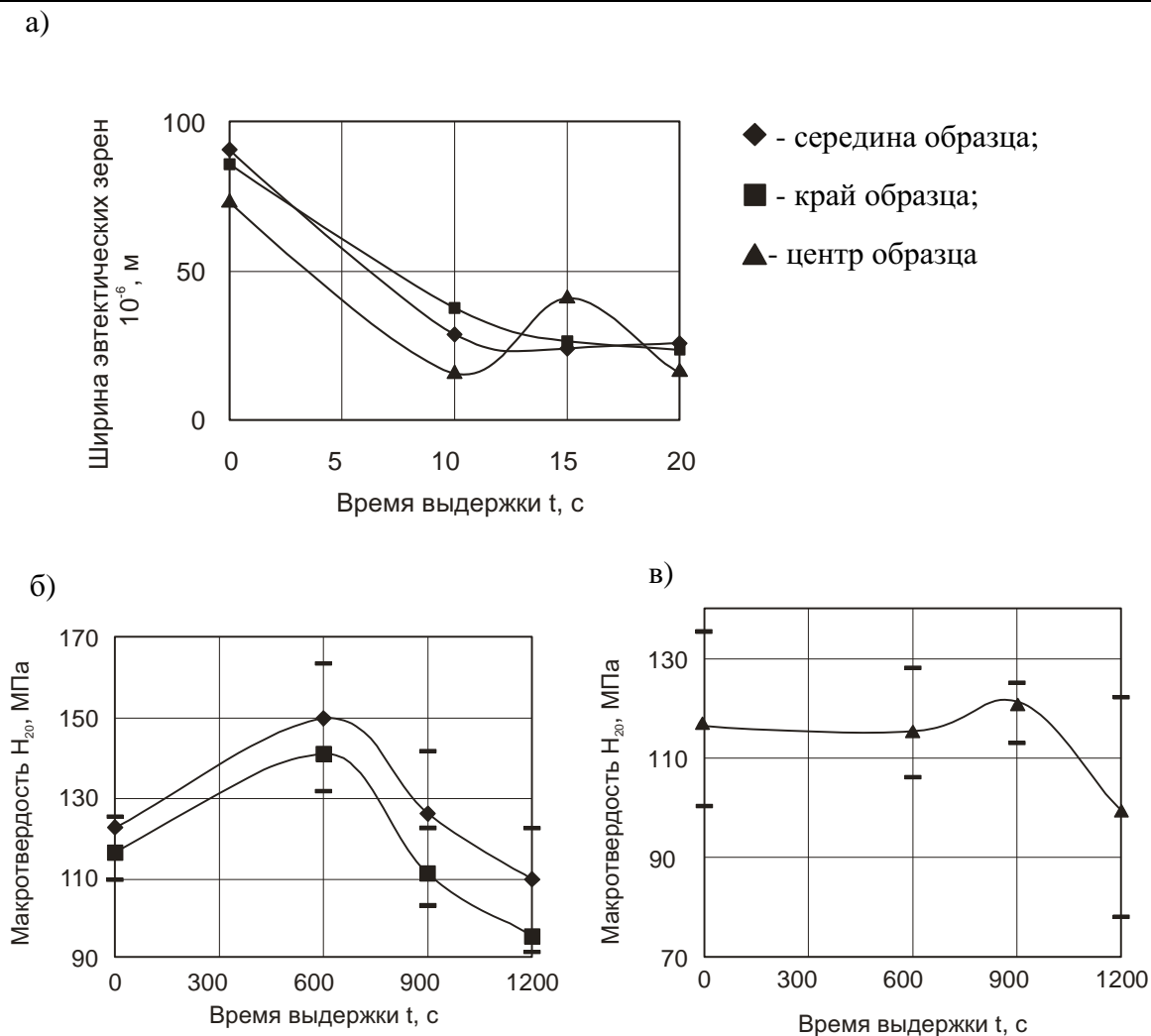


Рис. 4. Влияние термовременной обработки расплава на размер эвтектических зерен (а), микротвердость α -твердого раствора (б) и эвтектики (в)

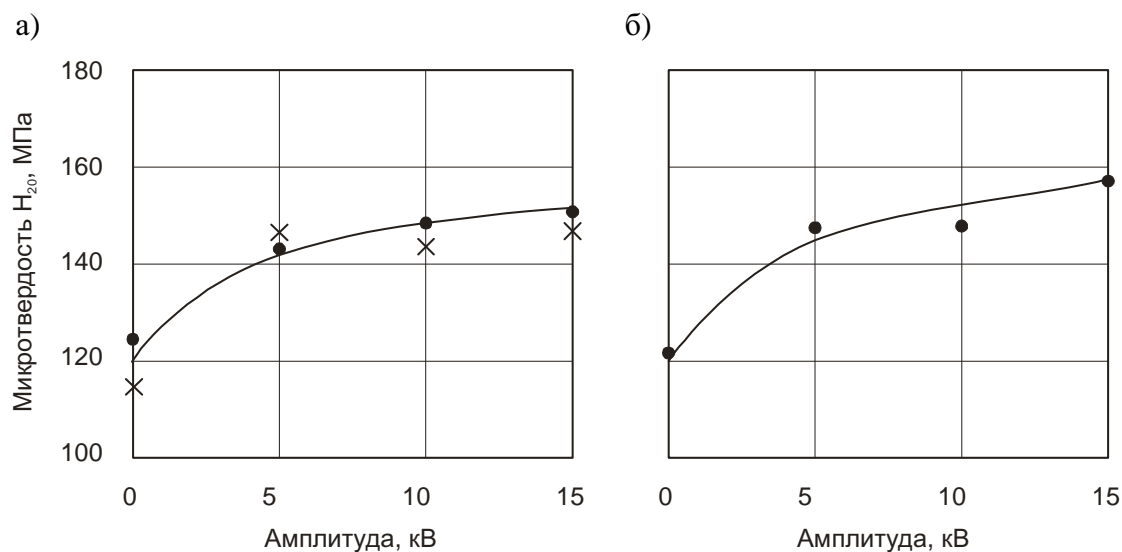


Рис. 5. Влияние продолжительности облучения расплава НЭМИ на микротвердость силумина: а – α -твердый раствор; б – эвтектика



На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. На процесс кристаллизации меди влияет не только ПОН, но и величина амплитуды импульсов напряжения НЭМИ. Максимальная теплопроводность меди достигается (для исследуемого объема слитка) при малых амплитудах импульсов (5-6 кВ) и ПОН, равный 10 мин.

2. Термовременная обработка (780 °С в течение 20 мин) не оказывает существенного влияния на кристаллизационные параметры и теплопроводность силумина АК7ч, хотя наблюдается некоторое изменение его структурных составляющих.

3. Увеличение амплитуды напряжения генератора НЭМИ повышает температуру начала кристаллизации α -твердого раствора $t_{\text{л}}$ и эвтектики $t_{\text{э}}$ и сокращает время их кристаллизации $\tau_{\text{л}}$ и $\tau_{\text{э}}$.

4. В соответствии с уменьшением температурного интервала кристаллизации снижается степень уплотнения расплава при кристаллизации α -твердого раствора $-\Delta J_{\text{л}}$ и эвтектики $-\Delta J_{\text{э}}$. Следовательно, сплав под воздействием возрастающей амплитуды напряжения генератора становится более доэвтектическим.

5. Коэффициенты термического сжатия $\alpha_{\text{ж}}$ и $\alpha_{\text{тв}}$ постепенно возрастают по мере возрастания амплитуды.

6. Максимальная теплопроводность достигается при малых амплитудах 5-6 кВ и возрастает в 1,5 раза.

7. Увеличение амплитуды напряжения генератора НЭМИ способствует некоторому изменению структурных составляющих.

8. Увеличение амплитуды повышает микротвердость структурных составляющих силумина АК7ч.

Высокая амплитуда напряжения генератора НЭМИ необходима для обработки большого объема жидкого силумина. Эти исследования будут продолжены в производственных условиях на предприятии ОАО «КнаАПО».

ЛИТЕРАТУРА

1 Ри, Хосен. Свойства алюминиевых сплавов (силуминив) в жидком и твердом состоянии / Хосен Ри, Е. М. Баранов, В. И. Шпорт, В. И. Якимов и др. – Владивосток : Дальнаука. 2002. – 144 с.

2 Муравьев, В. И. Изготовление литых заготовок в авиастроении / В. И. Муравьев, В. И. Якимов, Хосен Ри и др. – Владивосток : Дальнаука, 2003. – С. 43.

3 Якимов, В. И. Исследование влияния электрического тока на процесс кристаллизации алюминиевых сплавов / В. И. Якимов, А. И. Евстигнеев, Г. Е. Паниван и др. // Прикладные задачи механики деформируемого твердого тела. Вып. 3. Ч. 2 : сб. научных трудов ИМиМ ДВО РАН. – Комсомольск-на-Амуре : ИМиМ ДВО РАН, 2009. – С. 274-277.

4 Ри, Э. Х. Влияние облучения жидкой фазы наносекундными электромагнитными импульсами на ее строение, процессы кристаллизации и структурообразования и свойства литейных сплавов / Э. Х. Ри, Хосен Ри, С. В. Дорофеев, В. И. Якимов. – Владивосток : Дальнаука, 2008. – 177 с.

5 Ри, Э. Х. Воздействие наносекундных электромагнитных импульсов (НЭМИ) на свойства магниевого сплава / Э. Х. Ри, С. В., С. В. Дорофеев, Хосен Ри, В. И. Якимов. Вып. 3. Ч. 2. – Комсомольск-на-Амуре : ИМиМ ДВО РАН, 2009. – С. 304-311.

Гущин В. Н., Ульянов В. А.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ
НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК

Гущин В. Н., Ульянов В. А.

V.N. Guschin, V.A. Uljanov

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ
НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК

MATHEMATICAL AND PHYSICAL MODELING OF SECTIONS IN CONTINUOUS
CASTING

Ульянов Владимир Андреевич – доктор технических наук, профессор, зам. заведующего кафедрой Нижегородского государственного технического университета (Россия, Нижний Новгород); 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24; (8312)436-03-02. taep@nntu.nnov.ru

Mr. Vladimir A. Uljanov – Doctor of Engineering, Deputy Head of a department at Nizhniy Novgorod State Technical University, 603950 Nizhniy Novgorod, 24 Minina str., phone: + 7 8312 436-03-02, taep@nntu.nnov.ru

Гущин Вячеслав Николаевич – кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета (Россия, Нижний Новгород); 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24; (8312) 436-03-02. taep@nntu.nnov.ru

Mr. Viacheslav N. Guschin – PhD in Engineering, Associate Professor, Nizhniy Novgorod State Technical University, 603950 Nizhniy Novgorod, 24 Minina str., phone: + 7 8312 436-03-02, taep@nntu.nnov.ru

Аннотация. Рассмотрены тепловые аспекты математического и физического моделирования формирования непрерывнолитых заготовок. Проведено сравнение кинетики затвердевания и температурных полей в заготовках с экспериментальными данными.

Summary. Temperature aspects of mathematical & physical modeling of continuous casting sections are considered. Freezing kinetics and temperature fields in sections are compared with experimental data.

Ключевые слова: методика расчета, кинетика затвердевания, граничные условия, температурное поле, непрерывная разливка, моделирование, критерии, симплексы.

Keywords: calculation method, freezing kinetics, boundary conditions, thermal field, continuous casting, modeling, criteria, simplexes

УДК 669.412: 621.047

Современные математические модели процессов затвердевания непрерывнолитых заготовок необходимы не только для анализа процессов их формирования, но и для непосредственного применения в автоматических системах управления машинами непрерывной разливки в реальном времени.

Для решения задач затвердевания требуется проанализировать уравнение энергии [1–4]

$$C\rho\partial t/\partial\tau + a_{ж}\rho_{ж}\partial S/\partial\tau = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad}T) - C_{т}\rho_{т}S\vec{W} \operatorname{grad}t \quad (1)$$

в записи для трех фаз с учетом граничных условий:

$$Fo^{-1}\partial\theta_{ж-т}/\partial\tau' = \partial^2\theta_{ж-т}/\partial Y^2 \text{ при } \theta < Y < \delta_{ж-т}, \quad (2)$$

$$Fo^{-1}\partial\theta_{ж-т}/\partial\tau' = \partial^2\theta_{ж-т}/\partial Y^2 + \rho Q_o\partial\delta/\partial\tau'\rho_{ж-т}C_{ж-т}\Delta t \text{ при } \delta_{ж-т} < Y < \delta_{т}, \quad (3)$$

$$Fo^{-1}\partial\theta_{т}/\partial\tau' = \partial^2\theta_{т}/\partial Y^2 \text{ при } \delta_{т} < Y < X_o, \quad (4)$$

где t – текущая температура; S – сечение жидкой фазы; \vec{W} – вектор скорости; $C\rho = (1-S)C_{ж}\rho_{ж} + SC_{т}\rho_{т}$; $\lambda = \lambda_{т}S + (1-S)\lambda_{ж}$; $\theta_i = (t-t_o)/(t_{фр}-t_o)$ – безразмерная температура

тура; $\tau' = \tau / \tau_0$ – безразмерное время; τ, τ_0 – текущее и характерное размерные временные промежутки; Q_0 – скрытая теплота затвердевания; Y – текущая координата; $\delta_T = \xi / X_0$, $\delta_{ж-т} = (\xi + \varepsilon) / X_0$ – безразмерные толщины полностью затвердевшей с двухфазной оболочкой; X_0 – характерный размер; ρ – плотность; C – изобарная теплоёмкость; индексы $i = ж, ж-т, т, о$ – принадлежность к жидкой, жидко-твердой, твердой фазам и окружающей среде; $\Delta t = t_{фр} - t_0$; $t_{фр}, t_0$ – температуры фронта затвердевания и окружающей среды; $Fo = a\tau / X_0^2$ – число подобия Фурье (a – температуропроводность); ξ – текущая (размерная) толщина корки (оболочки).

Граничные условия к уравнениям (1) – (4) следующие:

при $\tau = 0$ $\partial\theta_{ж} / \partial X$, $\theta_{ж} = \theta_{ж-т}$, $\delta_{ж} = \delta_{ж-т}$; $\delta = 0$; при $\tau > 0$ $Nu = -\partial\theta_{ж} / \partial Y$.

$$Bi = -\partial\theta_T / \partial Y; -\lambda_T \partial\theta / \partial Y = -\lambda_{ж} \partial\theta_{ж} / \partial Y + Q_0 \rho \delta_{ж-т} / \partial\tau \rho_{ж-т} C \Delta t, \quad (5)$$

где $Nu = \alpha_{ж} X_0 / \lambda_{ж}$ – число подобия Нуссельта; $Bi = \alpha_{п} X_0 / \lambda_T$ – число подобия Био.

Решение системы уравнений можно получить для пульсирующих возмущений интенсивности теплоотдачи от жидкого расплава и с поверхности заготовки $\bar{\alpha}_{ж} = \alpha_{ж} + \alpha'_{ж}$ и $\bar{\alpha}_{п} = \alpha_{п} + \alpha'_{п}$ при их функциональной зависимости от внешней динамической нагрузки, т.е. $\alpha'_{ж}, \alpha'_{п} = f(Ne)$; $\alpha_{ж}, \alpha_{п}$ – коэффициенты теплоотдачи от жидкого металла к фронту затвердевания и от поверхности затвердевающей заготовки к окружающей среде; $Ne = E / (\rho_{ж} \omega^2 X_0^3)$ (E – энергия внешнего воздействия, ω – скорость потока расплава, $\rho_{ж} \omega^2 X_0^3$ – энергия, переданная потокам расплава вдоль фронта затвердевания).

Имеющиеся численные решения данной задачи, особенно в трёхмерной постановке, требуют уточнения сведений о граничных условиях, лишены наглядности и не пригодны для быстрой оценки влияния изменения тех или иных конструктивных и технологических параметров.

Способ интегральных тепловых балансов, предложенный А.И. Вейником, Г.П. Иванцовым и развитый Ю.А. Самойловичем, позволяет создать упрощенные расчётные методики кинетики затвердевания [1, 3, 5]. Способ заключается в составлении дифференциального уравнения движения фазовой границы (фронта затвердевания) на основе теплового баланса затвердевающего слоя металла. Основное отличие данного решения в том, что в уравнение теплового баланса вводятся одновременно четыре составляющие: Q – теплота, теряемая отливкой (заготовкой) в процессе затвердевания; $Q_{акк}$ – теплота аккумуляции нарастающей коркой; $Q_{пер}$ – теплота перегрева расплава и $Q_{кр}$ – теплота кристаллизации, выделяющаяся на фронте затвердевания. Общий вид дифференциального уравнения теплового баланса

$$dQ = dQ_{акк} + dQ_{пер} + dQ_{кр}. \quad (6)$$

Составляющие этого уравнения для бесконечной пластины следующие:

$$\left. \begin{aligned} Q &= \Delta t_{кор} F \tau / \xi; \\ Q_{акк} &= \rho C \Delta t_{кор} F \xi / 2; \\ Q_{пер} &= \alpha_{ж} \Delta t_{пер} F \tau; \\ Q_{кр} &= \rho Q_0 F \xi, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где F – площадь участка затвердевшей корки; ξ – текущая толщина корки; $\Delta t_{\text{пер}} = t_{\text{ж}} - t_{\text{кр}}$ – величина перегрева жидкого металла ($t_{\text{ж}}$) над температурой фронта затвердевания ($t_{\text{кр}}$ в расчётах принимается постоянной).

