

**П. А. КАЧАНОВ**, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»,  
**В. М. АДАШЕВСКИЙ**, канд. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»,  
**В. И. ГАЛИЦА**, инж. НИЧ НТУ «ХПИ»,  
**А. С. ГОРЛОВ**, канд. пед. наук, доц. НТУ «ХПИ»,

## **ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В МЕТАНИИ КОПЬЯ**

В статье проведен анализ биомеханических характеристик спортсмена – копьеметателя, которые в наибольшей степени влияют на результат, а также параметры действий, используемые в физико-математическом моделировании биомеханических систем в метании копья.

**Ключевые слова:** Биомеханика, диагностическая система, интерактивный тренажер, динамическая модель, кинематическая модель, симулятор.

**Актуальность темы:** Главной проблемой современных исследований в спорте являются биомеханические действия, которые способен реализовать спортсмен для повышения результативности [1]. Эта проблема может быть реализована только с помощью комплексных экспериментально-теоретических исследований, позволяющих определить, а затем выполнить действия с эффективными и рациональными биомеханическими параметрами за наименьшее время и с наименьшими физическими и материальными затратами.

Такое комплексное решение позволит кардинально улучшить существующие методы подготовки спортсменов, откорректировать двигательные действия в различных фазах и существенно повысить результативность [2].

Спортивный результат в метании копья - дальность полета - определяется в основном биомеханическими характеристиками, которые способен реализовать спортсмен, а именно: абсолютной начальной скоростью вылета, углом вылета, углом атаки, высотой выпуска копья [6,7].

Абсолютная скорость копья в момент вылета является основной биомеханической характеристикой при метании и оказывает наибольшее влияние на конечный результат попытки. Эта скорость должна быть сообщена рабочему звену тела (кисти), которая находится в контакте с копьем. Она является результирующей скоростью переносного движения тела при разбеге и относительного движения кисти.

Высота выпуска копья приближённо увеличивает или уменьшает дальность полёта снаряда соответственно на величину ее увеличения или уменьшения.

Угол вылета выбирается как наиболее рациональный в пределах 35- 39 градусов к горизонту с учётом угла атаки и силы сопротивления воздуха. Теоретически максимальный результат возможен, когда угол вылета равен

45°. Однако в силу антропометрических особенностей метателей обеспечить такой угол при других максимально эффективных параметрах вылета снаряда невозможно. Поэтому каждый атлет подчас интуитивно подбирает параметры своего финального движения вплоть до момента выпуска снаряда.

**Теоретические исследования.** Расчётная схема для определения параметров вылета копья (рис.1).

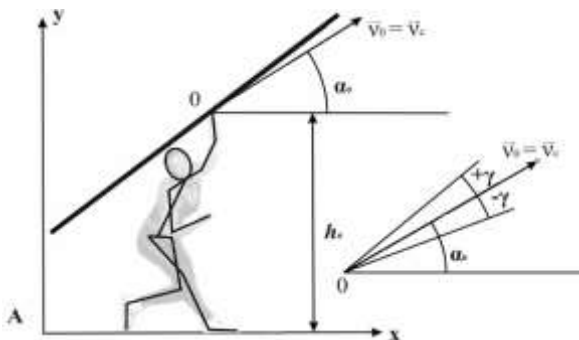


Рис. 1. – Расчетная схема для определения параметров вылета копья.

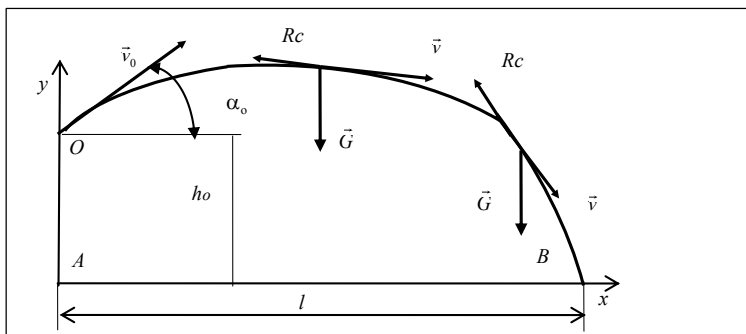


Рис.2. – Расчетная схема для определения дальности полёта от параметров вылета копья.

