

УДК 654.937

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЙ КОПЬЕМАТЕЛЯ НА СПОРТИВНЫЙ РЕЗУЛЬТАТ

**В. И. ГАЛИЦА<sup>1\*</sup>, С. Е. ГАРДЕР<sup>1</sup>, П. А. КАЧАНОВ<sup>1</sup>, А. И. ЛЮБИЕВ<sup>1</sup>,  
И. Н. СКРИПНИЧЕНКО<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> НТУ «ХПИ», Харьков, УКРАИНА

<sup>2</sup> Тренер в метании копья, Днепрпетровск, УКРАИНА

\*email: vitaliy.galitsa@gmail.com

**АННОТАЦИЯ** У статті представлений статистичний аналіз біо-кінематичних характеристик рухів спортсмена - металника у фінальній фазі випуску списа, що впливають на кінцевий результат. Розглянуто взаємний вплив на результат спроби в метанні списа таких параметрів, як швидкість вильоту списа, висота і кут випуску, а також кут атаки спису щодо набігаючого потоку повітря. Дослідження проводились за результатами відеоаналізу виступів металників фіналістів Чемпіонату України 2012 року.

**Ключевые слова:** коефіцієнт детермінації, кореляція, біомеханічний фактор, домінуючий вплив, відеоаналіз.

**АННОТАЦИЯ** В статье представлен статистический анализ био-кинematicких характеристик движений спортсмена – копьеметателя в финальной фазе выпуска копья, влияющих на конечный результат. Рассмотрено взаимное влияние на результат попытки в метании копья таких параметров, как скорость вылета копья, высота и угол выпуска, а также угол атаки копья относительно набегающего потока воздуха. Исследования проводились по результатам видеоанализа выступлений копьеметателей финалистов Чемпионата Украины 2012 года.

**Ключевые слова:** коэффициент детерминации, корреляция, биомеханический фактор, доминирующее влияние, видеоанализ.

## STATISTICAL ANALYSIS DEGREE OF IMPACT KINEMATIC PARAMETERS MOVEMENTS ON SPORTS RESULT FOR JAVELIN THROWER

**V. GALITSA<sup>1\*</sup>, S.GARDER<sup>1</sup>, P. KACHANOV<sup>1</sup>, A. LUBIYEV<sup>1</sup>, N. SKRIPNICHENKO<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

<sup>2</sup> Coach in the javelin, Dnepropetrovsk, UKRAINE

**ABSTRACT** The article presents data kinematic studies in the javelin, which provide information about the parameters of javelin movements just before the output of sports spears in the final phase of the takeoff. The studies were conducted on the results of the video analysis of competitions between spear throwers, finalists of Ukrainian Championship 2012 in track and field. There is described impact the biomechanical characteristics on the athletic performance in the javelin. Namely, the absolute initial velocity of output, output angle, angle of attack, height of output of a spear. Presents objective of this study - to confirm that the dominant impact on the end result of an attempt is speed of output of the spears, as well as to determine the degree of mutual impact of factors such as departure angle, angle of attack relative to the oncoming airflow spear and height of output of spears an athlete. This article describes the results of a statistical analysis between results of competitions and kinematic parameters in the form of a matrix of pair correlation coefficients, the results of which selected biomechanical factor with a dominant impact on the final result of an attempt.

**Keywords:** coefficient of determination, correlation, biomechanical factors, the dominant impact, video analysis.

### Введение

Современные исследования в области биомеханики спорта в целом направлены на поиск закономерностей между кинематическими параметрами движений спортсмена, выполняющего попытку, и

конечным результатом этой попытки [1]. Подобные проблемы решаются только с помощью комплексных экспериментально-теоретических исследований, позволяющих определить, какой из двигательных факторов имеет наибольшее положительное влияние, а

также какое взаимное влияние они оказывают. Данные кинематических исследований в метании копья предоставляют информацию о параметрах движений копьеметателя непосредственно перед выпуском спортивного снаряда в финальной фазе разбега [1]. Спортивный результат в метании копья (дальность попытки) определяется в основном биомеханическими характеристиками, которые способен реализовать спортсмен, а именно: абсолютной начальной скоростью вылета, углом вылета, углом атаки, высотой выпуска копья [1, 4].