Перепад температур в корке слитка $\Delta t_{\text{кор}} = t_{\text{кр}} - t_{\text{пов}}$ рассчитывается из уравнения температурной кривой:

$$t = -(t_{\text{кр}} - t_{\text{пов}})(X_1 / \xi)^n + t_{\text{кр}}, \quad (8)$$

где $t_{\text{пов}}$ – текущая температура поверхности отливки (заготовки); n – показатель степени кривой.

Путём преобразования выводим следующую зависимость перепада температур в корке от перепада температур между фронтом затвердевания и охлаждающей средой $\Delta t_o = t_{\text{кр}} - t_o$ (в расчётах принимается постоянной величиной):

$$\Delta t_{\text{кор}} = \Delta t_o / (1 + n\lambda / \alpha\xi), \quad (9)$$

где t_o – температура окружающей среды; λ – теплопроводность затвердевшей корки; α – коэффициент теплоотдачи с поверхности отливки (заготовки). Решение уравнения (6) для граничных условий третьего рода имеет вид:

$$dFo = \frac{\left[\frac{1}{n(n+1)} \left\{ 2\mu\delta + \left(\frac{3,6\mu\text{Bi}}{n} - 0,6 \right) \delta^2 + \left(\frac{1,32\mu\delta}{n^2} + \frac{1,82\text{Bi}}{n} \right) \delta^3 - \frac{0,88\text{Bi}^2\delta^4}{n^2} \right\} \right]}{\left[\left(1 + \frac{1,1\text{Bi}\delta}{n} \right) \left[\mu(1-\text{By}) + \left(\text{By} - \frac{\text{Bi}}{n} \right) \mu\delta - \left(0,2 + \frac{\mu^2\text{Bi}}{n^2} \right) \text{Bi}\delta^2 + \frac{1,21\mu^2\text{Bi}\delta^3}{n^3} \right] \right]} - \frac{(\mu - \delta) \left(1 + \frac{1,1\text{Bi}\delta}{n} \right)^2}{\text{NBi} \left[\mu(1-\text{By}) + \left(\text{By} - \frac{\text{Bi}}{n} \right) \mu\delta - \left(0,2 + \frac{\mu^2\text{Bi}}{n^2} \right) \text{Bi}\delta^2 + \frac{1,21\mu^2\text{Bi}\delta^3}{n^3} \right]}. \quad (10)$$

Выведенная зависимость после интегрирования достаточно громоздка, поэтому здесь не приводится. Несколько проще можно представить решения для граничных условий первого рода [1]. Однако и эти приближённые решения задачи затвердевания требуют уточнения граничных условий как на поверхности заготовки, так и на фронте затвердевания.

Получен обширный фактический материал по кинетике фронта затвердевания и взаимосвязи их с граничными условиями I–III-го рода [1, 3, 5, 6]. На рис. 1, 2 представлены экспериментальные данные по зависимости безразмерной средней толщины корки заготовок квадратного и прямоугольного сечений от числа Фурье. На рис. 1 приведены данные для углеродистых марок сталей, разливаемых в кристаллизаторы МНЛЗ сечением 140×280 – 140×320 мм. На рис. 2 приведены данные для углеродистых марок сталей, разливаемых в кристаллизаторы МНЛЗ сечением 150×180 – 400×600 мм.

Представленные на рисунках данные показывают тенденции кинетики продвижения фронта затвердевания блюмовых и слябовых заготовок, но не объясняют разброс опытных данных, в особенности у слябовых заготовок.

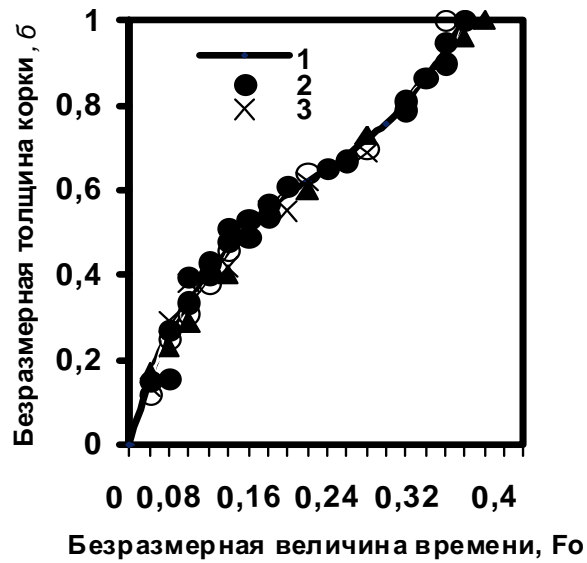


Рис. 1. Кинетика затвердевания блюмовых непрерывнолитых заготовок сечением:
 ---- – 200×200 мм из стали 45; • – 280×280 мм из стали 35; Δ – 140×140 мм из стали 50; × – 220×220 из стали У8; о – 280×320 мм из стали 45

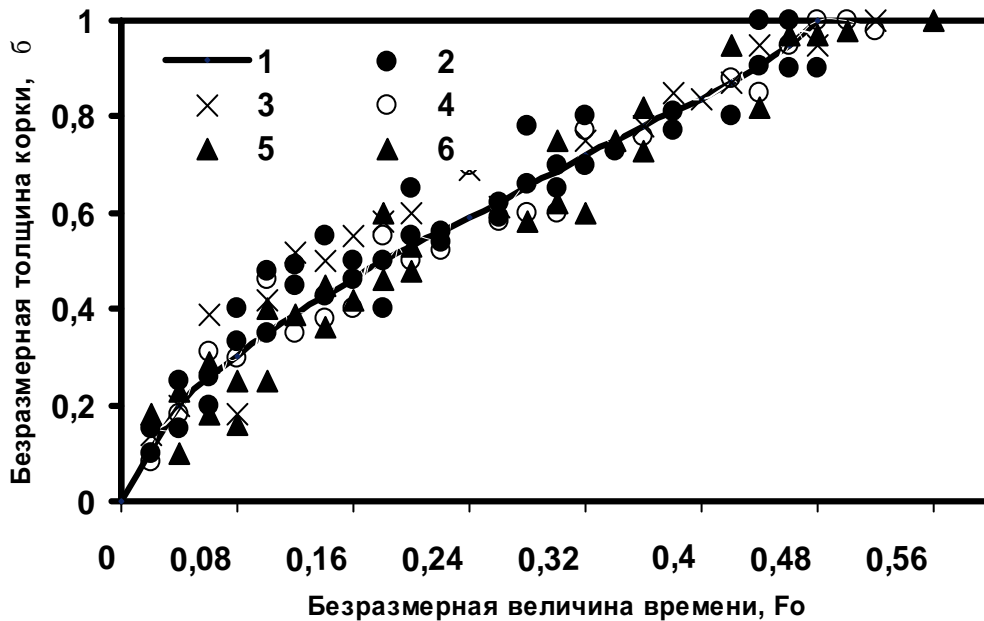


Рис. 2. Кинетика затвердевания слябовых непрерывнолитых заготовок сечением:
 ---- – 180×500-530 мм из стали У8; • – 150×600 мм из стали 50; Δ – 180×400 мм из стали 20; × – 150×1000 мм из стали 20; о – 180×450 мм из стали 9ХФ

На основе анализа подобного рода экспериментальных данных можно получить эмпирические зависимости. Так, для прямоугольных слитков основные теплофизические параметры в ходе разливки в работе [3] описываются с помощью следующих зависимостей:

$$\Delta t_{с л пов} = 880A_{пр} Fo^{0,35}; \quad (11)$$

$$q_c = 2,35 \cdot 10^4 B_{\text{пр}} \text{Fo}^{-0,45}; \quad (12)$$

$$\text{Fo}_л = C_{\text{пр}} (KZ)^2; \quad (13)$$

$$\text{Fo} = D_{\text{пр}} (KZ)^2 \delta^2 / (1 + 0,3\delta^4)^2; \quad (14)$$

$$\partial \delta / \partial F = E_{\text{пр}} (1 + 0,3\delta^4)^3 / \delta (1 - 0,9\delta^4) (KZ)^2; \quad (15)$$

$$\text{Bi}_c = q_c S / \Delta t_c \lambda, \quad (16)$$

где $A_{\text{пр}} = R_{\text{э}}^{-0,08}$; $B_{\text{пр}} = R_{\text{э}}^{-0,75} \mu^{0,3}$; $R_{\text{э}} = S\mu / (1 + \mu)$ – эквивалентный радиус слитка; $(KZ)^2 = \mu / 2(1 + \mu)$; S – половина толщины непрерывного слитка; μ – соотношение сторон; $\delta = \xi / S$ – безразмерная толщина нарастающей корки; $\text{Fo} = a\tau / S^2$ и $\text{Fo}_л = a\tau_l / S^2$ – текущий и полного затвердевания (по ликвидусу) критерии Фурье. Для непрерывнолитых заготовок сечением 180×400–530 мм указанные выше постоянные изменяются в следующих пределах: $A_{\text{пр}} = 2,22 - 2,94$; $(KZ)^2 = 0,345 - 0,373$; $R_{\text{э}} = 1,024 - 1,030$; $B_{\text{пр}} = 1,86 - 1,71$; $C_{\text{пр}} = 1,24$; $D_{\text{пр}} = 2,1$; $E_{\text{пр}} = 0,24$; t_l и $t_{\text{пов}}$ – температуры изотермы ликвидуса и поверхности заготовки.

Полученные зависимости представляют собой осреднённую динамику формирования оболочки непрерывнолитых заготовок без учёта температурных и гидродинамических особенностей подвода расплава в кристаллизатор.

Если определение параметров теплоотдачи с поверхности заготовки можно с достаточной степенью точности определить на действующей МНЛЗ, то имеющиеся промышленные методики определения температурных полей в жидкой лунке, например с помощью вмораживаемых блоков термопар [5], не дают достаточно достоверной информации.

В значительной степени восполняют этот недостаток методы физического моделирования. Полученные совокупности критериев и симплексов для моделирования процессов затвердевания с упрощением уравнений (1)–(4) приводятся в работах [1, 6, 7]. В результате преобразований получена критериальная зависимость вида

$$\delta = f(\text{BiN}, \theta, \text{Ne}, \text{Fo}, X, Y), \quad (17)$$

где $\text{N} = C\Delta t / Q_0$ – число подобия фазового перехода; $\delta = \xi / X_0$ – безразмерная толщина нарастающей корки; $\theta = \Delta t / \Delta t_{л-с}$ – симплекс (соотношение температурных перепадов, Δt – произвольный перепад температур, $\Delta t_{л-с} = t_l - t_c$ – разница температур между ликвидусом и солидусом); X, Y – безразмерные координаты.

Как показывают исследования, применение для расчётов масштабов моделирования отдельных чисел подобия Bi и N невозможно из-за трудности в подборе соответствующих модельных сред. В качестве модельных сред, как правило, применяют среды, затвердевающие при низких температурах: парафин, нафталин, гипосульфит и т.д.

В отсутствие внешних воздействий критериальная зависимость (17) принимает вид

$$\delta = f(\text{BiN}, \theta, \text{Fo}, X, Y). \quad (18)$$

Масштабы моделирования при этом рассчитывались из следующих соображений:

- линейный масштаб выбирается из конструктивных соображений

$$M_x = X_m / X_0; \quad (19)$$

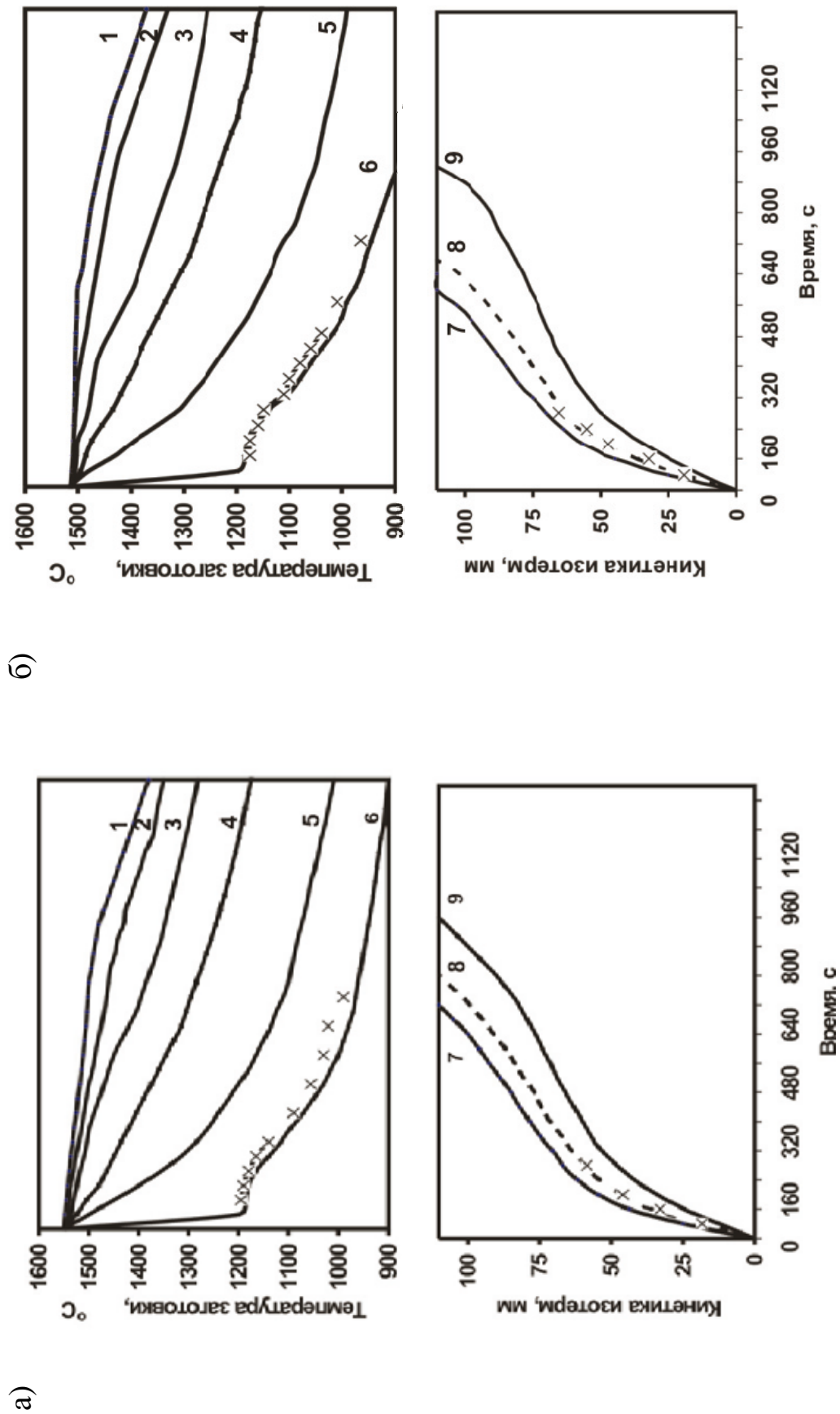


Рис. 3. Температурные поля и кинетика затвердевания модельных заготовок 220×280 мм при температуре перегрева:
а – 50 °С; б – 15 °С: 1 – 6 – точки замера температур в отливаемой заготовке: 1 – центр, 6 – поверхность;
7, 8, 9 – изотермы ликвидуса, границы выливаемости, солидуса

- масштаб температурных перепадов из симплекса $\theta = idem$

$$M_{\Delta t} = \Delta t_m / \Delta t_o; \quad (20)$$

- масштаб коэффициента теплоотдачи из комплексов критериев $BiN = idem$

$$M_{\alpha} = K_{\lambda} K_{Q_o} / (K_C M_{\Delta t} M_x); \quad (21)$$

- масштаб времени из числа подобия $Fo = idem$

$$M_{\tau} = M_x^2 / K_a, \quad (22)$$

где индекс м – принадлежит параметру модели; о – оригиналу;

$K_{\lambda} = \lambda_m / \lambda_o$ – симплекс соотношения коэффициентов теплопроводности;

$K_{Q_o} = (Q_o)_m / (Q_o)_o$ – симплекс соотношения скрытых теплот затвердевания;

$K_C = C_m / C_o$ – симплекс соотношения изобарных теплоёмкостей;

$K_a = a_m / a_o$ – симплекс соотношения температуропроводностей.

При анализе общей физической картины затвердевания непрерывнолитых заготовок обычно рассматривают тепловое состояние и кинетику изотерм ликвидуса, границы выливаемости и солидуса (рис. 3).