Здесь  $V_0 = V_c$  – абсолютная начальная скорость вылета копья (Рис.2)

$V_0$  - начальная скорость вылета центра масс,

$V_{0x}$  - проекция скорости вылета центра масс на ось  $Ox$ ,

$V_{0y}$  - проекция скорости вылета центра масс на ось  $Oy$ ,

В проекциях на оси декартовой абсолютной системы координат:

$$v_{Ox} = v_0 \cos \alpha; \quad v_{Oy} = v_0 \sin \alpha \quad (1)$$

Выражение абсолютной начальной скорости вылета

$$v_0 = \sqrt{v_{0x}^2 + v_{0y}^2} \quad (2)$$

$h_{c0}$  - высота центра масс копья в начальное время вылета,

$\alpha_0 = \alpha$  - угол вылета центра масс копья во время броска,

$G$  - сила тяжести,

$h_c$  - текущая высота центра масс копья,

$R_c$  - сила сопротивления воздушной среды,

$M_c$  - момент сил сопротивления воздушной среды,

где  $M_c = (F_c)a$ ,

Для решения поставленной задачи сила аэродинамического сопротивления  $R_c$  для тел, движущихся в воздушной среде плотностью  $\rho$ , равна

$$R_c = 0.5 \cdot c_r \cdot \rho S V^2 \quad (3); \quad R_c = k V^2 \quad (4).$$

$F_c$  – равнодействующая распределённых сил сопротивления воздушной среды  $F_c = f V_{ep}^2 = f \omega^2 (a/2)^2$  или

$$M_c = n \omega^2 = n \dot{\zeta} \quad (5)$$

При подсчёте этих сил безразмерные коэффициенты лобового сопротивления  $C_r$  определяют экспериментально в зависимости от формы тела и его ориентации в среде, которые можно получить из справочного материала динамики полёта тел [7].

Величина  $S$  (мидель) определяется значением проекции площади поперечного сечения тела на плоскость, перпендикулярную оси движения,  $V$  - абсолютная скорость тела. Известно, что плотность воздуха -  $\rho \approx 1.3 \text{ кг/м}^3$ . Копье будем рассматривать, как тело, которое в полете совершает плоскопараллельное движение. Угол поворота тела в сагиттальной плоскости соответственно изменяет величину  $S$ .

Так как копье в фазе полёта движется в одной из плоскостей - сагиттальной плоскости, составим уравнения динамики плоскопараллельного движения в проекциях на оси координат.

$$m \ddot{x}_c = P_x^e - R_c \cos \alpha; \quad m \ddot{y}_c = P_y^e - R_c \sin \alpha; \quad J_z \ddot{\zeta} = M_c \quad (6)$$

Здесь  $m$  – масса тела,  $\ddot{x}_c, \ddot{y}_c$  - соответствуют проекциям ускорения центра масс,  $P_x^e, P_y^e$  – проекции равнодействующей внешних сил, действующих на тело,  $J_z$  – момент инерции относительно центральной фронтальной оси,

$\ddot{\zeta}$  – соответствует угловому ускорению при повороте тела вокруг фронтальной оси,

$M_z^e$  - суммарный момент внешних сил сопротивления среды относительно фронтальной оси.

При движении в плоскостях  $Ay$ , систему уравнений можно записать так:

$$m \ddot{x} = -c_{cy} J_z \ddot{\alpha} \quad (8)$$

$$m \ddot{y} = -v^2 \sin \alpha; J_z \ddot{\alpha} = \dots \quad (9)$$

$$\cos \alpha = \frac{\dot{x}}{v}, \quad \sin \alpha = \frac{\dot{y}}{v}, \quad v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad (10)$$

$\alpha$  – угол между текущими проекциями скорости центра масс копья и вектором его скорости.

Решение этой задачи потребует в дальнейшем интегрирования дифференциальных уравнений полёта с учётом переменных во времени коэффициентов аэродинамического сопротивления полёта снаряда.

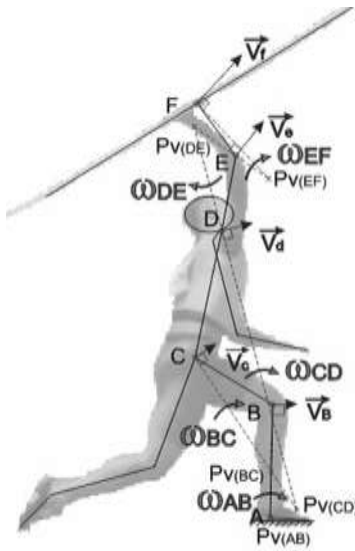


Рис.3–Кинематическая модель звеньев тела копьеметателя с мгновенными центрами скоростей.

Общепринято, что основой эффективной попытки копьеметателя является фаза выполнения броска при рациональном положении его тела.