Абсолютную скорость копья в момент его выпуска принято считать основной биомеханической характеристикой при метании, которая оказывает наибольшее влияние на конечный результат попытки. 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 интуитивно подбирает параметры своего финального движения вплоть до момента выпуска снаряда [1, 4].

### Цель работы

Цель данного исследования – подтвердить факт доминирующего влияния скорости выпуска снаряда на конечный результат попытки, а также выявить степень взаимного влияния таких факторов, как скорость вылета, угол вылета, угол атаки копья относительно набегающего потока и высоты выпуска копья атлетом. Были проведены кинематические исследования биомеханических параметров вылета копья среди спортсменов – участников финала в метании копья во время проведения Чемпионата Украины 2012 по легкой атлетике по результатам видеосъемок со скоростью съемки 80 к/сек. Вычисления выполнялись с использованием программ векторной графики и метода пропорциональности посредством сравнения графических и физических размеров репера – в данном случае копья. С этой целью

использовалась электронная таблица Excell (Табл.1):

Таблица 1 – Вычисление реальных расстояний и коэффициента пересчета

Длина копья		Высота выпуска		Пролет копья					
Размер в чертеже, мм.	Реальный размер, мм.	Размер в чертеже, мм.	Реальный размер, мм.	Размер в чертеже, мм.	Реальный размер, мм.	Длит-ть межкадр. промежутков, мс.	Кол-во межкадр. промежутков, шт.	Скорость вылета, м/с.	Кэфф. пересчета.
88,9	2600	61,7	1804	38	1111	12,5	3	29,6	29,3

Данные кинематических вычислений заносились в 1, 3, 5, 7 и 8 ячейки.

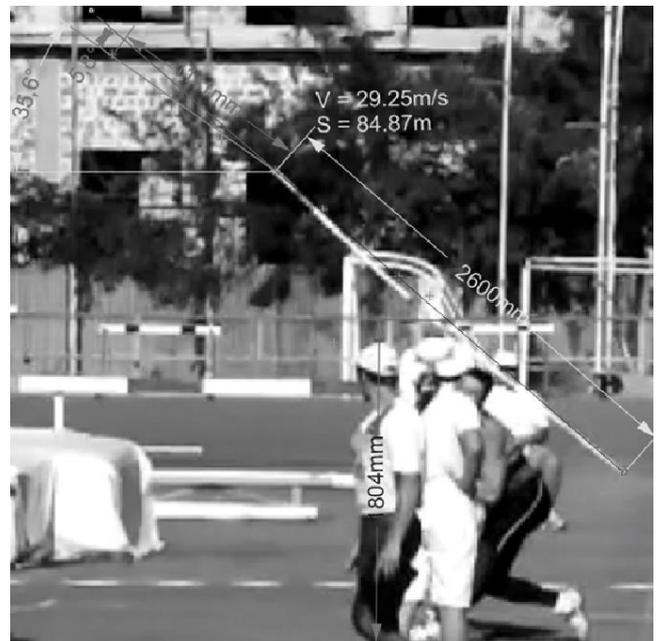


Рис. 1 - Пример представления кинематической информации о параметрах вылета копья

В 4 и 9 ячейках были получены высота выпуска и скорость вылета копья [4].

На рис.1 представлен пример представления кинематической информации в одной из попыток одного из атлетов – участников финала. Результаты протокола соревнований и полученные результаты кинематических вычислений заносились в таблицу как экспериментальные факторы [4].