Полученные при этом результаты близки экспериментальным промышленным данным, в том числе эмпирическим зависимостям (11) – (16) с той лишь разницей, что позволяют уточнить все возможные особенности скоростных и температурных режимов подвода расплава в кристаллизаторы МНЛЗ.

На рис. 3 приведены результаты моделирования, данные замеров температуры поверхности заготовки сечением 280×320 мм из стали марки 45 и фронта затвердевания в верхней части жидкой лунки.

Имея эти данные и зная основные теплофизические параметры данной марки стали можно проанализировать тепловую работу МНЛЗ в кристаллизаторе и ЗВО с помощью различных расчётных методик. В том числе появляется возможность значительно повысить точность метаматематических моделей типа (2) – (4), используемых в качестве программного обеспечения для управления промышленными объектами такого типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скворцов, А. А. Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков и заготовок / А. А. Скворцов, А. Д. Акименко, В. А. Ульянов. – М. : Metallurgia, 1991. – 216 с.
2. Журавлёв, В. А. Теплофизика формирования слитка / В. А. Журавлёв, Е. М. Китаев – М. : Metallurgia, 1974. – 216 с.
3. Китаев, Е. М. Затвердевание стальных слитков / Е. М. Китаев. – М. : Metallurgia, 1982. – 168 с.
4. Цаплин, А. И. Теплофизика внешних воздействий при кристаллизации стальных слитков на машинах непрерывного литья / А. И. Цаплин. – Екатеринбург : УРОРАН, 1995. – 238 с.
5. Самойлович, Ю. А. Системный анализ кристаллизации слитка / Ю. А. Самойлович. – Киев : Наукова думка, 1983. – 248 с.
6. Гущин, В. Н. Методы исследования и разработка градиентных промышленных технологий управления тепломассообменными процессами при разливе и формировании непрерывнолитых и стационарных заготовок / В. Н. Гущин, В. А. Ульянов. – Нижний Новгород : НГТУ, 2006. – 141 с.
7. Ульянов, В. А. Внепечная обработка и разлива стали / В. А. Ульянов [и др.]. – Нижний Новгород : НГТУ, 2008. – 129 с.

Дмитриев Э. А., Тарасова А. А.
E.A. Dmitrijev, A.A. Tarassova

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ СТЕРЖНЕВЫХ СМЕСЕЙ СО СВЯЗУЮЩИМИ НА ОСНОВЕ СУЛЬФАТА МАГНИЯ

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF CORE SANDS WITH MAGNESIUM SULPHATE-BASED BINDERS



Дмитриев Эдуард Анатольевич – доктор технических наук, доцент, директор Института компьютерного проектирования машиностроительных технологий и оборудования Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: msf@knastu.ru

Mr. Eduard A. Dmitrijev – Doctor of Engineering, Associate Professor, Director of the Institute for Computer Design of Mechanical Engineering Technologies and Equipment/Machine, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. 27, Lenin prospect, 681013 Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk region, Russian Federation. E-mail: msf@knastu.ru

Тарасова Анастасия Андреевна – инженер-технолог ОАО «Амурлитмаш» (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре).

Ms. Anastasia A. Tarassova – process control engineer, JSC “Amurlitmash”

Аннотация. В работе представлены исследования нового типа неорганических связующих на основе сульфата магния. Приводятся данные о влиянии исходной влажности смеси и температуры сушки на прочностные свойства отвержденной смеси. Представлены результаты опытно-промышленных испытаний исследованного связующего.

Summary: The paper considers new types of non-organic binders based on magnesium sulphate. Data are presented about how initial humidity of the mixture and drying temperature impacts the strength properties of the cured mixsture. Presented are the results of pilot testing of the binder.

Ключевые слова: смесь, сульфат магния, стержень, связующее, отливка.

Keywords: mixture, magnesium sulphate, core, binder, casting.

УДК 621.74

Широкое внедрение связующих на основе синтетических смол, удовлетворяющих самым высоким требованиям по многим показателям, но не соответствующих современным требованиям экологической безопасности и возросшим требованиям к утилизации отработанных смесей, привело к необходимости пересмотра направлений развития новых связующих для литейных смесей. Согласно материалам крупных международных выставок по литейному производству, вектор новых разработок в области связующих для литейных смесей сместился в сторону неорганических связующих, имеющих не только высокие технологические свойства, но и обеспечивающих высокую экологическую безопасность на всех этапах производства и утилизации, а также отвечающих современным требованиям ресурсосбережения.

Представленные в данной работе исследования направлены на разработку новых связующих на основе сульфатов. Большинство сульфатов при наличии молекул воды в кристаллизационной решетке способны плавиться при незначительном нагревании и по мере удаления молекул воды под действием температуры вновь переходить в твердое состояние. Однако такими свойствами обладают не все сульфаты, наилучшими свойствами из всех исследо-

ванных сульфатов обладает $MgSO_4$. Сульфат магния является широко распространенным природным соединением, выпускается отечественной промышленностью в больших количествах в виде $MgSO_4 \cdot 7H_2O$.

Термоанализ $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (рис. 1), проведенный с помощью синхронного термоанализатора фирмы NETZCH при нагревании образца со скоростью $5^\circ C/мин$, а также данные [1] показали, что при температурах от $87,2^\circ C$ происходит плавление образца с образованием метастабильных $MgSO_4 \cdot 5H_2O$ и $MgSO_4 \cdot 4H_2O$, сопровождающихся потерей массы в среднем на 14 %, далее при нагреве до $112,9^\circ C$ происходит интенсивное удаление воды из расплава сульфата, сопровождающееся также потерей массы еще на 14 % и переходом в $MgSO_4 \cdot 2H_2O$. При температурах до $161,5^\circ C$ продолжается потеря кристаллизационной воды до

перехода в стабильный моногидрат $MgSO_4 \cdot H_2O$. Полное обезвоживание наблюдается в интервале температуре от 300 до $330^\circ C$, о чем свидетельствует стабилизация гравиметрической кривой (рис. 1). Обезвоженный $MgSO_4$, при последующем нагревании не претерпевает никаких изменений. Температура разложения $MgSO_4$ составляет $1100...1200^\circ C$.

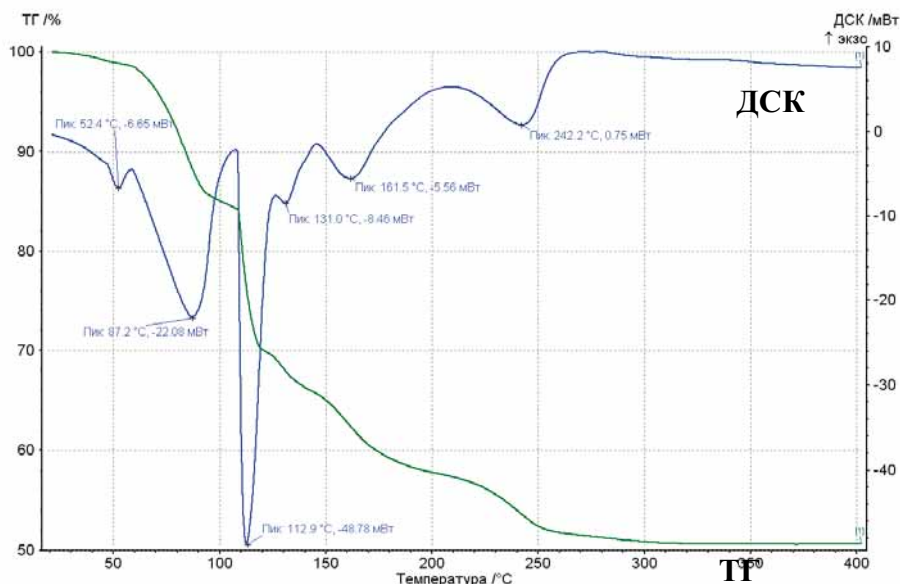


Рис. 1. Термограмма образца $MgSO_4 \cdot 7H_2O$:

ТГ – термогравиметрическая кривая изменения массы образца;

ДСК – кривая дифференциально-сканирующей калориметрии

При исследовании связующих свойств соли $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ первоначально было выявлено, что сухая смесь кварцевого песка и порошка $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (5 масс. ч.) при нагревании в сушиле не переходит в связанное состояние. Очевидно, это связано с тем, что мелкие частицы сульфата магния при нагревании достаточно быстро теряют кристаллизационную воду, соответственно быстро минуют фазу плавления и не успевают сплавиться между собой и образовать манжеты, связывающие зерна наполнителя (рис. 2). При увлажнении смеси кварцевого песка и $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ водой смесь в процессе сушки приобретает прочность за счет испарения воды и плавления с последующей кристаллизацией $MgSO_4$ (рис. 3). Причем, было замечено, что с увеличением влажности смеси ее прочность в сухом состоянии увеличивается.

Для определения оптимальной влажности и температуры сушки смеси с сульфатом магния был разработан трехуровневый план эксперимента по известной методике [2].

Варьируемыми факторами были приняты влажность смеси и температура ее сушки, исследуемой функцией – прочность смеси на разрыв. Варьирование факторов производилось на трех уровнях, влажность – 0,5; 2,5; 4,5 масс. ч., температура сушки – $100, 125, 150^\circ C$. При проведении экспериментов смесь готовилась следующим образом: в сухой песок вво-

дился порошок $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ в количестве 5 масс. ч., после перемешивания в смесь вводилось расчетное количество воды с последующим перемешиванием. Результаты экспериментов обрабатывались с помощью ЭВМ, в результате чего была получена диаграмма (рис. 4), иллюстрирующая прочность смеси в высушенном состоянии в зависимости от содержания воды в сырой смеси (в диапазоне от 1 масс. ч. до 5 масс. ч.) и температуры сушки (в диапазоне от 100 до 150 °С).



Рис. 2. Структура смеси песка с $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (5 масс. ч.) после сушки (увеличение 20^{\times})



Рис. 3 Структура смеси песка с $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (5 масс. ч.) и воды (5 масс. ч.) после сушки (увеличение 25^{\times})

Сырая смесь с сульфатным связующим также подвергалась испытанию на прочность, при этом было выявлено, что вода в смеси изменяет ее сырую прочность от 0 до 0,02 МПа, т. е. смесь в сыром состоянии имеет низкую прочность.

Из полученной зависимости видно, что оптимальное количество воды зависит от температуры сушки. При минимальной температуре сушки (100 °С) оптимальное содержание воды в смеси соответствует 2,5 – 3,0 масс. ч. С увеличением температуры сушки оптимальное содержание воды несколько увеличивается. Так, при температуре сушки 150 °С оптимальное количество воды в смеси 4,0 – 4,5 масс. ч. Таким образом, оптимальное содержание $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ и воды в смеси, при условии что температура последующей сушки смеси 150 °С, должно быть в соотношении 1: 0,8 – 0,9.

Увеличение содержания воды в смеси выше оптимального приводит к некоторому падению прочности, что наиболее заметно при низких температурах сушки. Очевидно, что падение прочности при переувлажнении смеси объясняется тем, что при высокой влажности смеси наблюдается интенсивная миграция $MgSO_4$ в наполнителе (вслед за парами воды) к поверхности образца. Так, образцы, изготовленные из переувлажненной смеси и отвержденные при низких температурах (100...120 °С), на поверхностях, с которых происходило удаление воды в атмосферу, имеют избыточное содержание $MgSO_4$, что отчетливо видно на изломе высушенных образцов.

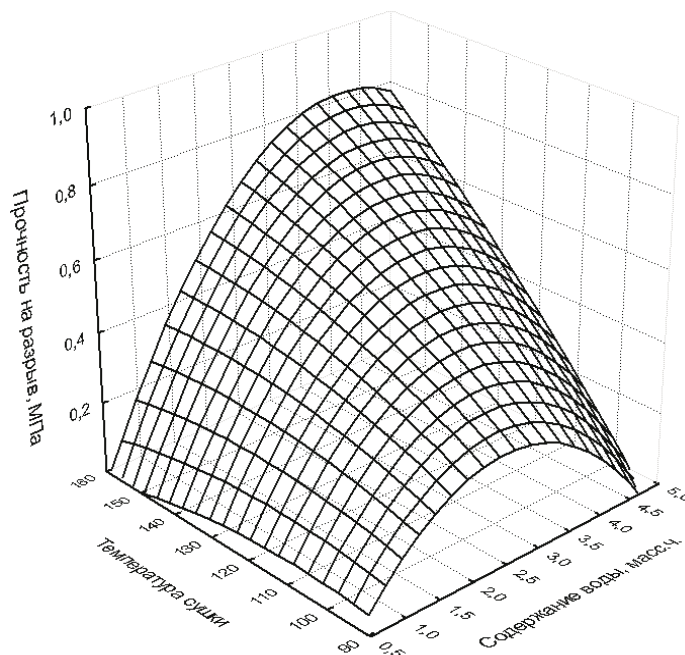


Рис. 4. Зависимость прочности смеси на разрыв от содержания воды и температуры сушки

Помимо содержания воды в смеси значительное влияние на прочность оказывает и температура сушки. Так, при одинаковом содержании воды в смеси (к примеру 2,5 масс. ч) прочность при температуре сушки 100 °С достигает 0,38 МПа, а при увеличении температуры сушки до 150 °С прочность повышается почти в два раза и достигает 0,67 МПа. Очевидно, что прочность образцов при различных температурах сушки зависит от получаемой структуры гидрата $MgSO_4$.

С целью определения влияния структуры гидрата $MgSO_4$ на прочность образцов была приготовлена смесь песка с содержанием 5 масс. ч. $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ с добавлением 3,5 масс. ч. воды. Из смеси изготавливались стандартные образцы «восьмерка», которые сушились при различных температурах и подвергались испытанию на прочность. В результате была получена зависимость прочности смеси от температуры сушки (рис. 5).

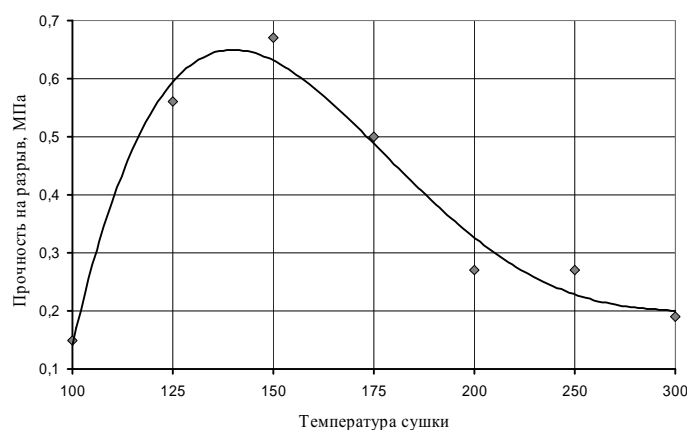


Рис. 5. Зависимость прочности смеси со связующим $MgSO_4$ от температуры сушки

Из полученной зависимости видно, что наиболее оптимальной, с точки зрения получения максимальной прочности, является температура сушки 140...150 °С. При температурах сушки 100...125 °С отвержденное связующее в манжетах имеет преимущественно прозрачный цвет. С увеличением температуры отверждения смеси свыше 125 °С до 300 °С связующее в манжетах приобретает белый матовый цвет, что характеризует более полное обезвоживание $MgSO_4$. При температурах отверждения свыше 180 °С в связующем были обнаружены трещины, возникшие в результате усадки связующего и приводящие к падению прочности образца в целом.

Сопоставляя полученную зависимость (рис. 5) с данными термоанализа сульфата магния (см. рис. 1), становится очевидным, что максимальной прочностью обладает моногидрат $MgSO_4$. Дальнейшее обезвоживание приводит к резкому падению прочности с последующей ее стабилизацией при температуре от 300 °С.

Исследования газотворности сульфата магния показали, что отвержденный при температуре 150 °С сульфат магния имеет в среднем газотворность 75 см³/г, причем основной пик газовыделения наблюдался при температуре 240...250 °С, что соответствует температуре полного обезвоживания $MgSO_4$. При увеличении температуры свыше 300 °С газотворность $MgSO_4$ практически равна нулю. Для сравнения, большинство синтетических смол, используемых в литейном производстве, имеют газотворность 700...850 см³/г.

Результаты исследования $MgSO_4$ показали возможность его использования в качестве связующего в чистом виде как в формовочных, так и в стержневых смесях. Однако низкая прочность связующего крайне ограничивает область его применения.

Для повышения прочности связующего $MgSO_4$ на его базе были разработаны связующие, состоящие из двойных и тройных солей, способные так же плавиться и кристаллизоваться под действием температуры. Разработанные солевые связующие на основе $MgSO_4$ отличаются от чистого $MgSO_4$ тем, что придают смесям более высокую прочность и термоста-

бильность. К примеру, при использовании в составе связующего $MgSO_4$ солей Na и других солей Mg позволило увеличить прочность смеси до 2,5 МПа, при этом сохранить такие важные свойства, как термостойкость и способность связующего восстанавливать содержание воды в кристаллизационной решетке, что, в свою очередь, позволяет легко регенерировать отработанные смеси.