Рассмотрим кинематическую модель звеньев тела копьеметателя финальной фазы разбега в момент выпуска копья(Рис.3). Скорость вылета копья определяется как сумма векторов скоростей звеньев тела атлета, участвующих

щих в процессе метания, а именно коленного, тазо-бедренного, плечевого, локтевого суставов и кисти в точке контакта с копьем.

Значение вектора скорости в коленном суставе относительно неподвижной точки опоры - пятки определяется в виде:

$$V_b = V_a + V_{ab} = V_a + \omega_{ab} \cdot AB \quad (11)$$

при  $V_a = 0$  - точка опоры неподвижна

$$\omega_{ab} = \frac{V_b}{AB} \quad (12)$$

где  $V_b$  - вектор скорости коленного сустава опорной ноги атлета,  $\omega_{ab}$  - угловая скорость вращения голени опорной ноги атлета относительно точки опоры,  $AB$  - расстояние от коленного сустава до точки опоры.

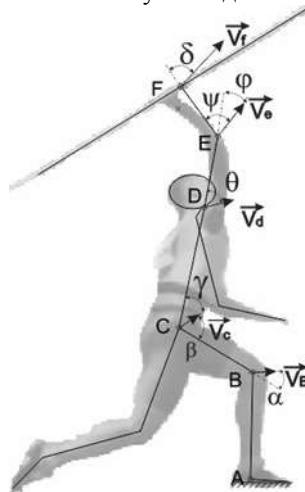


Рис.4— Кинематическая модель звеньев тела копьеметателя с проекциями скоростей.

Для последующих определений параметров движения звеньев и характерных точек тела атлета, участвующих в процессе метания, удобно использовать понятие мгновенного центра скоростей для каждого звена тела, а именно той точки, где в данный момент времени скорость равна нулю.

Так, угловая скорость вращения бедра относительно мгновенного центра скоростей точек:

$$\omega_{bc} = \frac{V_b}{P_{V(bc)}B} \quad (14)$$

где  $P_{V(BC)}$  мгновенный центр скоростей звена СВ.

$$V_c = \omega_{bc} \cdot P_{V(bc)}C \quad (15)$$

где  $P_{V(bc)}C$  - расстояние от точки С до мгновенного центра скоростей точек.

Аналогично определяются угловые скорости плеча и предплечья и скорости плечевого (точка D) и локтевого (точка E) суставов, а также скорость кисти (точкаF):

$$\omega_{cd} = \frac{V_c}{P_{V(cd)}C}, \quad (16)$$

$$V_d = \omega_{cd} \cdot P_{V(cd)}D, \quad (17)$$

$$\omega_{de} = \frac{V_d}{P_{V(de)}D}, \quad (18)$$

$$V_e = \omega_{de} \cdot P_{V(de)}E, \quad (19)$$

$$\omega_{ef} = \frac{V_e}{P_{V(ef)}E} \quad (20)$$

$$V_f = \omega_{ef} \cdot P_{V(ef)}F. \quad (21)$$

В результате натурального эксперимента получены направления векторов скоростей всех характерных точек, а для некоторых точек их значения. Поэтому становится возможным определить положения мгновенных центров скоростей для каждой звена, а, следовательно, угловые скорости звеньев и значения скоростей всех характерных точек.

Существует и другой метод вычисления скоростей характерных точек звеньев тела копьеметателя, удобный для анализа и определения рационального взаимного расположения звеньев его тела с использованием теоремы о проекциях скоростей двух точек звена на прямую их соединяющую (Рис.4):

$$V_b \cdot \cos\alpha = V_c \cdot \cos\beta, \quad (22)$$

$$V_c = \frac{V_b \cdot \cos\alpha}{\cos\beta} \quad (23)$$

где  $\alpha$  – угол между вектором скорости в т. В и звеном ВС,  $\beta$  - угол между вектором скорости в т. С и звеном ВС.

И так для каждого звена:

$$V_c \cdot \cos\gamma = V_d \cdot \cos\theta, \quad (24)$$

$$V_d = \frac{V_c \cdot \cos \gamma}{\cos \theta}, \quad (25)$$

$$V_b \cdot \cos \theta = V_e \cdot \cos \varphi, \quad (26)$$

$$V_e = \frac{V_d \cdot \cos \theta}{\cos \varphi}, \quad (27)$$

$$V_e \cdot \cos \psi = V_f \cdot \cos \delta, \quad (28)$$

$$V_f = \frac{V_e \cdot \cos \psi}{\cos \delta}, \quad (29)$$

где  $\delta$ ,  $\gamma$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$  и  $\psi$  соответствующие углы между звеньями CD, DE, EF и векторами скоростей крайних точек этих звеньев C, D, E, F.