Таблиця 2 – Экспериментальные факторы

Скорость $V$ (м/с) $x_1$	Угол вылета $\alpha_v$ (град) $x_2$	Угол атаки $\alpha_a$ (град) $x_3$	Высота выпуска $H$ (м) $x_4$	Дальность $S$ (м) $y$
29.2	31.5	7	1.88	83.03
28.58	36.2	3	1.79	82.91
29.36	33.1	7.2	1.83	79.67
29.29	35.3	5.6	1.84	84.58
29.25	35.6	5.8	1.8	84.87
25.9	39.6	1.7	2.11	68.4
25.76	40.3	6	1.97	70.61
25.23	41.4	1.2	2.06	68.96
25.61	36.1	5.4	2.06	62.25
26.64	40.7	13.6	2.02	69.05
27.81	33.5	14	1.94	68.29
26.36	35.1	5.8	1.9	70.61
26.54	37	7.4	2	68.45
26.64	35.2	6.9	1.91	68.67
27.25	35.2	7.1	1.86	74.88
27.42	37.6	6.9	1.84	75.05
26.64	35	8.2	1.95	69.79
26.55	33.4	3.5	1.97	71.1
27.97	36	6.9	1.95	78
28.5	34.1	5.4	1.99	77.63
27.34	35.5	7	2.01	75.45
24.4	39.5	0.6	1.84	73.16
23.68	38.5	8.1	1.99	55.75
24.41	37.8	9.8	2.06	59.95
23.76	39.9	7.6	2.09	56.5
24.7	42.3	6.8	2.24	57.99
23.98	37.2	12	2.11	56.97
25.98	40.3	7.2	2.15	61.52
27.83	35.3	1.3	1.83	81.87

На графиках, приведенных в рисунках 2–5 представлены зависимости результирующей переменной  $S$  (дальность полета копья) от определяющих факторов – начальной скорости вылета  $v$ , угла вылета  $\alpha_v$ , угла атаки  $\alpha_a$  и высоты выпуска  $H$ . Экспериментальные значения представлены точками.