При опытно-промышленном опробовании разработанных связующих было выявлено, что стержни, отверждаемые вне стержневого ящика (на драйерах), обладают низкой размерной точностью за счет деформаций, возникающих во время расплавления солевого связующего. Стержни, отвержденные в стержневых ящиках, наоборот, имеют высокую размерную точность. Также было выявлено, что смеси с разработанными соевыми связующими обладают практически нулевой адгезией к металлической оснастке, что позволяет использовать оснастку без разделительных покрытий на рабочих поверхностях.

Стержни, изготовленные из смесей с соевыми связующими, использовались для получения алюминиевых отливок. После заливки и отверждения металла стержневая смесь легко выбивалась из полостей отливок. Перед выбивкой стержневой смеси из сложных поднутрений стержень предварительно смачивался водой, что позволяло без особых усилий вытряхнуть отработанную смесь. Отработанная смесь собиралась и использовалась повторно.

Особый интерес представляет опытно-промышленное испытание разработанного связующего, состоящего из тройной соли на основе $MgSO_4$, взамен смолы СФП-011. Опытные промышленные испытания проводились в условиях литейного цеха ОАО «Амурлитмаш» (г. Комсомольск-на-Амуре) при получении отливок из износостойкого чугуна (рис. 6 – 7). При этом вся оснастка и технология получения стержней остались практически без изменений, за исключением того, что температура стержневых ящиков была снижена с 250 до 150 °С. При изготовлении стержней с соевым связующим вредных выделений в атмосферу цеха не обнаружено. В изготовленных отливках брак по вине стержней отсутствовал.



Рис. 6. Стержень, изготовленный из смеси с соевым связующим на основе $MgSO_4$



Рис. 7. Опытная отливка «импеллер»

Разработанные соевые связующие обладают достаточно высокой прочностью в отвержденном состоянии (до 2,5 МПа), легко выбиваются. При получении отливок из алюминиевых сплавов смесь легко регенерируется путем смачивания водой, после чего возможно ее повторное использование. Использование разработанного солевого связующего взамен полимерной смолы не снижает качество получаемых отливок и исключает вредные выделения в атмосферу цеха на всех технологических этапах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Краткая химическая энциклопедия. В 5 т. Т. 2. Ж – Малоновый эфир / гл. ред. И.Л. Кнунянц [и др.]. – М. : Советская Энциклопедия, 1963. – 1088 с.
2. Цымбал, В. П. Математическое моделирование сложных систем в металлургии : учеб. для вузов / В. П. Цымбал. – Кемерово ; М. : Издательское объединение «Российские университеты» : Кузбассвузиздат – АСТШ, 2006. – 431 с.

Гусева Р. И.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАКОКРАСОЧНЫХ СИСТЕМ ПРИ ПОКРАСКЕ ДЕТАЛЕЙ
ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Гусева Р. И.

R.I. Guseva

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАКОКРАСОЧНЫХ СИСТЕМ ПРИ ПОКРАСКЕ ДЕТАЛЕЙ
ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**PAINT&VARNISH SYSTEMS FOR PAINTING PARTS/COMPONENTS MADE
OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS**



Гусева Роза Ивановна – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология самолетостроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: r_guseva@knastu.ru

Ms. R.I. Guseva – PhD in Engineering, Professor of the Aircraft Building Technology Department, Deputy Dean of The Aircraft Building Faculty of Komsomolsk-na-Amure State Technical University. E-mail: r_guseva@knastu.ru

Аннотация. Приведен обзор по лакокрасочным покрытиям для деталей и изделий из полимерных композиционных материалов, предложена технология нанесения покрытий и технология ремонта покрытий в случае возникновения какого-либо дефекта (отслоения, игольчатые надколы, вздутия, трещины, поры, проникновение воды, царапины).

Summary: A review of paint and varnish coatings for parts and products made of polymer composite materials is presented; a technology for paint application and a technology for paint/coating repair in case of defects (delaminations, needlelike holes, paint distensions, cracks, voids, water penetration, and scratches) are proposed.

Ключевые слова: лакокрасочная система покрытий, полимерные композиционные материалы, дефекты, технология нанесения покрытий.

Keywords: Paint and varnish system, polymer composite materials, defects, coating technology.

УДК 678.4

Различные типы полимерных композиционных материалов широко используются в аэрокосмической индустрии для внешних и внутренних поверхностей и в конструкционных составляющих планера самолета.

Покраска или покрытие поверхностей полимерных композиционных материалов является важным этапом получения высококачественных поверхностей этих изделий.

На предприятиях авиационной промышленности России достаточно успешно применяют на изделиях из полимерных композиционных материалов лакокрасочные покрытия и пленки отечественного производства.

Но в настоящее время на отечественный рынок поступают лакокрасочные системы (ЛКС) передовых зарубежных фирм для покрытия полимерных композиционных материалов, которые имеют ряд преимуществ перед традиционными отечественными покрытиями:

- быстро высыхают и поверхность покрытия гладкая, ровная;
- имеют небольшой вес высохшего покрытия;
- отличаются невысоким содержанием летучих;
- покрытия легко наносятся и не требуют специальных навыков;
- имеют продолжительную жизнеспособность.

Лакокрасочные покрытия применяют как в интерьерах самолета, так и на внешних поверхностях (рис. 1, 2).



Рис.1. Поверхности планера самолета, элементы которых выполнены из композиционных полимерных материалов

Функции лакокрасочных покрытий **в интерьере** салона самолета, кухне и туалете:

- восстановление поврежденного покрытия вследствие наличия загрязнений или повреждений композитных панелей;
- полное изменение цветовой схемы покрытия;
- как часть улучшения или замена декоративных самоклеющихся пленок.



Рис. 2. Внешние и внутренние поверхности планера самолета, в которых использованы лакокрасочные покрытия

Гусева Р. И.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАКОКРАСОЧНЫХ СИСТЕМ ПРИ ПОКРАСКЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Компании, занимающиеся изготовлением и ремонтом, а также обслуживанием лакокрасочных систем, предлагают большой выбор лакокрасочных покрытий (систем ЛКС), которые отличаются следующими свойствами:

- наличием широкой гаммы цветов окраски;
- менее дорогостоящими отходами производства в сравнении с самоклеющейся пленкой;
- возможностью нанесения ЛКС различными способами (краскораспылителем или валиком);
- достаточно легким проведением локального местного ремонта в местах дефектов;
- возможностью нанесения покрытий на детали сложной формы;
- нанесение эффектом "multi-colour" (эффект разбрызгивания).

Предлагаемые ЛКС для внешней поверхности планера, произведенные по технологии "High Solid Solvent-borne" (с высоким содержанием сухого остатка) для композитных поверхностей, обеспечивают быстрое и качественное высыхание, небольшой вес высохшего покрытия, невысокое содержание летучих веществ, покрытия легко наносятся и не требуют специальных навыков.

Покрытия внутренних композитных поверхностей, выполненные по технологии "Aerowave Series" (на водной основе), включают следующие элементы ЛКС:

- эмаль Aviox Finish 77702 / Eclipse HS Topcoat;
- токопроводящие покрытия (если требуется нанесение – Pyroflex 7D 713, 8B 6a Laminar X-500 Conductive Coating);
- антистатик 10P2-3 Anti-static Conductive Flat Black Epoxy Coating;
- грунты-выравниватели – 10P30-8; Exempt solvent epoxy surfacer; 464-3-1; Epoxy primer surfacer; 467-9; Epoxy filler; 8W5 Laminar X-500 off-white Surfacer ; 20P20-3 Sandable Polyurethane Surfacer;
- барьерные грунты/ промежуточные грунты – Aerodur Barrier Primer 37045 и Aerodur CF Primer 37047;
- порозаполнитель 28C1 Magna Static Conditioner Filler, нанесение которого после очищения и обезжиривания на поверхность детали из композита обязательно.

При шлифовании поверхности перед нанесением покрытий используют минимальный размер абразива P220 для сглаживания неровностей и получения хорошей адгезии.

На очищенную, обезжиренную поверхность из композита наносят грунт Aerowave CF Primer, порозаполнитель Aerowave PoreFiller или грунт Aerowave Filler 222S01 при помощи шпателя, затем проводят шлифование (размер абразива P320), затем эмаль Aviox Finish.

Лакокрасочная система на композитных частях более уязвима перед растрескиванием, возникновением вздутостей, чем поверхность детали из дюралюминиевого сплава, поскольку композиты как конструкционный материал более жесткие и пористые.

Поэтому тщательная подготовка поверхности – очень важный факт в достижении длительной защиты композитных деталей. Подготовку поверхности проводят с учетом следующих рекомендаций:

- поверхность должна быть тщательно обезжирена и удалены все загрязнения: масло, пыль, вода;
- в случае ремонтного обслуживания самолета необходимо удалить шлифованием имеющуюся лакокрасочную систему на максимальную толщину (до первичного грунта), не повреждая поверхности композита;
- после удаления старого покрытия очень важно провести визуальный осмотр (с помощью увеличительного стекла, если возможно) и в соответствии с рекомендациями изготовителя (перед осмотром пыль должна быть удалена с помощью сжатого воздуха). В случае обнаружения повреждения необходимо осмотреть его на наличие микрорастрескиваний и



волосяных трещин. Это важно, поскольку повреждение может распространяться на большую глубину, чем первичный слой поверхности композита.

Если повреждение распространяется глубоко внутрь поверхности композита, то существует большая вероятность попадания воды или масла, что может потребовать капитального ремонта детали.

Вода может стать причиной расслоения композита вследствие проникновения между верхним слоем композита и сотовыми конструкциями и замерзанием во время полета.

Вода может быть не только причиной расслоения или повреждения сотовых конструкций, а также может быть причиной сильной коррозии окружающих дюралюминиевых конструкций.

Одним из признаков наличия воды или масла могут служить темные пятна на поверхности композиционных деталей, изготовленных на основе стекло- и органоволокон.

Для определения наличия воды или масла, абсорбированного внутри композитной детали, могут быть использованы различные методы:

- визуальный осмотр,
- ультразвуковая диагностика,
- рентген-диагностика.

Ультразвуковая и рентген-диагностика в основном используются для диагностики композитных деталей, выполненных на основе угольного волокна. Такие композитные детали используются на капотах двигателей, на стабилизаторах, на обтекателях нижней части фюзеляжа.

После шлифования и обезжиривания поверхности на ней необходимо отметить неровности, трещины, царапины. Если поверхность имеет неровности, то в большинстве случаев, это говорит о проникновении воды или масла.

Технология ремонта при различных дефектах конструкции

Большинство дефектов лакокрасочной системы на композитных частях самолета – это трещины и микротрещины, отслоения, поры, игольчатые надколы, вздутия.

Источниками дефектов могут быть:

- некорректно выбранная система;
- большая толщина покрытия;
- низкий уровень подготовки поверхности (обезжиривание).
- пыль от шлифования грунтов; масло, не полностью удаленное с поверхности композита;
- превышенные пределы жизнеспособности применяемых материалов.

В работе рассмотрены дефекты покрытий и их устранение.

1. *Отслоение покрытий* – обследовали внутреннюю сторону капота двигателя. На участке поврежденной поверхности проведенная рентген-диагностика показывает, что причиной дефекта явилось проникновение *воды* в сотовые конструкции полимерного композита. Такой дефект, вызываемый водой, называется "*Osmoses (Осмоз)*", который приводит не только к повреждению покрытия, но и самого композитного изделия. В случае "*Osmoses*" вода, которая находится длительный период внутри композита, поглощается связующим, что приводит к конструктивному ослаблению композита.

Для устранения дефекта целесообразно применить следующую технологию ремонта (рис. 3):

- нанесенную лакокрасочную систему следует удалить;
- затем удалить верхний слой (обшивку) поврежденного участка композитной детали;
- участок конструкции с водой или маслом подвергнуть принудительной сушке для удаления воды или масла;
- подготовить (обезжирить поверхность, подсушить, нанести клей) и установить новые сотовые части конструкции в конструкцию для замены пораженных сотовых участков;

Гусева Р. И.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАКОКРАСОЧНЫХ СИСТЕМ ПРИ ПОКРАСКЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

- для обеспечения необходимой жесткости конструкции подготовить (обезжирить поверхность, подсушить, нанести клей) и установить дополнительную конструкционную жесткость между новым участком сотовой конструкции и существующим (не подверженным ремонту);
- подготовить (раскроить часть внешней обшивки, аналогичной снятой, обезжирить ее поверхность, подсушить, нанести высокопрочный клей) и установить на новые сотовые части конструкции;
- провести отверждение ремонтируемой части конструкции методом вакуумного или вакуум-автоклавного формования. Использование вакуумного оборудования необходимо для достижения безвоздушной среды в конструкции, удаления пузырьков воздуха и летучих веществ из клея для получения более плотной структуры композиции;
- нанести по типовой технологии новое покрытие на поверхность.

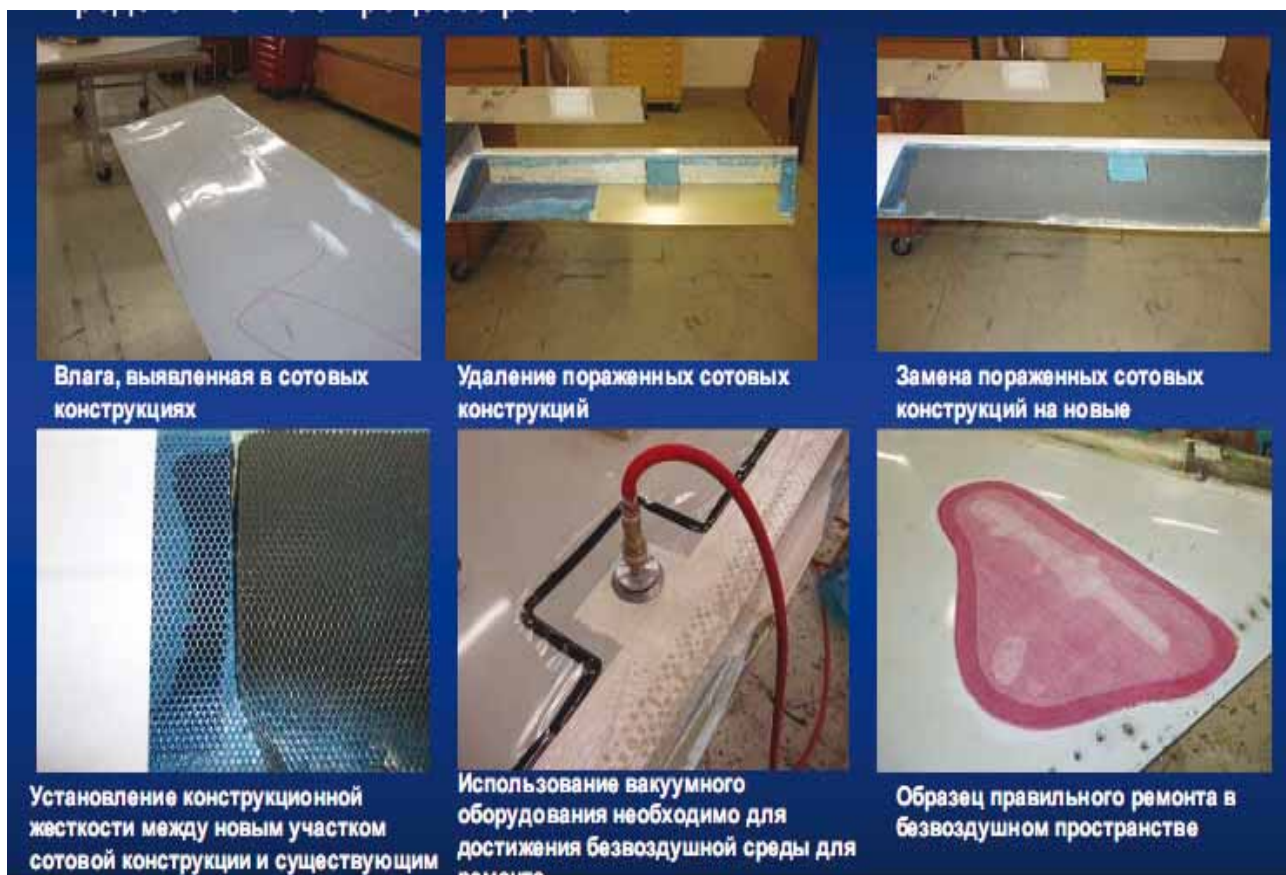


Рис. 3. Последовательность ремонтных операций устранения дефектов покрытия при наличии влаги в сотовых конструкциях

2. Часто причинами *микротрещин, растрескиваний и отслоений* в поверхностном слое конструкции являются низкий уровень подготовки поверхности, проникновение воды или масла на поверхность при излишней влаге в помещении, превышенная толщина лакокрасочной системы.

3. *Вздутия и отслоения* в основном происходят по причине превышения пределов жизнеспособности материалов и некорректно выбранных составляющих лакокрасочной системы.

4. Причинами возникновения *пор и игольчатых надколов* являются:

- неправильное нанесение грунтов-выравнивателей;
- плохая очистка после шлифования (удаление шлифовальной пыли);



- нанесение слишком толстых слоев покрытия;
- шлифование всей толщины лакокрасочной системы до поверхности композита, что может привести в последующем к образованию пор.