Результирующая скорость кисти метателя вычисляется через скорость коленного сустава в виде:

$$V_f = V_b \frac{\cos \alpha \cdot \cos \gamma \cdot \cos \psi}{\cos \beta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \delta} \quad (30)$$

**Выводы.** Таким образом, используя аналитические выражения для определения дальности полета копья в зависимости от взаимосвязанных кинематических параметров звеньев тела метателя, скорости выпуска копья, угла и высоты выпуска, с помощью полученных математических моделей становится возможным определить, откорректировать биомеханические параметры, а соответственно улучшить спортивный результат с учетом конкретных физических данных и возможностей спортсменов.

**Список литературы:** 1. Аванесов В.У. Применение специального кистевого отягощения в процессе выполнения бросковой работы легкоатлетами-метателями / Аванесов В.У., Ефремова В.И. // Моделирование спортивной деятельности в искусственно созданной среде (стенды, тренажеры, имитаторы) : (материалы конф.). - М.: 1999. - С. 4-5. 2. Адашевский В.М. Теоретические основы механики биосистем: Учебное пособие/ В. М. Адашевский. - Харьков НТУ "ХПИ", 2001. - 258 с. 3. Александров А.В. Биомеханическая модель тела человека для описания многосуставных движений в трехмерном пространстве / А.В. Александров, А.А. Фролов // Биомеханика-2006 : 8 Всерос. конф. по биомеханике, Н. Новгород, 22-26 мая 2006 г. : тез. докл. / Рос. акад. наук [и др.]. - Н. Новгород, 2006. - С. 73. 4. Бернштейн Н.А. О построении движений. М.: Медгиз, 1947. - 254 с. 5. Захаровська Тетяна, Горбенко Василь. Факторна структура кінематичних показників техніки металевих списів на етапі початкової підготовки // Педагогіка, психологія та медико-біологічні проблеми фізичного виховання і спорту. - Харків, 2008. - №4, - С. 6. Козлова Н.И. Формирование двигательной структуры финального усилия в метании копья на этапе начальной спортивной подготовки: дис. ... канд. пед. наук: 13.00.04. / Н.И. Козлова. - Минск, 1994. - 172 с. 7. Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов. - ГНТИ Оборонгиз, Москва, 1962. - 34 с. 8. Попов Г.И., Ермолаев Б.В., Аракелов А.Л. Координационные перестройки в технике метания копья: модельные и экспериментальные оценки. - Теория и методика физической культуры, 1993. - №1. - С.7-10. 9. Совершенствование техники движения в метаниях с использованием технических средств и локальных отягощений / Попов Г.И., Ханнин И.В., Логинов А.А., Иванов А.Н. // Моделирование спортивной деятельности в искус-