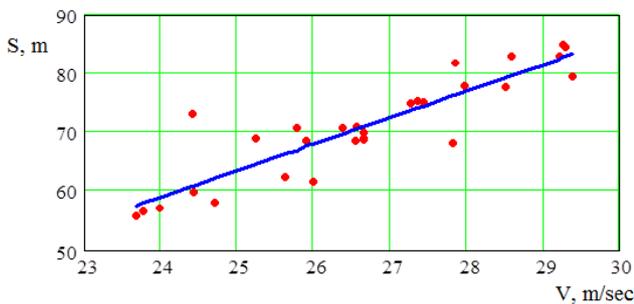


Рис. 2 - Зависимость дальности полета от скорости вылета  $S(v)$

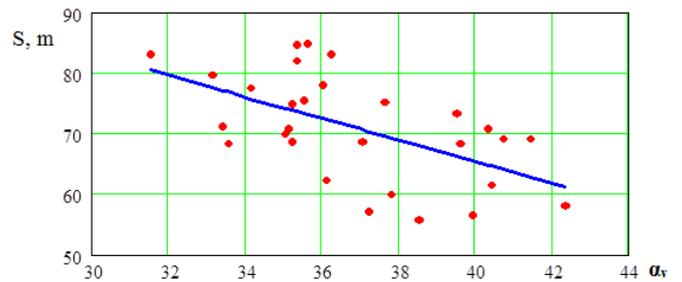


Рис. 3 - Зависимость дальности полета от угла вылета  $S(\alpha_v)$

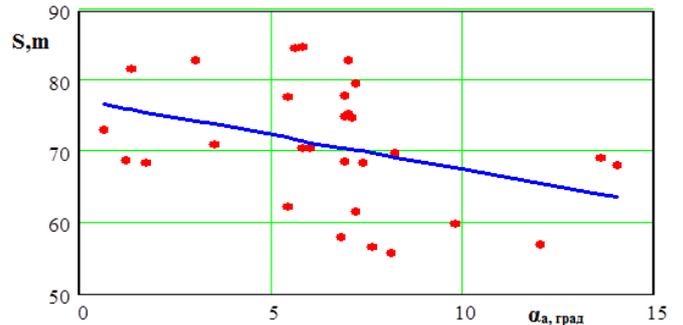


Рис. 4 - Зависимость дальности полета от угла атаки  $S(\alpha_a)$

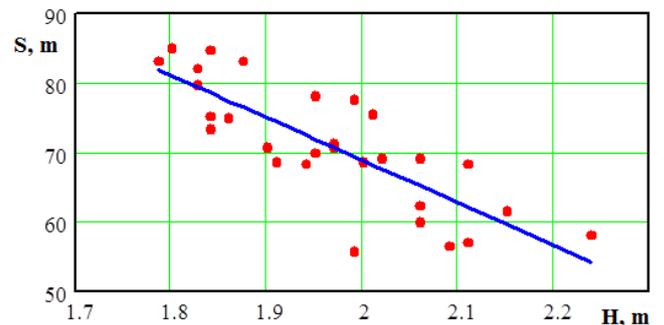


Рис. 5 - Зависимость дальности полета от высоты выпуска  $S(H)$

В первом приближении можно допустить, что парные зависимости результирующей переменной от каждого из факторов – линейные [2].

Степень линейной зависимости факторов характеризуется корреляционной матрицей переменных [2, 3].

На основании матрицы исходных данных – (в дальнейшем матрица  $X$  с элементами  $x_{ij}$  – таблица 3) размерности  $n=29$   $k=5$ , где  $x_{ij}$  – значение  $j$ -го показателя у  $i$ -го наблюдения ( $i = \overline{1, n}$ ;  $j = \overline{1, k}$ ) вычисляется матрица центриро-

ванных нормированных значений  $Z$  с элемен-

$$z_{ji} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j}$$

тами,

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i s_j = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \quad (1)$$

здесь  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k$  - средние значения показателей (столбцов), а также  $s_1, \dots, s_k$  - выборочные дисперсии столбцов. Результаты расчета парных коэффициентов корреляции представлены в Табл. 3.

Таблица 3 - Матрица парных коэффициентов корреляции R

	V	$\alpha_v$	$\alpha_a$	H	S
V	1	-0.684	-0.066	-0.67	0.897
$\alpha_v$	-0.684	1	-0.079	0.602	-0.564
$\alpha_a$	-0.066	-0.079	1	0.233	-0.364
H	-0.67	0.602	0.233	1	-0.806
S	0.897	-0.564	-0.364	-0.806	1

Наиболее близкая к линейной наблюдается зависимость между дальностью полета и скоростью вылета копья (0.897), углом вылета и высотой (0.602). Скорость вылета и высота, скорость вылета и угол вылета связаны зависимостями, близкими к обратно пропорциональной. В свою очередь, связи между скоростью и углом атаки, углом атаки и углом вылета практически отсутствуют.

Исходя из парных зависимостей рис.1 – рис. 4, математическую модель данных следует строить в классе линейных моделей множественной регрессии [2, 3].

В силу высокой корреляции между факторами (V-  $\alpha_v$ ), (V-H), (H-  $\alpha_v$ ), возможно явление мультиколлинеарности факторов. [2]

Тестирование мультиколлинеарности

Вычисляется наблюдаемое значение критерия  $\chi^2$

$$\chi_n^2 = - \left[ n-1 - \frac{1}{6}(2p+5) \right] \cdot \ln|R| \quad (3)$$

где  $n=29$ ;  $p=4$ .  $\ln|R|$  - логарифм определителя матрицы корреляций.

По таблице критических точек  $\chi^2$  определить  $\chi_{kr}^2(\alpha, \frac{1}{2}n(n-1))$ . Если  $\chi_n^2 > \chi_{kr}^2$ , то в массиве X может существовать мультиколлинеарность [2, 3]. Уровень значимости принят  $\alpha=0.05$ .