5. *Царапины* от шлифования, видимые после высыхания эмали, возникают в случае неправильного выбора градации абразива (слишком грубый).

Важно определить последовательность применения градаций абразивов для каждой лакокрасочной системы. При этом необходимо помнить, что последующий абразив не должен превышать предыдущий больше чем на 100 единиц. Например, начиная шлифовать с градации абразива 180, далее необходимо перейти на абразив 320 только при условии, что перешлифуете поверхность абразивом P280. Также возможно, что покрытие не было полностью высохшим на момент шлифования. Возможно также, что давление воздуха, подаваемое к шлифовальной машинке, было достаточно велико.

Кроме того, совершенно неправильная позиция, если шлифование производится вручную. Но если оно проводится, то необходимо держать пальцы вместе, когда плоскость руки пересекает обрабатываемую поверхность поперек направлению ваших пальцев. Периодически надо изменять направление шлифования.

6. Достаточно часто проявляется эффект "*захватывание воды*", когда вода накапливается в самом композите или под лакокрасочной системой, что является причиной *вздутий, растрескиваний и отслоений* лакокрасочной системы.

Результатом этого является замерзание воды при полете воздушного судна на большой высоте. При замерзании вода изменяет свой объем в сторону расширения. Итогом этого процесса является растрескивание или вздутие.

7. Возможно появление *воздушного пузыря* внутри композитной детали, между армирующим волокном и связующим. Вода накапливается за счет поглощения влаги или воды связующим. Влагопоглощение связующего ведет к возрастанию давления в композите, что приводит к вздутию и отслоениям. Для уменьшения влагопоглощения связующего в него добавляют специальные добавки.

Для устранения воздушного пузыря используют порозаполнитель Pinhole Conditioner filler 28C1, который наносят на новую поверхность, либо с удаленным покрытием. При этом необходимо всегда контролировать наличие технических паспортов на продукты "Product Technical Data Sheet" (TDS).

Технология ремонта следующая:

- необходимо тщательно очистить поверхность с помощью растворителя без остаточных присадок;
- зашлифовать поверхность без "задигов" абразивом P220 и выше;
- обдуть сжатым воздухом поверхность;
- протереть липкими салфетками и просушить всю поверхность;
- затем нанести порозаполнитель методом втирания, используя чистые салфетки.

Втирать порозаполнитель следует круговыми движениями;

- подождать, пока поверхность не побелеет.
- Затем удалить остатки чистой салфеткой и через 2 ч нанести грунт или грунт-выравниватель.

8. При *неглубоких вмятинах* и *царапинах* применяют продукт: шпатлевку Polyester Filler Polystop или Poly kit и грунты-выравниватели Primer Surfacer 10P30-8 / 464-3-1 / 467-9.

Рекомендации по нанесению:

Отвердитель должен быть добавлен в корректной пропорции 1:10 или 1: 9. Если необходимо, то может быть использован диспенсер для контроля количества добавляемого отвердителя. Для смешивания шпатлевки и отвердителя могут быть использованы шпатели. Применение шпателей поможет избежать насыщения воздухом шпатлевки, поскольку шпатлевка является высоковязким продуктом. Не рекомендуется перемешивать шпатлевку круго-

Гусева Р. И.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАКОКРАСОЧНЫХ СИСТЕМ ПРИ ПОКРАСКЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

выми движениями как до, так и после смешения во избежание насыщения воздухом. Во вновь смешиваемую смесь нельзя допустить попадания засохших частиц шпатлевки, так же как и на выравниваемую поверхность.

Грунты-выравниватели Primer Surfacer 10P30-8 / 464-3-1 / 467-9 рекомендуется наносить в один – три перекрестных слоя, которые будут достаточны для заполнения неровностей на поверхности.

Сушка должна соответствовать рекомендациям, указанным в TDS. После высыхания поверхности ее шлифуют более мелким абразивом. Затем необходимо очистить, обезжирить поверхность и нанести либо промежуточный грунт, либо финишное покрытие.

Нанесение грунтов-выравнивателей Primer Surfacer 10P30-8 / 464-3-1 / 467-9 для заполнения неровностей возможно с помощью распыляющей форсунки диаметром минимум 2,2 мм (или 6,18 мм при безвоздушном распылении). Для достижения наивысшего результата желательно нанести промежуточный грунт перед нанесением финишного покрытия.

Замечания:

- старое покрытие должно быть удалено до поверхности композитной детали с последующим обезжириванием, как указано на предыдущем примере;

- заполнение трещины необходимо производить ремонтным составом для композитов в соответствии с рекомендациями, разработанными авиастроительными компаниями. По рекомендациям авиафирмы Boeing (EY-3804/BMS 8-301H type 2) важное значение имеет ремонтный состав для композитов, который будет заполнять трещины и предотвращать проникновение воды, а также предотвращать более серьезные повреждения, являющиеся производными от этих микротрещин;

- просушивание поверхности и последующее шлифование следует вести абразивом градацией P180 – P220. Процесс шлифования должен быть проведен достаточно осторожно, что снизит риск прошлифовывания композитной детали;

- удалять пыль от шлифования необходимо сжатым воздухом и липкой салфеткой task-rag;

- затем следует нанести порозаполнитель Apply pinhole filler C28/1, затем грунт или грунт-выравниватель, токопроводящий грунт и эмаль, следуя рекомендациям, указанным в технических паспортах на эти покрытия;

- различные эмали могут быть нанесены на грунт или на токопроводящее покрытие в соответствии с рекомендациями TDS и гарантией совместимости продуктов нанесения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусева, Р. И. Технологии изготовления изделий из полимерных композитов в самолетостроении : учеб. пособие / Р. И. Гусева. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО "КНАГТУ", 2008. – 127 с.
2. Лакокрасочные системы. Презентация. Akzo Nobel Aerospace Coatings Training Center, 2006. – 48 с.

Муратова Т. А.
T.A. Muratova

МЕТОД АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

ACOUSTIC EMISSION METHOD AND ITS APPLICATIONS



Муратова Татьяна Александровна – кандидат технических наук, доцент Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: mtatianaa@yahoo.com.

Ms. Tatiana A. Muratova – PhD in Engineering, Associate Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University

Аннотация. Обобщена существующая информация по использованию метода акустической эмиссии. Рассмотрено использование метода для исследовательских целей, в промышленности как неразрушающего метода контроля, для контроля промышленных конструкций.

Summary. The paper reviews and generalized available information on the applications of the acoustic emission method. We consider the application of this method to research purposes, in industry as a non-destructive testing method, and for control of industrial designs.

Ключевые слова: акустическая эмиссия.

Keywords: acoustic emission

УДК 311:620.22

Метод акустической эмиссии (АЭ), основанный на регистрации и обработке волн напряжений, возникающих в результате формирования, изменения и разрушения структур различных материалов, известен, начиная с основополагающих работ Кайзера в 50-х годах прошлого века. В настоящее время метод АЭ широко используется для исследовательских целей, интенсивно внедряется в промышленность как неразрушающий метод контроля, применяется для контроля промышленных конструкций. В данной статье предпринята попытка обобщить существующую информацию по использованию метода АЭ.

Среди предприятий, занимающихся акустико-эмиссионными исследованиями, можно выделить два – это ЗАО «Специальные диагностические системы» и ООО «ИНТЕРЮНИС».

ЗАО «Специальные диагностические системы» («СДС») было основано в 1992 г. при содействии Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН [14]. Своим важнейшим направлением деятельности предприятие ЗАО «СДС» выделяет разработку и производство акустико-эмиссионных систем неразрушающего контроля. АЭ системы серии СДС1008 позволяют в реальном времени проводить спектральный анализ сигналов акустической эмиссии при параллельной многоканальной регистрации, с определением энергетических характеристик сигналов АЭ в нескольких частотных диапазонах. Это является важным для идентификации источников АЭ и, соответственно, идентификации развивающихся дефектов структуры металла на различных стадиях разрушения. Специалисты предприятия активно занимаются исследовательской деятельностью, изучая, в частности, влияние исходной структуры металла на параметры акустической эмиссии; акустическую эмиссию при зарож-

дении и росте трещины; АЭ при усталости; исследуя характеристики АЭ при статическом и циклическом деформировании.

ООО «ИНТЕРЮНИС» было образовано на базе НИЦПВ Госстандарта СССР в 1988 г. как компания-разработчик приборов неразрушающего контроля и средств автоматизации промышленных объектов на предприятиях топливно-энергетического комплекса [13]. В число основных направлений деятельности компании входит:

- создание и внедрение систем комплексного диагностического мониторинга опасных производственных объектов;
- разработка и производство акустико-эмиссионного оборудования;
- проведение научно-прикладных исследований в области неразрушающего контроля.

Компания «ИНТЕРЮНИС» разработала свой стандарт предприятия по планированию и организации проведения мониторинга технического состояния объектов, основанный на оценке рисков и экономической эффективности [12]. На основе этого документа компанией была разработана система комплексного диагностического мониторинга Лель/A-Line 32D DDM/M. Данная система позволяет собирать, обрабатывать данные и выдавать рекомендации по дальнейшей эксплуатации объекта на основании приходящей информации от датчиков АЭ и других типов датчиков. В статьях [1 – 4; 6; 7; 11] представлен опыт практического применения метода АЭ для диагностики различных промышленных конструкций специалистами ООО «ИНТЕРЮНИС».

Авторы [1 – 3; 11] рассматривают особенности практического применения метода АЭ для диагностики трубопроводных систем. Ими указывается, что среди интегральных способов диагностики трубопроводов метод АЭ практически не имеет альтернативы.

В статье [11] дается обоснование возможности проведения АЭ-контроля при текущих эксплуатационных параметрах магистральных трубопроводов, т. е. без принудительного изменения давления. Это позволяет существенно повысить качество и оптимизировать для заказчика процедуру технической диагностики подземных трубопроводов. Авторами приводятся примеры использования такой схемы на подземных участках магистрального нефтепровода без потери эффективности контроля.

Авторы [2], исходя из статистики проведенных в течение нескольких лет АЭ обследований газопроводов после результатов радиографического контроля (РК), указывают, что 35 % недопустимых по радиографии дефектов не являются развивающимися и не представляют реальной опасности для эксплуатации объекта. Кроме того, ими было выявлено дополнительно 25 % развивающихся источников АЭ, соответствующих опасным производственным дефектам в местах, не обнаруженных по РК. Проведенная работа позволила авторам сделать заключение, что комплексный подход к диагностированию трубопроводов с применением метода АЭ позволяет:

- производить обнаружение опасных производственных и эксплуатационных дефектов на ранней стадии их зарождения и предупреждать их развитие до критической величины;
- определять степень опасности выявленных дефектов;
- проводить 100%-й контроль диагностируемого участка, включая недоступные, скрытые области контроля;
- проводить оценку остаточного ресурса трубопровода на основе информации о существующих эксплуатационных дефектах и повреждениях.

В статье [1] отмечается, что сложность применения метода АЭ заключается в том, что на сегодняшний день недостаточно нормативной документации, регламентирующей подобный контроль. Специалистами компании «ИНТЕРЮНИС» был проведен ряд экспериментов по изучению свойств распространения упругих волн на реальных газопроводах с использованием акустико-эмиссионной системы Лель /A-Line 32D, на основании которых были установлены граничные условия проведения АЭ контроля технологических газопроводов, повышающие вероятность обнаружения дефектов и точность определения их местоположения.



Авторы [3] рассматривают практические аспекты применения численных методов анализа сигналов акустической эмиссии для выявления дефектов технологических газопроводов.

В статьях [6; 7] представлен опыт технического диагностирования промышленных подъемных механизмов, проведенного с применением акустико-эмиссионного метода контроля. Полученные результаты позволили авторам сделать следующие выводы:

1. Использование метода АЭ целесообразно и необходимо для достоверной оценки технического состояния объекта.

2. Метод АЭ обеспечивает 100%-й контроль всей металлоконструкции за один цикл измерений, а также позволяет оценивать состояние болтовых соединений.

3. Применение метода АЭ позволяет регистрировать места как развивающихся дефектов, так и потенциальных дефектов еще на стадии их зарождения, что дает возможность оценить накопленные повреждения металлоконструкций в результате длительной эксплуатации и гарантирует достоверное выявление дефектов.

В статье [4] рассмотрены возможности применения акустико-эмиссионного метода контроля для выявления развивающихся дефектов в объекте и оценке степени их опасности для работоспособности объекта в зависимости от уровня действующей нагрузки.

Акустико-эмиссионными исследованиями занимаются во многих высших учебных заведениях нашей страны и география исследований обширна – начиная от центральных вузов России и заканчивая вузами на периферии. Стоит особенно отметить следующие вузы: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Рязанский военный автомобильный институт, Алтайский государственный университет, Худжанский государственный университет им. Б. Гафурова, Тольяттинский государственный университет, наконец, наш Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет.

Авторы [9] на примере стали марки 20 сравнили параметры сигналов АЭ при разрушающем (растяжение) и неразрушающем (индентирование) методах контроля состояния материала, а также сигналов АЭ, полученных в изделиях, изготовленных из стали одной марки, произведенной по разным технологиям. Ими было выявлено, что схема испытания не оказывает существенного влияния на спектральный состав сигналов АЭ, а число зарегистрированных сигналов АЭ коррелирует с твердостью материала.

В статье [5] отмечается, что из всех существующих методов и средств неразрушающего контроля для выявления коррозионных поражений, трещин и других дефектов деталей и нарушений герметичности узлов военной автомобильной техники (ВАТ) предпочтительным является метод АЭ. Используя в качестве оценочного параметра амплитуду сигнала АЭ, авторы [5] предлагают методику прогнозирования остаточного ресурса ВАТ с использованием акустико-эмиссионных средств технического диагностирования. Предлагаемая методика позволяет: сократить количество операций по разборке, регулировке и наладке ВАТ; сократить объем и трудоемкость работ по техническому обслуживанию; выявлять признаки неисправности заблаговременно до ее появления и прогнозировать гарантированнуюработку до отказа.

Авторы [8] считают целесообразным использовать для количественного анализа взаимодействия и развития микротрещин статистические закономерности. Основной целью своей работы они ставили изучение с привлечением метода АЭ поведения потенциально опасных дефектов (микротрещин) в реальных конструкциях. Ими были исследованы как лабораторные образцы, так и реально эксплуатировавшиеся конструкции – фрагменты трубопроводов. В результате исследования было установлено, что по среднеквадратичному отклонению амплитуды сигналов АЭ можно надежно прогнозировать момент перехода накопления повреждений к катастрофическому разрушению.

Целью авторов работы [10] являлось исследование АЭ в циклах термоупругих мартенситных превращений при фиксировании деформации. Ими было установлено, что про-

цессы генерирования и релаксации реактивных напряжений в цикле мартенситных превращений сопровождаются аномально высокоамплитудной акустической эмиссией.

В нашем университете за период с 1997 по 2007 гг. было защищено девять исследовательских работ в области применения АЭ. В настоящее время акустико-эмиссионными исследованиями у нас продолжают заниматься только на кафедре «Материаловедение и технология новых материалов».

В заключение следует отметить, что метод АЭ позволяет получать огромные массивы информации, оперативно и с минимальными затратами регулировать и продлевать эксплуатационный цикл ответственных промышленных объектов, помогает в прогнозировании вероятности возникновения аварийных разрушений и катастроф. Широкие возможности метод АЭ предоставляет и при исследовании различных свойств материалов, веществ, конструкций. На сегодняшний день без применения акустического контроля и мониторинга уже невозможны создание и надежная эксплуатация многих ответственных технических объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков, А. В. Практическая оценка метода акустической эмиссии на технологических газопроводах / А. В. Жуков, А. Н. Кузьмин // ТехНАДЗОР. – 2008. – № 9.
2. Жуков, А. В. Контроль трубопроводов с применением метода акустической эмиссии / А. В. Жуков, А. Н. Кузьмин, Н. Ф. Стюхин // В Мире НК. – 2009. – № 1.
3. Жуков, А. В. Практическая оценка метода акустической эмиссии на технологических газопроводах / А. В. Жуков, А. Н. Кузьмин // В Мире НК. – 2008. – № 3.
4. Журавлев, Д. Б. Акустико-эмиссионный контроль на объектах металлургии / Д. Б. Журавлев, А. В. Жуков, А. Н. Кузьмин // ТехНАДЗОР. – 2007. – № 12.
5. Ильчук, И. А. Экспериментальное исследование акустико-эмиссионного метода при диагностировании военной автомобильной техники / И. А. Ильчук, В. В. Колесов, С. Н. Васин, А. С. Третьяков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – № 3.
6. Кузьмин, А. Акустико-эмиссионная дефектоскопия / А. Кузьмин, А. Жуков, Д. Журавлев, С. Филиппов // РСП Эксперт. – 09.2009.
7. Кузьмин, А. Н. Акустико-эмиссионная дефектоскопия грузоподъемных механизмов / А. Н. Кузьмин, С. Ю. Филиппов // В Мире НК. – 2008. – № 2.
8. Куксенко, В. С. Акустико-эмиссионный метод регистрации трещинообразования в реальных конструкциях / В. С. Куксенко, К. Е. Нагинаев, В. Н. Савельев, М. З. Рустамова // Деформация и разрушение материалов. – 2009. – № 9.
9. Мерсон, Д. Л. Применение спектрального анализа сигналов акустической эмиссии для оценки состояния стали 20 / Д. Л. Мерсон, Е. В. Черняева, Д. Е. Мещеряков // Деформация и разрушение материалов. – 2009. – № 1.
10. Плотников, В. А. Аномальный акустический эффект в сплаве TiNiCu при термоупругих мартенситных превращениях в условиях действия реактивных напряжений / В. А. Плотников, А. С. Грязнов // Деформация и разрушение материалов. – 2009. – № 5.
11. Харебов, В. Г. Совершенствование методики диагностики трубопроводов с применением метода акустической эмиссии / В. Г. Харебов, А. Н. Кузьмин, А. В. Жуков // В Мире НК. – 2009. – № 4.
12. Харебов, В. Г. О некоторых проблемах в области НК и пути их решения / В. Г. Харебов // В Мире НК. – 2008. – № 3.
13. <http://www.interunis.ru/> Сайт ООО «ИНТЕРЮНИС».
14. <http://www.sds.ru/> Сайт ЗАО «Специальные диагностические системы».