ственно созданной среде (стенды, тренажеры, имитаторы) : (материалы конф.). - М.: 1999. - С. 85-87. **10.** Campos J., Brizuela G., Ramon V. Three-dimensional kinematic analysis of elite javelin throwers at the 1999 IAAF World Championships in Athletics <http://www.iaaf-rdc.ru/ru/docs/publication/64.html>. **11.** PrusikKa. [Methods of kinezometria in solving the problem of physical culture] Metodakinezometrii w rozwiązywaniuwybranychproblemówkulturyfizycznej. / Prusik. Ka.,Görner K. - In: *Súčasnosť a perspektivyτέlovýchovnéhoprocesunaškolách*. BanskáBystrica: PF UMB KTV, 2006 - S. 246 - 252.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Avanesov V.U. Primenenie special'nogo kistevogo otjagoshhenija v processe vypolnenija broskovoj raboty legkoatletami-metateljami / Avanesov V.U., Efreмова V.I. // Modelirovanie sportivnoj dejatel'nosti v iskusstvenno sozdannoj srede (stendy, trenazhery, imitatory) : (materialy konf.). - M.: 1999. - S. 4-5. **2.** Adashevskij V.M. Teoreticheskie osnovy mehaniki biosistem: Uchebnoe posobie/ V. M. Adashevskij. - Har'kov NTU "HPI", 2001. - 258 s. **3.** Aleksandrov A.V. Biomechanicheskaja model' tela cheloveka dlja opisanija mnogostavnyh dvizhenij v trehmernom prostanstve / A.V. Aleksandrov, A.A. Frolov // *Biomehanika-2006* : 8 Vseros. konf. po biomehanike, N. Novgorod, 22-26 maja 2006 g. : tez.dokl. / Ros.akad. nauk [i dr.]. - N. Novgorod, 2006. - S. 73. **4.** Bernshtejn N.A. O postroenii dvizhenij. M.: Medgiz, 1947. - 254 s. **5.** Zaharovs'kaTetjana, Gorbenko Vasil'. Faktorna struktura kinematichnihpokaznikovtehniki metal'nikivspisu na etapipochatkovoipidgotovki // *Pedagogika, psihologija ta mediko-biologichni problemifizichnogovihovannja i sportu*. - Harkiv, 2008. - №4, - S. **6.** Kozlova N.I. Formirovanie dvigatel'noj struktury final'nogo usilija v metanii kop'ja na jetape nachal'noj sportivnoj podgotovki: dis. ... kand. ped. nauk: 13.00.04. / N.I.Kozlova. - Minsk, 1994. - 172 s. **7.** Lebedev A.A., Chernobrovkin L.S. Dinamika poleta bespilotnyh letatel'nyh apparatov. - GNTI Oborongiz, Moskva, 1962. -34 s. **8.** Popov G.I., Ermolaev B.V., Arakelov A.L. Koordinacionnye perestrojki v tehnike metanija kop'ja: model'nye i jeksperimental'nye ocenki. - Teorija i metodika fizicheskoj kultury, 1993. - №1. - S.7-10. **9.** Sovershenst-vovanie tehniki dvizhenija v metanijah s ispol'zovaniem tehniceskikh sredstv i lokal'nyh otjagoshhenij / Popov G.I., Hanin I.V., Loginov A.A., Ivanov A.N. // Modelirovanie sportivnoj dejatel'nosti v iskusstvenno sozdannoj srede (stendy, trenazhery, imitatory) : (materialy konf.). - M.: 1999. - S. 85-87. **10.** Campos J., Brizuela G., Ramon V. Three-dimensional kinematic analysis of elite javelin throwers at the 1999 IAAF World Championships in Athletics <http://www.iaaf-rdc.ru/ru/docs/publication/64.html>. **11.** PrusikKa. [Methods of kinezometria in solving the problem of physical culture] Metodakinezometrii w rozwiązywaniuwybranychproblemówkulturyfizycznej. / Prusik. Ka.,Görner K. - In: *Súčasnosť a perspektivyτέlovýchovnéhoprocesunaškolách*. BanskáBystrica: PF UMB KTV, 2006 - S. 246 - 252.

*Поступила (received) 11.03.2014*



**В.А. КРЫЛОВА**, ст. преподаватель каф. АУТС, НТУ «ХПИ»

## **РЕАЛИЗАЦИЯ АДАПТИВНОГО УСТРОЙСТВА КОДИРОВАНИЯ/ДЕКОДИРОВАНИЯ НА ПЛИС**

Предлагается разработка устройства для адаптивного помехоустойчивого кодирования/декодирования для систем передачи информации с оценкой качества информационного состояния канала связи.

**Ключевые слова:** адаптивная система, канал передачи данных, ПЛИС-технологии, канал связи, статистика ошибок.

**Введение.** Современные системы управления сложными объектами имеют распределенную модульную архитектуру, в которой функции управления выполняются автономными блоками, связь между которыми осуществляется с помощью каналов обмена данными, реализующих стандартные протоколы. Разрабатываемая система кодирования/декодирования должна быть динамической, т.к. в процессе моделирования меняются параметры системы, а также должна быть обеспечена возможность отслеживания производительности системы в условиях реальной работы. Аппаратная реализация системы должна быть осуществлена с использованием технологии ПЛИС SoC (System on Chip) – система на кристалле, основным преимуществом которой является универсальность, а также высокая производительность обмена данными, но при этом возможность изменения параметров системы. Основные изменения выполняются в программе микроконтроллера.

**Цель статьи** – разработка устройства адаптивного кодирования/декодирования с переменными параметрами для систем связи, тем самым увеличивая выигрыш за счет кодирования и скорость передачи.

**Материалы исследований.** Общая схема адаптивного кодирования для систем передачи информации представлена на рисунке 1, где возможно раздельное применение информационной и обратной связи в контурах оперативного и адаптивного управления. Объект управления представлен в виде совокупности блоков: входного накопителя (Вх. НК), кодера (К), модулятора (М), переключателей каналов (ПК) и группы каналов связи (КС), а также демодулятора (ДМ), декодера (ДК), выходного накопителя (Вых. НК). Блок идентификации состояний обеспечивает оценивание параметров или структуры системы по совокупности сигналов  $X_1, X_2, X_3$ . Для определенного состояния блоком оперативного управления выбирается стратегия, в соответствии с которой перестраивается режим работы, структура и параметры - кодера, модулятора, переключателя каналов, а также декодера и