Результаты расчетов:

$$\chi_n^2 = 105.1 > \chi_{kr}^2(0.05, \frac{1}{2}29(29-1)) = 79.1.$$

Поскольку матрица экспериментальных данных оказалась мультиколлинеарна, то и регрессионная модель должна строиться с учетом этого явления. Для построения регрессионной модели с учетом мультиколлинеарности данных используется алгоритм, предполагающий последовательное наращивание в модели зависимых переменных таким образом, чтобы точность модели при этом возрастала [10, 60, 103]. Порядок построения модели следующий:

1. Строим парные регрессии  $y_j = \theta_0 + \theta_1 x_j^{(i)}$ , где  $i$ - номер столбца матрицы X. Для каждой парной регрессии вычисляем коэффициент детерминации:  $\hat{R}^2 = 1 - \frac{\hat{S}_\varepsilon^2}{S_y^2}$ , (4)

$$\text{где } S_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (5)$$

2. Отбираем ту переменную  $X^{(i)}$ , для которой он наибольший.

3. Строим уравнения регрессий для  $X^{(i)}$  и каждой оставшейся переменной:  $y_j = \theta_0 + \theta_1 x_j^{(i)} + \theta_2 x_j^{(k)}$ , где  $k = \overline{1, p}, k \neq j$  (6)

Для каждой регрессии вычисляем коэффициент детерминации. Отбираем ту переменную  $X^{(i)}$  для которой он наибольший. Если коэффициент детерминации продолжает расти, то процесс продолжается с новыми переменными. Если нет, то оставляем то количество переменных, которое достигнуто.

Результаты расчетов с разными переменными приведены в таблицах 4-6.

Таблица 4 - Регрессии с одной переменной

	Вид завис.	Числ. знач. коэффиц. регрессии	Коэф. детерм., дисперсия остатков	
Вид регрессии	$S_j = \theta_0 + \theta_1 v_j^{(i)}$	$\theta = -40.78$ $4.53$	$R^2=0.805$ $S_e^2 = 14.93$	Макс связь
	$S_j = \theta_0 + \theta_1 \alpha_v^{(i)}$	$\theta = 136.7$ $-1.78$	$R^2=0.318$ $S_e^2 = 52.093$	
	$S_j = \theta_0 + \theta_1 \alpha_a^{(i)}$	$\theta = 77.2$ $-0.97$	$R^2=0.133$ $S_e^2 = 66.242$	
	$S_j = \theta_0 + \theta_1 H_j^{(i)}$	$\theta = 190.6$ $-60.978$	$R^2=0.650$ $S_e^2 = 26.747$	

Таблица 5 - Регрессии с двумя переменными

	Вид зависимости	Коэф.-т детермин., дисперсия остатков	
Вид регрессии	$S_j = \theta_0 + \theta_1 v_j^{(i)} + \theta_2 \cdot \alpha_v^{(i)}$	$R^2=0.802$ $S_e^2 = 15.119$	
	$S_j = \theta_0 + \theta_1 v_j^{(i)} + \theta_2 \cdot \alpha_a^{(i)}$	<b><math>R^2=0.894</math></b> $S_e^2 = 8.099$	Макс. связь
	$S_j = \theta_0 + \theta_1 v_j^{(i)} + \theta_2 \cdot \dot{I}^{(i)}$	$R^2=0.877$ $S_e^2 = 9.429$	

Таблица 6. - Регрессии с тремя переменными

	Вид зависимости	Коэф.-т детермин., дисперсия остатков	
Вид регрессии	$S_j = \theta_0 + \theta_1 v_j^{(i)} + \theta_2 \cdot \alpha_a^{(i)} + \theta_3 \cdot \alpha_v^{(i)}$	$R^2=0.890$ $S_e^2 = 8.039$	
	$S_j = \theta_0 + \theta_1 v_j^{(i)} + \theta_2 \cdot \alpha_a^{(i)} + \theta_3 \cdot H_j^{(i)}$	<b><math>R^2=0.895</math></b> $S_e^2 = 8.028$	Макс. связь

Наибольшая величина коэффициента детерминации (0.895) соответствует полной регрессии. Данное уравнение с численными значениями коэффициентов имеет вид:

$$S_{теор.} = 7.684 + 3.788V + 0.406\alpha_a - 0.612\alpha_v - 24.764H \quad (7)$$

Выполненная проверка значимости коэффициента детерминации и коэффициентов регрессионной модели [2, 4] подтвердила их значимость при  $\alpha = 0.05$ .