Степанова И. П., Смирнов А. О.
I.P. Stepanova, A.O. Smirnov

АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО И ГРУППОВОГО РИСКА ТРАВМАТИЗМА С ЦЕЛЬЮ АДРЕСНОГО ПРЕВЕНТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

INDIVIDUAL/GROUP TRAUMA RISK FORCASTING ALGORRYTHM FOR THE PURPOSE OF MANAGING TARGETED PREVENTION MEASURES



Степанова Ирина Павловна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Безопасность жизнедеятельности» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

E-mail Prof.Stepanova@mail.ru

Ms.Irina P. Stepanova – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Health and Safety Studies (DHSS) at the State Komsomolsk-on-Amur Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail Prof.Stepanova@mail.ru

Смирнов Александр Олегович – дипломник кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail alexandro793@mail.ru

Mr.Alexandre O. Smirnov – diploma student at the Department of Health and Safety Studies (DHSS) at the State Komsomolsk-on-Amur Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail alexandro793@mail.ru

Аннотация. Предложен алгоритм прогнозирования индивидуального риска травматизма и выделения групп персонала, для которых требуется разработка комплекса дополнительных профилактических мероприятий.

Summary. The paper proposes an algorithm to forecast individual trauma risks and manage the allocation of groups of personnel for whom additional preventive measures are required.

Ключевые слова: риск, травма, прогноз, эффективность, управление.

Key-words: risk, trauma, forecast, efficiency, management.

УДК 331.46

Управление риском травматизма в таких сложных системах, как предприятие и отрасль, невозможно без прогнозирования. Характерной особенностью таких систем (в [1] они определены как биосоциотехнические (БСТС)) является их быстрое изменение и развитие. Закономерности их развития и проявления различных видов риска из-за влияния большого количества факторов часто носят случайный (стохастический) характер. Управленческие решения по снижению уровня рисков приходится принимать в условиях высокого уровня неопределенности.

Неопределенность является следствием вероятностного характера изучаемых явлений. Повысить эффективность принимаемых решений можно с помощью подходов, позволяющих учитывать неопределенность.

Уровень неопределенности можно снизить за счет умелого использования суждений специалистов и способности человека принимать рациональные решения в условиях невозможности их полной формализации. Действительно, при решении задач управления риском неблагоприятных событий в БСТС полная математическая формализация невозможна.

В таких ситуациях широко используются экспертные методы, под которыми понимают «комплекс логических и математико-статистических методов и процедур, направленных

Степанова И. П., Смирнов А. О.

АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО И ГРУППОВОГО РИСКА ТРАВМАТИЗМА С ЦЕЛЬЮ АДРЕСНОГО ПРЕВЕНТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

на получение от специалистов информации, необходимой для выбора наилучшей из альтернатив при выработке управленческого решения» [2]. Особенно эффективны такие приемы при решении задач прогнозирования риска травматизма.

Правда и сам эксперт – источник неопределенности, но такую неопределенность можно компенсировать применением формализованных процедур сбора и обработки данных, методов теории вероятности и математической статистики.

Идея настоящей работы заключается в том, что можно прогнозировать индивидуальный риск травматизма для каждого работника как сумму известных из ретроспективного анализа рисков травматизма групп, к которым принадлежит человек.

Индивидуальный риск n -й персоны определяется по выражению

$$R_n = \sum(R_i \alpha_i),$$

где R_n – прогнозируемый индивидуальный риск n -й персоны; R_i – уровень риска по группе i (например, профессия, стаж, возраст, пол), соответствующий принадлежности к данной группе n -й персоны по набору признаков; α_i – вес риска по i -й группе признака (прогностический коэффициент), например, профессия, стаж, возраст, пол, тогда R_n можно представить в виде:

$$R_n = R_{\text{Проф}} \alpha_{\text{Проф}} + R_{\text{Стаж}} \alpha_{\text{Стаж}} + R_{\text{Возр}} \alpha_{\text{Возр}} + R_{\text{Пол}} \alpha_{\text{Пол}}. \quad (1)$$

Рассчитываемой величиной на стадии ретроспективного анализа является общий риск травматизма R и риск травматизма R_i по группе i , определяемые на основе сбора и анализа статистических данных:

$$R = n / N ; \quad R_i = n_i / N_i,$$

или в расчете на 1000 работников

$$R^* = 1000 n / N ; \quad R_i^* = 1000 n_i / N_i,$$

где R – общий риск травматизма за исследуемый период на объекте ретроспективного анализа; R^* – общий риск травматизма на 1000 работников; R_i^* – риск травматизма по группе i на 1000 работников; n – общее число случаев травматизма за исследуемый период на объекте ретроспективного анализа; N – численность персонала на объекте ретроспективного анализа; R_i – уровень риска по группе i (например, профессия, стаж, возраст, пол); n_i – число случаев травматизма за исследуемый период на объекте ретроспективного анализа в группе i ; N_i – численность группы персонала по i -му признаку; $N = \sum N_i$; $n = \sum n_i$.

Исследование ведется в пределах каждого года отдельно. Затем данные за 5 – 10 лет усредняются. Окончательный, усредненный за длительный период исследования результат даст наиболее приемлемый вариант ретроспективной оценки.

Вес риска α_i может быть определен либо с помощью модифицированного вероятностного метода Байеса [2-3] (метода нормированных интенсивных показателей), либо с помощью метода экспертных оценок [6].

Согласно *методу Байеса*, следует ввести следующие весовые коэффициенты и нормирующие показатели:

- *нормирующий показатель* (средненоголетний уровень риска)

$$\text{НП} = R_{\text{Срмн}} = (\sum n_j / N_j) / M,$$

где НП – нормирующий показатель; n_j – количество случаев травмирования в j -й год; N_j – среднесписочная численность работников в j -й год; M – число лет ретроспективного анализа;

- *весовые коэффициенты*

$$K_i = R_{\text{max } i} / R_{\text{min } i},$$

где $R_{\text{max } i}$ и $R_{\text{min } i}$ – это максимальный и минимальный уровень риска в кривой распределения риска по каждому признаку i : пол, возраст, стаж, профессия. Чем больше этот показате-



тель, тем больше значимость фактора. При отсутствии влияния фактора на уровень риска травматизма отношение равно или близко к единице.

Вес риска по i -й группе признака α_i определяется по выражению

$$\alpha_i = K_i / (\text{НП} \sum K_i).$$

Если в качестве групп выбраны профессия, стаж, возраст, пол, то выражения для расчета весовых коэффициентов примут вид:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{Проф}} &= K_{\text{Проф}} / (\text{НП} \sum K_i); & \alpha_{\text{Стаж}} &= K_{\text{Стаж}} / (\text{НП} \sum K_i); \\ \alpha_{\text{Возр}} &= K_{\text{Возр}} / (\text{НП} \sum K_i); & \alpha_{\text{Пол}} &= K_{\text{Пол}} / (\text{НП} \sum K_i); \\ \sum K_i &= K_{\text{Проф}} + K_{\text{Стаж}} + K_{\text{Возр}} + K_{\text{Пол}}. \end{aligned}$$

По методу экспертных оценок коэффициенты α_i определяются с помощью метода простого анкетирования. Этот метод предполагает одноразовый опрос экспертов с помощью анкет. В качестве экспертов могут выступать специалисты и руководители с большим стажем работ, имеющие достаточный опыт работы и хорошо знающие специфику деятельности исследуемого персонала и сам персонал.

Экспертам необходимо оценить вклад каждого фактора (профессия, стаж, возраст, пол) в уровень риска травматизма по 10-балльной шкале.

Затем по каждой группе признаков отдельно «мнения» (балльные оценки экспертов) усредняются. В качестве среднего используется медиана.

После определения средних оценок (медиан) определяют сумму средних значений:

$$S = \sum X_{i \text{ Ср}},$$

где S – сумма средних значений; I – признак группы (профессия, стаж, возраст, пол); $X_{i \text{ Ср}}$ – медиана (средняя оценка) по i -й группе признака (профессия, стаж, возраст, пол).

Относительная экспертная оценка рассчитывается по выражению:

$$\alpha_i = X_{i \text{ Ср}} / S = X_{i \text{ Ср}} / \sum X_{i \text{ Ср}}.$$

Результаты сводятся в таблицу 1.

Таблица 1

Экспертные оценки значимости вклада в суммарный уровень риска травматизма таких признаков, как пол, возраст, стаж, профессия

Признак	Экспертная оценка					Относительная экспертная оценка
	Эксперт 1	Эксперт 2	.....	Эксперт к	Медиана	
Профессия						
Пол	$X_{\text{Пол}1}$	$X_{\text{Пол}2}$	$X_{\text{Пол}i}$	$X_{\text{Пол}k}$	$X_{\text{Пол}Ср}$	$\alpha_i = X_{\text{Пол} \text{ Ср}} / S$
Возраст	$X_{\text{Возр}1}$	$X_{\text{Возр}2}$	$X_{\text{Возр}i}$	$X_{\text{Возр}k}$	$X_{\text{Возр}Ср}$	$\alpha_i = X_{\text{Возр} \text{ Ср}} / S$
Стаж	$X_{\text{Стаж}1}$	$X_{\text{Стаж}2}$	$X_{\text{Стаж}i}$	$X_{\text{Стаж}k}$	$X_{\text{Стаж}Ср}$	$\alpha_i = X_{\text{Стаж} \text{ Ср}} / S$
Профессия	$X_{\text{Проф}1}$	$X_{\text{Проф}2}$	$X_{\text{Проф}i}$	$X_{\text{Проф}k}$	$X_{\text{Проф}Ср}$	$\alpha_i = X_{\text{Проф} \text{ Ср}} / S$
Сумма средних значений					$S = \sum X_{i \text{ Ср}}$	
Сумма относительных экспертных оценок						1

Метод экспертных оценок позволяет закладывать интуитивные знания людей об очень сложном явлении, что на практике дает более приемлемые результаты, чем неоправданные попытки применить сложные математические методы в области исследования, где рассчитываемая величина – всего лишь ранг.

Ранжирование персонала по величине R_n позволит выявить группы с повышенным уровнем риска, а затем подобрать и адресно применить дополнительные профилактические меры, адекватные уровню угроз, для выявленных «слабых» групп.

Чем выше ранг системы (объединение, отрасль), для которой выполнен ретроспективный анализ, тем надежнее данные R_i для группы по признаку i и тем достовернее прогнозные оценки.

Степанова И. П., Смирнов А. О.

**АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО И ГРУППОВОГО РИСКА ТРАВМАТИЗМА
С ЦЕЛЬЮ АДРЕСНОГО ПРЕВЕНТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

С точки зрения точности прогноза, ранг системы, по которой ведется прогнозирование и следует принимать управляющие решения, значения не имеет; но с точки зрения эффективности денежных вложений в дополнительные профилактические мероприятия результат будет тем лучше, чем крупнее объект прогнозирования и принятия управленческих решений.

Объект ретроспективного анализа и объект прогнозных оценок должны принадлежать к одному классу профессионального риска, к одной отрасли производства.

Количество выделяемых признаков для формирования групп зависит от целей исследования и имеющихся в распоряжении исследователя данных.

Объектом исследования может быть предприятие, группа предприятий или отрасль. Временной интервал исследования, обеспечивающий приемлемую достоверность, 5 – 10 лет.

Важно понимать, что полученные в результате расчетов величины индивидуальных или групповых рисков являются лишь индексом (рангом) для выявления отдельных людей или их групп, находящихся в более рискованных условиях, чем другие в исследуемой выборке (подразделение, предприятие, отрасль), для формирования более адресных, а значит более эффективных мероприятий по предотвращению травматизма.

Предложенный алгоритм исследования апробирован студентами 5-го курса специальности «Безопасность жизнедеятельности в техносфере» при выполнении курсового проекта по дисциплине «Системный анализ и моделирование процессов в техносфере».

Статистика травматизма за десятилетний период собрана студенткой кафедры «Безопасность жизнедеятельности» ГОУВПО «КнАГТУ» Н.М. Судаковой в ходе дипломного проектирования на предприятиях Комсомольского филиала ОАО «РЖД». Комсомольский филиал ОАО «РЖД» – это довольно большое предприятие с численностью работающих около 12500 человек, обеспечивающее процесс перевозок по Дальневосточному региону от г. Хабаровска до г. Советская Гавань.

Для расчетов и построения графиков использовалась программа Microsoft Excel 2003.

Ретроспективный анализ. На рис. 1 представлена динамика травматизма и линия тренда за период с 1996 по 2005 гг. Максимальный риск травматизма отмечается в 1996 г. (1,26 случаев на 1000 работающих), после чего он падает до 2001 г., где достигает своего минимума (0,73 случаев на 1000 работающих), и начинает расти.

Если прогнозировать риск по линии тренда на следующие 5 лет (до 2010 г.), то можно ожидать, как видно из диаграммы, снижения травматизма после 2005 г. и в 2010 г. он может составить 0,87 случаев на 1000 работающих.

На рис. 2 показано сравнение динамики травматизма с его среднеотраслевыми и среднеотраслевыми уровнями в расчете на 1000 работающих.

Сравнение со среднеотраслевым уровнем позволяет судить о том, будут ли скидки или надбавки к страховым тарифам на обязательное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний (величина среднеотраслевого уровня является «учебной», т.е. не реальной и выдана преподавателем для учебных целей).

Среднеотраслевой уровень является наиболее вероятной ожидаемой в будущем величиной риска травматизма на данном предприятии.

Первоначально необходимо выявить *группы персонала* по исследуемому признаку (например, полу, стажу, возрасту и профессии), их численность и уровень травматизма в группе, а затем построить *кривые распределения персонала по уровню риска травматизма* по всем исследуемым признакам.

В табл. 2 показаны формы представления информации для построения распределения риска травматизма по полу на основе ретроспективного анализа.

Для каждого распределения нужно рассчитать так называемый средневзвешенный по персоналу риск для всех выделенных групп. Это контрольная проверка результата, так как средневзвешенный риск по любому распределению должен быть равен общему риску травматизма в этой системе (предприятие, группа предприятий, отрасль) за исследуемый год.

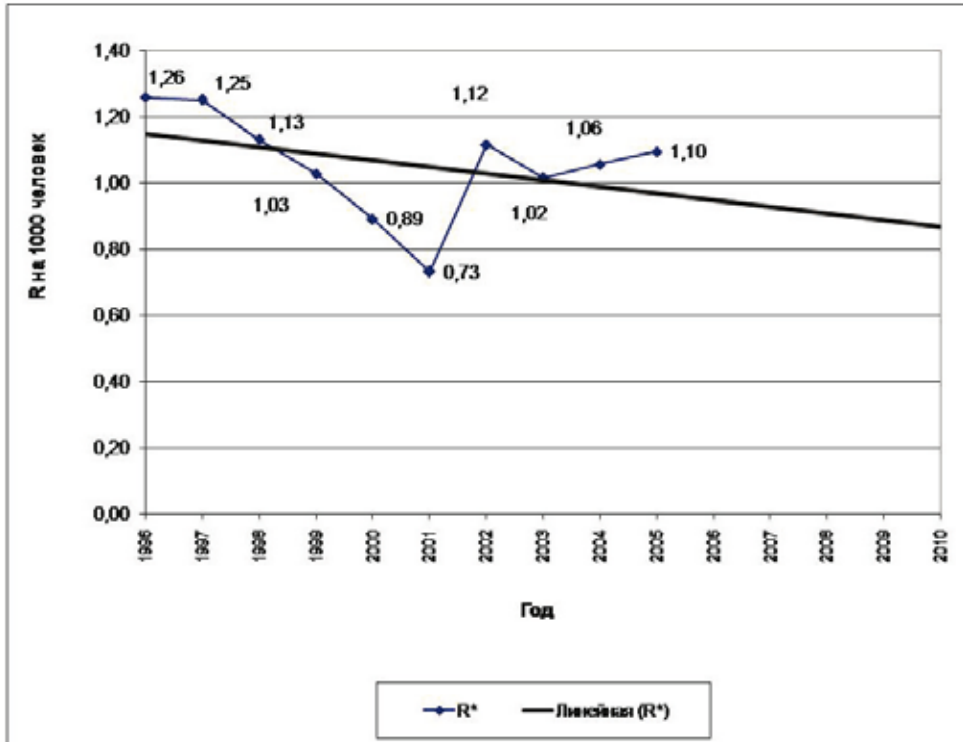


Рис. 1. Динамика общего травматизма и его прогноз до 2010 г. по линии тренда

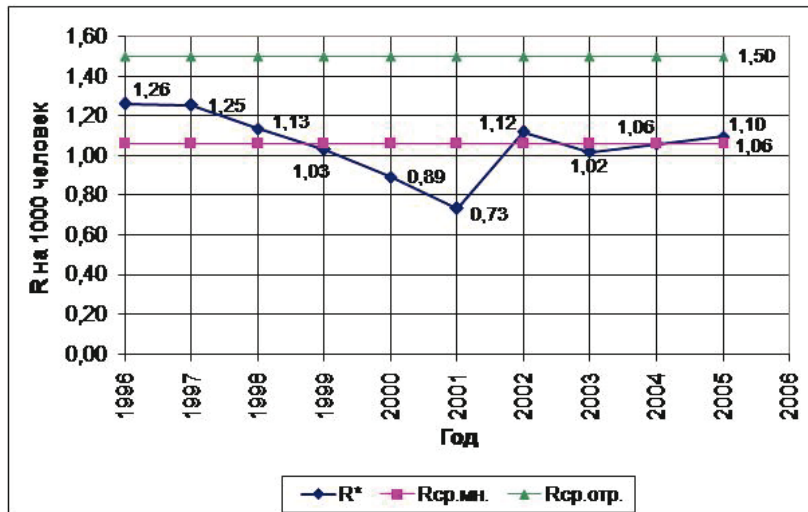


Рис. 2. Динамика общего травматизма за 10 лет и его среднегодулетний и среднеотраслевой уровни

Таблица 2

Распределение риска травматизма по половому признаку.
Пример расчета для предприятия «Х» на 1996 г.

Группы персонала по полу	n _i , случаев	N _i , чел.	N _i ОТН, о.е.	R _i	
				о.е.	На 1000 чел.
Мужской	15	9456	0,66	0,001580	1,586
Женский	4	4822	0,34	0,000829	0,829
Σ	19	14278	1,00		

$$R_{\text{СрВЗВ}} = \sum R_i * N_{i\text{ОТН}} = 1,586 * 0,66 + 0,829 * 0,34 = 1,0469 + 0,281 = 1,33$$

Средневзвешенный риск равен:

$$R_{\text{СрВзв}} = \sum R_i * N_{i\text{Отн}}$$

где R_i – риск в группе, сформированной по фиксированному признаку (пол, возраст и т.д.);

$N_{i\text{Отн}}$ – доля людей в группе по отношению ко всей численности персонала:

$N_{i\text{Отн}} = N_i / N_{\Sigma}$, о.е. Здесь N_i – количество людей в i -й группе по фиксированному признаку; N_{Σ} – среднесписочная численность всей исследуемой популяции (предприятия, отрасли) за исследуемый год.

Подобные расчеты необходимо повторить за все 10 лет по всем признакам, а затем найти среднегодовое распределение. Пример такого расчета по полу представлен в табл. 3. На этом стадия ретроспективного анализа заканчивается. Ее результатом являются показатели распределения персонала по уровню риска травматизма по различным признакам (пол, возраст, стаж, профессия), представленные на диаграммах 3 – 6, построенных по среднегодовым данным

Таблица 3

Результаты расчета среднегодового риска по полу

Год	$R_{\text{общ}}$	$R_{\text{м}}$	$R_{\text{ж}}$
1996	2,31	1,48	0,83
1997	2,43	1,30	1,13
1998	2,16	1,46	0,70
1999	1,83	1,65	0,17
2000	1,75	0,95	0,80
2001	1,17	1,17	0,00
2002	1,97	1,77	0,21
2003	1,82	1,62	0,20
2004	1,71	1,71	0,00
2005	1,79	1,79	0,00
Среднее	1,89	1,49	0,40

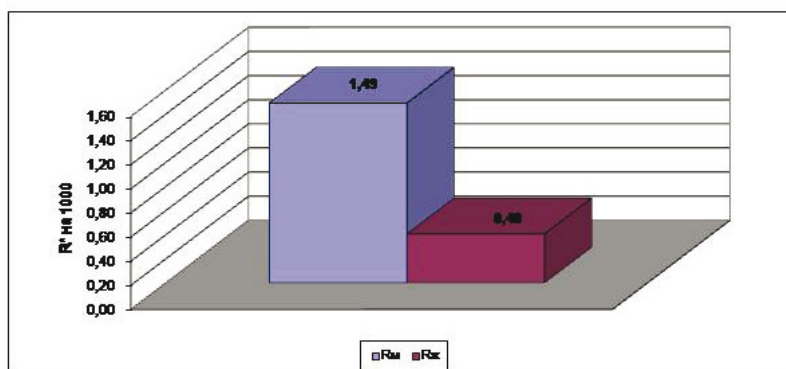


Рис. 3. Среднегодовое распределение риска травматизма по полу

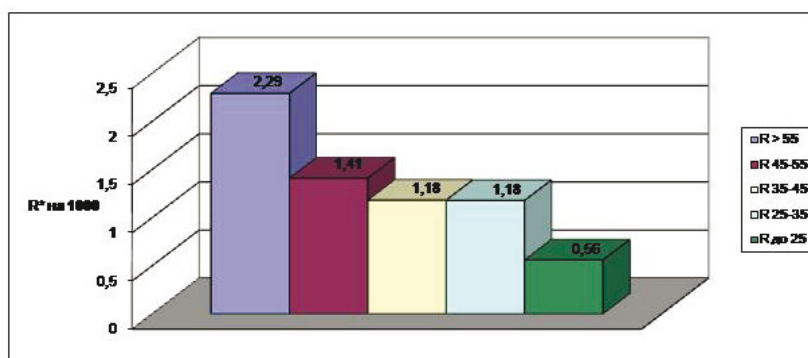


Рис. 4. Среднегодовой риск травматизма по стажу

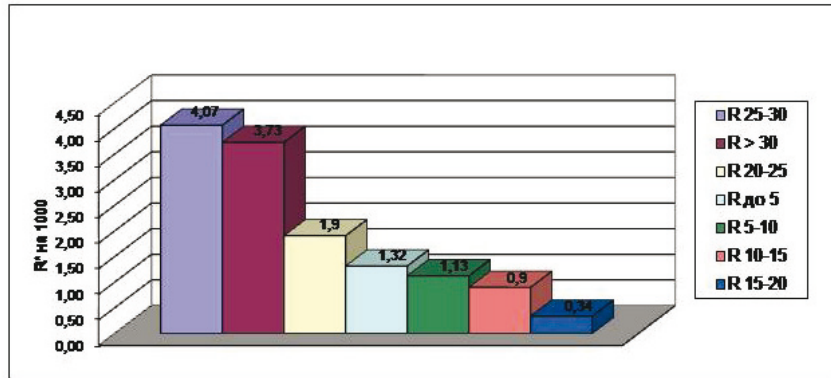


Рис. 5. Среднегодовой риск травматизма по возрасту

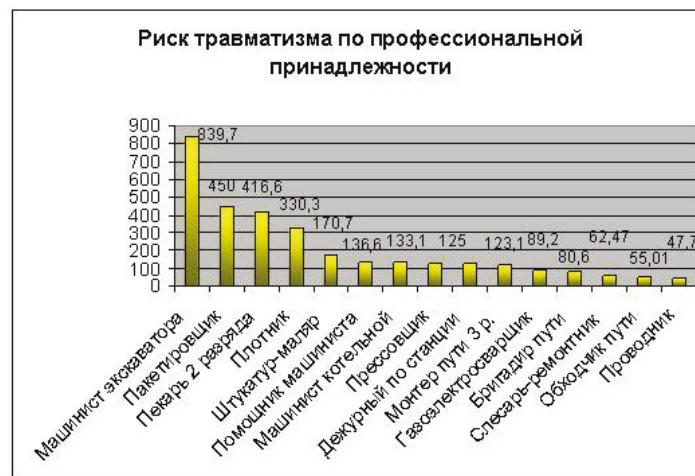


Рис. 6. Среднегодовые показатели уровня риска по профессии

Теперь есть возможность *прогнозировать индивидуальный (персонифицированный) риск* травматизма на последующие периоды для этого же предприятия или для любого другого предприятия или подразделения той же отрасли.

Для этого следует сформировать список персонала объекта прогнозирования с указанием их принадлежности к группам по полу, возрасту, стажу, профессии. Фрагмент такого списка показан в табл. 4. Затем необходимо определить индивидуальный риск по признакам на основе известных ретроспективных распределений (см. рис. 3 – 6) в форме, представленной в табл. 5.

Таблица 4

Формирование данных для прогнозирования индивидуального риска травматизма

	Должность	Стаж, лет	Возраст, лет	Пол
1. Иванов	Проводник	4	25	Муж.
i.	.....	....	....	.....
n. Петров	Плотник	20	40	Муж.

Таблица 5

Формирование данных для расчета прогнозируемого индивидуального риска травматизма

	$R_{\text{Проф}}$	$R_{\text{Стаж}}$	$R_{\text{Возр}}$	$R_{\text{Пол}}$
1. Иванов	48	1,40	1,65	1,49
i.	...	...	...	...
n. Петров	330	0,34	1,18	1,49

Степанова И. П., Смирнов А. О.

АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО И ГРУППОВОГО РИСКА ТРАВМАТИЗМА С ЦЕЛЬЮ АДРЕСНОГО ПРЕВЕНТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Затем необходимо рассчитать прогнозируемый индивидуальный риск по выражению (1).

Для получения прогнозных оценок был сформирован список персонала «виртуального» подразделения и произведен расчет индивидуального риска для всех работников этого подразделения и проведено ранжирование персонала по уровню риска. На рис. 7 и в табл. 6 дано сравнение результатов такого расчета для случаев определения индивидуального риска без учета весовых коэффициентов и с учетом весовых коэффициентов по методу Байеса и методу экспертных оценок.

Таблица 6

Сопоставление результатов расчета индивидуального риска без учета и с учетом прогностических коэффициентов

Ранг п/п	Идентификационный признак для «виртуального» подразделения	Без учета весовых коэффициентов	По методу Байеса	По методу экспертных оценок
1	Иванов	88,730	78,997	28,79
2	Петров	48,790	42,360	15,66
3	Сидоров	44,370	39,220	14,42
4	Степанов	37,030	31,100	11,77
5	Смирнов	19,350	16,070	6,21
6	Авакумов	17,300	11,770	5,22
7	Портнов	16,680	12,530	5,10
8	Мельников	12,760	8,840	3,81
9	Сироткин	12,714	8,400	3,75
10	Анискин	12,631	7,590	3,70
11	Сбруев	10,090	5,200	2,86
12	Шуркин	8,140	4,491	2,29
13	Матвеев	7,651	3,450	2,07
14	Мытник	7,251	4,490	2,18
15	Яблоков	4,690	0,011	1,02
16	Иевлев	2,714	0,010	0,68

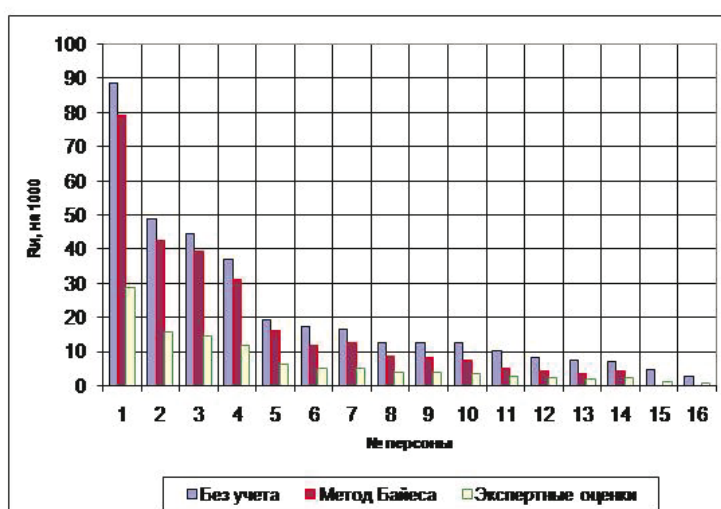


Рис. 7. Сопоставление результатов расчета индивидуального риска без учета и с учетом прогностических коэффициентов

В качестве идентификационного признака в таблице 6 указана фамилия (не будем забывать об учебном характере расчета). В реальной действительности там должна стоять фа-

миллиарда работника или его персонализированный код, кроме того должна быть известна принадлежность к структурному подразделению и фамилия руководителя. Это важно при последующем планировании комплекса профилактических мероприятий.

Расчеты показали, что весовые коэффициенты не только снизили значения индивидуального риска, но и поменяли ранги персонала.

На практике целесообразно работать не персонально, а с группами персонала с примерно равным уровнем риска. *Выделение групп персонала* с примерно равным уровнем риска по кривой распределения персонала является отдельной задачей.

Можно выделить две группы: выше и ниже среднемноголетнего уровня риска травматизма; выше или ниже среднеотраслевого. Можно выделить группы путем деления оси рисков на n равных частей: $n = 1 + 3,22 * \lg N$, где N – численная совокупность рассматриваемого персонала.

Можно такие группы выделить с помощью специальных математических методов [6]. Известны следующие математические методы выделения групп персонала с примерно равным уровнем риска по известной кривой распределения: кластерный анализ (метод одиночной связи (ближайшего соседа), метод полной связи (дальнего соседа), метод средней связи (в качестве меры расстояния выбирают квадрат евклидова расстояния), метод главных компонент, факторный анализ.

Выделим группы персонала с примерно равным уровнем риска с помощью метода одиночной связи. Вначале рассчитывается матрица расстояний между объектами. В качестве меры расстояния выберем значение индивидуального риска, рассчитанного по методу Байеса.

На каждом шаге в матрице расстояний ищется минимальное значение, соответствующее расстоянию между двумя наиболее близкими кластерами. Найденные кластеры объединяются, образуя новый кластер.

Изобразим процесс объединения кластеров в виде дендрограммы (рис. 8).

Процесс объединения был остановлен на данном этапе (рис. 8), так как расстояния между полученными 4 группами намного больше расстояний между всеми остальными кластерами.

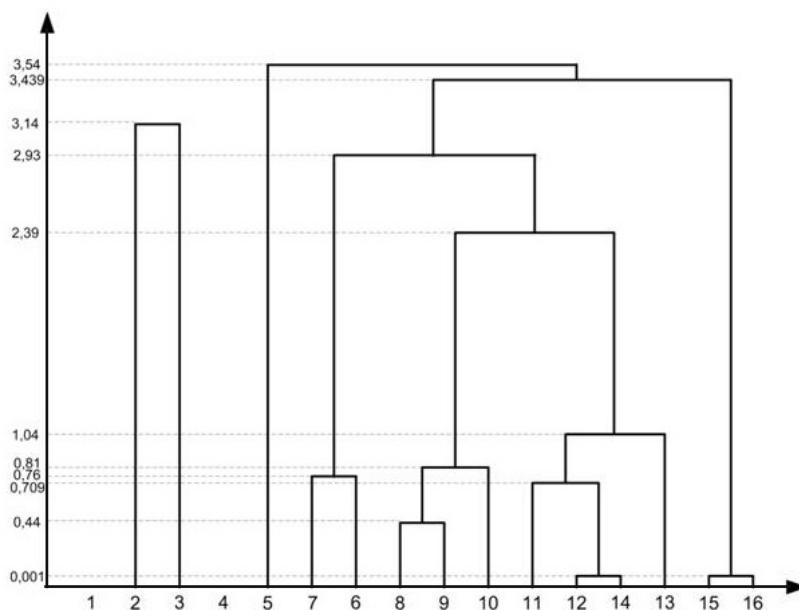


Рис. 8. Дендрограмма классификации методом ближайшего соседа

Как только группа с повышенным риском травматизма определена, можно приступать к разработке для нее специальной усиленной программы профилактики травматизма. Подобные

Степанова И. П., Смирнов А. О.

**АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО И ГРУППОВОГО РИСКА ТРАВМАТИЗМА
С ЦЕЛЬЮ АДРЕСНОГО ПРЕВЕНТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

адресные мероприятия всегда дадут более заметный результат, чем их применение ко всем сразу, кроме того позволят минимизировать затрачиваемые на подобные программы ресурсы.

По работе могут быть сделаны следующие выводы:

1. На предприятиях Комсомольского филиала ОАО «РЖД» прогнозируется снижение риска травматизма до 2010 г. до 0,87 случаев на 1000 человек.

2. Риск травматизма ниже среднеотраслевого, что позволяет рассчитывать на скидку к страховым тарифам на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний (учебный вывод).

3. Ранжированы по среднемноголетнему за 10-летний период риску травматизма (число случаев на 1000 работающих) следующие группы:

а) по профессии:

- машинист экскаватора – 83,93;
- водитель дрезины – 62,50;
- пакетиروщик – 45,00;

в) по возрасту:

- более 55 лет – 2,29;
- 45-55 лет – 1,41;
- 35-45 – 1,18;

б) по стажу:

- 25-30 лет – 4,07;
- более 30 лет – 3,73;
- 20-25 лет – 1,9;

г) по полу:

- мужчины – 1,49;
- женщины – 0,40.

4. Наибольший вклад в величину индивидуального риска вносят его составляющие по профессии, стажу и возрасту.

5. Персонифицированный риск травматизма для человека будет изменяться при переходе его из одной группы (по полу, стажу, возрасту, профессии) в другую.

6. Весовые коэффициенты не только снижают значения индивидуального риска, но и меняют ранги персонала. Поэтому, не учитывая прогностические коэффициенты, нельзя правильно выбрать приоритетные группы персонала для проведения мероприятий по снижению риска.

7. При расчете индивидуального риска методом экспертных оценок значение риска меньше, чем при расчете с применением метода Байеса. Это объясняется тем, что значимость риска по профессии при экспертной оценке в три раза меньше, чем при применении метода нормированных показателей.

8. Полученные в результате расчетов величины индивидуальных или групповых рисков являются лишь индексом (рангом) для выявления отдельных людей или их групп, находящихся в более рискованных условиях, чем другие в исследуемой выборке (подразделение, предприятие, отрасль), для формирования адресных, а значит более эффективных мероприятий по предотвращению травматизма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бешелев, С. Д. Математико-статистические методы экспертных оценок. – 2-е изд., перераб. и доп. / С. Д. Бешелев, Ф. Г. Гурвич. – М. : Статистика, 1980. – 263 с.
2. Воронова, В. В. Оценка риска возникновения опасных ситуаций на основе рассмотрения нарушений персоналом требований нормативно-технической документации / В. В. Воронова, И. П. Степанова // Новое в российской электроэнергетике. – 2006. – № 12. – С. 42-50.
3. Олдендерфер, М. С. Кластерный анализ / М. С. Олдендерфер, Р. К. Блешфилд. – М. : Финансы и статистика, 1985. – 200 с.
4. Степанова, И. П. Безопасность жизнедеятельности: проблемы и перспективы : моногр. / И. П. Степанова. – Владивосток : Изд-во Дальневост. ун-та, 1999. – 176 с.
5. Орлов, А. И. Теория принятия решений : учеб. пособие / А. И. Орлов. – М. : Издательство "Март", 2004. – 656 с.
6. Орлов, А. И. Экспертные оценки : учеб. пособие / А. И. Орлов. – М. : ИВСТЭ, 2002. – 31 с.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА CONSTRUCTIONS AND ARCHITECTURE

Федосенко В. Б., Григорьев Я. Ю., Григорьева А. Л.
V.B. Fedosenko, J. Yu. Grigoriev, A.L. Grigorieva

ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СТРОИТЕЛЬСТВА В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ХАБАРОВСКОГО КРАЯ

“WINTER TECHNOLOGY” IN CIVIL ENGINEERING: IMPROVING CONSTRUCTION KNOW-HOW IN THE KHABAROVSK REGION



Федосенко Валерий Борисович – академик Петровской академии наук и искусств, кандидат технических наук, профессор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

Mr. V.B. Fedosenko, Fellow of Peter’s Academy of Arts and Sciences, PhD in Engineering, Prof. (Komsomolsk-on-Amur State Technical University), Russia, Komsomolsk-on-Amur.



Григорьев Ян Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

E-mail: jan198282@mail.ru

Mr. J. Yu. Grigoriev, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor (Komsomolsk-on-Amur State Technical University), Russia, Komsomolsk-on-Amur. E-mail: jan198282@mail.ru



Григорьева Анна Леонидовна – кандидат физико-математических наук, доцент Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

E-mail: jan198282@mail.ru

Mr. A.L. Grigoriev, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor (Komsomolsk-on-Amur State Technical University), Russia, Komsomolsk-on-Amur. E-mail: jan198282@mail.ru

Аннотация. Понятие “зимние технологии” обязано своим существованием круглогодичному режиму строительства. Известно, что до революции строительство в России было сезонным и зимой не производилось. В статье предлагается математическая модель, учитывающая факторы, негативно влияющие на СМР при негативных климатических условиях.

Summary. The concept of “winter technology” owes its existence to year basis construction. It is known that before the revolution, construction in Russia was seasonal and winter was carried out. On paper we propose a mathematical model that takes into account the factors negatively affecting the Building operations in the negative climatic conditions.

Ключевые слова: климатическая область, уравнение регрессии, температурные факторы, ветровые характеристики.

Keywords: climatic region, the regression equation, the temperature factors, wind characteristics.

УДК 338.45:69(571.62)

После революции индустриализация страны потребовала интенсификации всего народного хозяйства страны, в том числе и строительства. Отсюда и появилась необходимость введения круглогодичного режима строительства.

Всесезонность строительства вызвала необходимость в разработке дополнительных мероприятий, необходимых для компенсации агрессивности климатических факторов с целью обеспечения требований, предъявляемых к технологическим процессам.

Сущность этих мероприятий заключается в привлечении дополнительных ресурсов (материальных, энергетических, трудовых и т.д.), которое неизбежно приведет к удорожанию строительства.

Выполнение СМР в зимних (экстремальных) климатических условиях сопровождается снижением уровня производительности труда, этот факт общеизвестен.

Современная практика учета агрессивности климатических факторов в зимнее время на нормативном уровне основана на разбиении территории страны на 8 климатических зон, для каждой из которых определен удельный вес зимнего периода в году в процентном отношении. Это приводит к значительным расхождениям в ряде пунктов каждой зоны, которые вызваны геоморфологическими характеристиками местности (формой рельефа, высотой над уровнем моря и т.д.).

Таким образом, сложившаяся практика не позволяет точно определить объемы дополнительных ресурсов, необходимых для производства работ в зимнее время, и размерность снижения уровня производительности труда.

На основании анализа сложившейся теории и практики учета агрессивности климатических факторов гипотетически полагаем, что для обеспечения объективности ценообразования, планирования и организационно-технологического проектирования необходимо решить следующие задачи:

- на основе ретроспективного анализа построить временные ряды прогнозируемых уровней производительности труда для каждой группы работ, объединяющих в своем составе технологические процессы, имеющие схожие свойства и ограничения при производстве в зимнее время в пределах специализации рассматриваемой организации на годовой период;
- осуществить подбор оптимальных вариантов выполнения всех технологических процессов среди множества возможных, основанных на критерии минимизации стоимости выполняемых работ;
- оптимизировать топологию календарной сети с целью передислокации работ в положение на календарной линейке и изменения интенсивности работ, соответствующей достижению минимальности затрат всего комплекса работ.

Постановка первой задачи основана на метеорологической изученности всей территории страны, которая различна. Критерием изученности служит глубина исторического периода метеорологических наблюдений, которая, по критериям Госкомгидромета, является изученной (полной), если она составляет [1]:

- температура воздуха – 30 – 50 лет;
- температура почвы – не менее 10 лет;
- максимальная глубина промерзания почвы – 25 – 30 лет;
- расчетная толщина стенки гололеда – 25 – 30 лет;
- расчетная ветровая нагрузка – не менее 20 лет.

Если отсутствует или не соответствует приведенным критериям хотя бы одно из условий, то регион считается недостаточно изученным.

Неизученным считается регион, в котором отсутствует репрезентативный пост, который находится на удалении, позволяющем осуществлять перенос ее данных на территорию стройплощадки.

В последнем случае, на основании [1], выполняется комплекс инженерно-гидрометеорологических изысканий, состав и содержание которых зависят от цели производства изысканий.

С позиций основных положений математической статистики, аппроксимация временных рядов правомочна при наличии четырех и более рядов.

Основная часть климатических факторов – температура, ветровые характеристики, влажность, атмосферное давление и т.п. – образуют непрерывно дифференцируемые временные ряды, образующие систему, называемую погодой.

Наряду с климатическими факторами, образующими непрерывные ряды, в природе имеют место атмосферные явления, например, гроза, дождь, снегопад, метель, поземка, изморозь и т. п. Закономерность возникновения таких явлений описывается кусочно-непрерывными функциями и носит сложный многофакторный характер.

Исследования непрерывных временных рядов температуры, силы ветра, влажности и других климатических факторов позволили установить линии трендов и аппроксимировать их полиномиальными выражениями с коэффициентом корреляции, близким к 1, в то время, как попытки аппроксимировать линии трендов линейной, показательной и степенной зависимостями оказались неправомочными [2].

Несмотря на сложность прогнозирования атмосферных явлений, необходимость прогноза актуальна, так как некоторые из атмосферных явлений, например осадки более 5 мм в сутки, приводят к полной остановке производства СМР под открытым небом.

Учет таких явлений возможен посредством стохастического анализа их частотности.

Безусловное решение этой проблемы возможно при наличии доброкачественного метеорологического прогноза.

Оптимальный выбор технологических процессов основан на исследовании чувствительности технологических процессов к агрессивности климатических факторов.

Выбор основан на определении границ между летней и зимней областями в n-мерном пространстве числовых полей климатических факторов, чувствительность к агрессивности которых для данных технологических процессов максимальна. Так же определяется граница, за пределами которой выполнение рассматриваемого технологического процесса невозможно.

В качестве критериев такого анализа необходимо использовать ограничения, приведенные в нормативных источниках (СНиПы, СН, СП и т.д.).

Если в нормативных источниках отсутствуют те или иные критерии, то они должны быть определены на основании экспериментальных или теоретических исследований.

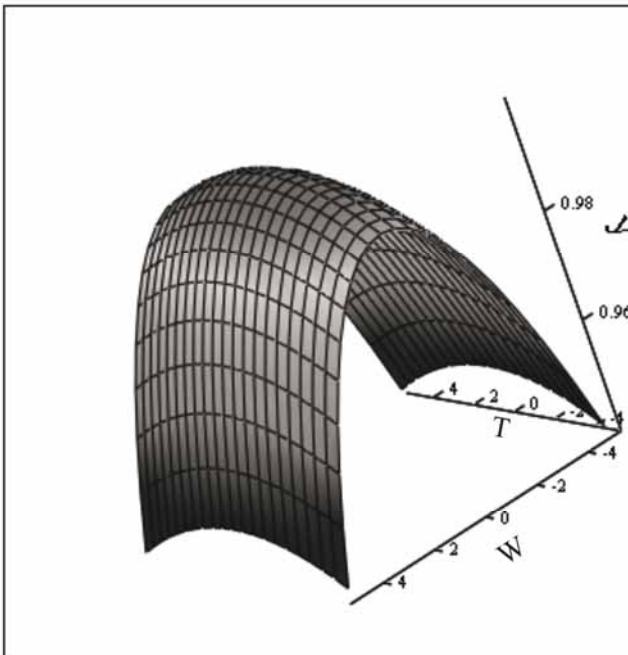


Рис. 1. Поверхность, описывающая зависимость коэффициента производительности СМР от климатических параметров (температуры и скорости ветра)

В настоящих исследованиях доказано, что в климатических условиях Хабаровского края наибольшую агрессивность к основным общестроительным технологическим процессам проявляют экстремальные значения отрицательных температур и скорости ветра [2].

На рис. 1 показана поверхность, описывающая регрессионную зависимость коэффициента производительности СМР (Y) от климатических параметров (T – температура, W – скорость ветра). Данная зависимость описывается уравнением вида

$$Y = 0,9988 - 0,0003T^2 - 0,002W^2. \quad (1)$$

Уравнение поверхности (1) указывает на области допустимой работы при определенных климатических условиях.

На рис. 2 выделены три области, первая из которых соответствует нормальным климатическим условиям, в которых технологический процесс выполняется без дополнительных мероприятий. Вторая область, градуированная по оттенкам серого, соответствует климатическим условиям, при которых необходимо выполнять дополнительные мероприятия, причем, объем и стоимость этих мероприятий увеличивается по мере продвижения к границе возможности выполнения технологического процесса (на рисунке – по мере затемнения раstra). За пределами этой границы выполнение рассматриваемого технологического процесса невозможно и запрещено на нормативном уровне.

В регрессионном анализе область, в которой выполнение технологического процесса происходит в обычном режиме, описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} W \geq 0, \\ 0,9988 - 0,0021 \cdot W^2 - 0,0003 \cdot T^2 - C \leq 0, \end{cases} \quad (2)$$

где C – критическое значение температуры, утвержденное стандартом.

Область, в которой выполнение технологического процесса требует разработки дополнительных мероприятий, описывается системой вида:

$$\begin{cases} W \geq 0, \\ 0,9988 - 0,0021 \cdot W^2 - 0,0003 \cdot T^2 - C \geq 0, \\ 0,9988 - 0,0021 \cdot W^2 - 0,0003 \cdot T^2 - C1 \geq 0, \end{cases} \quad (3)$$

где $C1$ – значение параметра T , при котором выполнение технологического процесса невозможно при любых дополнительных условиях.

Математическая модель, состоящая из уравнений (1), (2) и (3), описывает технологический процесс с учетом климатических областей, как требующих дополнительных мероприятий, так и происходящих в идеальных условиях.

Выполненный анализ технологий по данной методике обогащает технологию строительного производства и предъявляет дополнительные требования системного характера к содержанию нормативных источников, регламентирующих строительную технологию.

Постановка и решение задачи, требующей дополнительных мероприятий, основаны на минимизации стоимости строи-

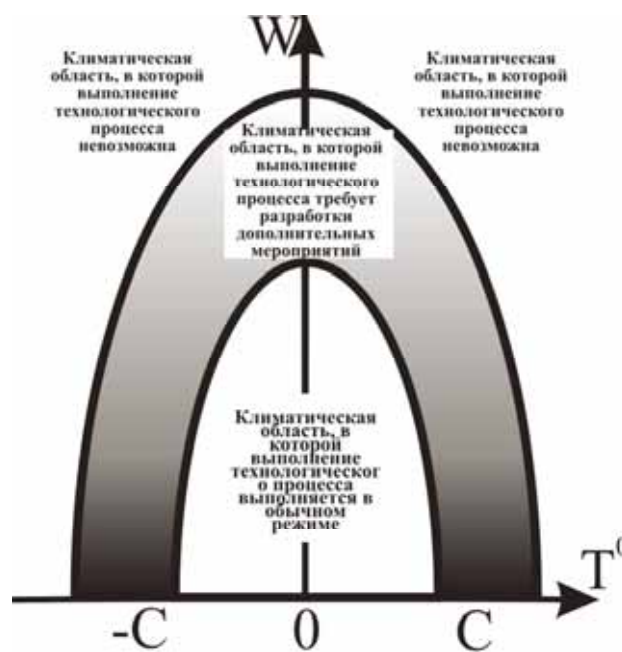


Рис. 2. Градация климатических областей



тельства путем изменения топологии календарной сети с одновременной оптимизацией продолжительности выполнения отдельных работ.

Решение этой задачи состоит из двух параллельных этапов.

Первый заключается в определении удорожания стоимости выполнения работ за счет возрастания агрессивности климатических факторов по мере передислокации работ с календарного промежутка времени с относительной низкой агрессивностью климатических факторов в период с более высокой. То есть на этом этапе определяется непосредственно “зимнее удорожание”, сущность которого можно сформулировать следующим образом – *зимнее удорожание выражается увеличением стоимости выполняемых работ в неблагоприятный (зимний) период и численно равно стоимости дополнительных мероприятий, необходимых для компенсации агрессивности климатических факторов в условиях данного строительства, и компенсации снижения уровня производительности труда путем увеличения фонда заработной платы.*

С позиций экономики зимнее удорожание и будет объективно установленной платой за производство СМР в экстремальных климатических условиях.

Снижение уровня производительности труда неизбежно при производстве СМР в экстремальных климатических условиях. Этот факт общеизвестен и объясняется физиологическими возможностями человека, которые снижаются в суровых климатических условиях, и как следствие – падает уровень производительности труда. Учет такого снижения и будет составляющей второго этапа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев, А. А. Индустриальные методы облицовки фасадов зданий при их утеплении / А. А. Афанасьев, Е. П. Матвеев, П. В. Монастырев // Промышленное и гражданское строительство – 1997. – № 6.
2. Федосенко? В. Б. Особенности ценообразования объектов недвижимости в строительном комплексе Дальнего Востока и Крайнего Севера / В. Б. Федосенко // Недвижимость: экономика, управление. – 2004. – № 7-8.
3. СП 11-103-97. Свод правил. Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства / Госстрой РФ. – Введ. в действие с 15 авг. 1997. – М., 1997.