Прогнозное значение результирующей переменной при увеличении зависимых переменных на один шаг может быть найдено по формуле[4]:

$$\hat{S}_{прогноз} = S_{расч} \pm h, \quad (8)$$

$$h = 2 \cdot t\left(\frac{\alpha}{2}, n - p\right) \sqrt{S_e^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}} \quad (9)$$

где

t- квантиль распределения Стьюдента.

### Выводы

1. По результатам статистического анализа был выбран биомеханический фактор с доминирующим влиянием на конечный результат попытки – скорость вылета спортивного снаряда (коэффициент корреляции  $R=0,897$ , коэффициент детерминации  $R^2=0,805$ ).

2. 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 и откорректировать биомеханические параметры с целью улучшения спортивного результата.

3. Результаты исследования позволяют корректировать технические качества с учетом физических данных и возможностей спортсменов.

### Список литературы

1. **Адашевский, В.М.** Теоретические основы механики биосистем: Учебное пособие/ **В. М. Адашевский.** - Харьков НТУ "ХПИ", 2001. - 258 с.
2. **Айвазян, С.А.** Прикладная статистика: Учебник для вузов: в 2 т. – Т1: **Айвазян С.А.** Основы эконометрики. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 432 с..
3. **Бабак, В.П.** і др. Статистична обробка даних. МІВВЦ, Київ, 2001. – 388 с.
4. **Галица, В.И., Качанов П.А.** Динамические модели биокинематических параметров движений атлетов. – тезисы Международной школы-семинара «Біомедична інженерія: проблеми і перспективи розвитку». – НТУ «ХПІ», Одеса, 2014
5. **Галица В.И., Качанов П.А., Горлов А.С., Карецкий Э.А.** Технические средства и системы экспресс диагностики для использования в технологиях управления подготовкой спортсменов /Вісник НТУ «ХПІ» 37-2012 за ред. проф. Качанова П.О. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – С. 42-50.
6. **Качанов П. А., Галица В. И., Адашевский В. М., Горлов А. С.** Адаптация управляемых

процессов к тренировкам копьеметателей в подготовительном периоде посредством интерактивного тренажера// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. - №15 (1058). – С.63-74. –Бібліогр.: 11 назв.-ISSN 2079-083x

7. **Bartonietz, K.** Javelin Throwing: an Approach to Performance Development/ K.Bartonietz, V.M. Zatsiorsky (ed.) // Biomechanics in Sport: Performance Enhancement and Injury Prevention. Blackwell Science. – LTD, Oxford, 2000. – P. 435-457.
8. **Campos J., Brizuela G., Ramon V.** Three-dimensional kinematic analysis of elite javelin throwers at the 1 Haddad, J.M., van Emmerik, R., Wheat, J.S and Hamill, J. (2010). Relative phase coordination analysis in the assessment of dynamic gait symmetry. Journal of Applied Biomechanics, 26, 109-113.
9. **Lanka, J.** Biomechanics of Javelin Throw (Latvian) / J. Lanka. – Riga: Elpa-2, 2007. – 335 p.
10. **Prusik Ka.** [Methods of kinezometria in solving the problem of physical culture] Metoda kinezjometrii w rozwiązywaniu wybranych problemów kultury fizycznej. / Prusik. Ka., Görner K. - In: Súčasnosc' a perspektivy tělovýchovného procesu na školách. Banská Bystrica: PF UMB KTV, 2006 - S. 246 - 252.
11. **Prusik Krz.** Optimisation of Athletes' Training Loades at the Initial Stage of Schooling. / Prusik Krz., Görner K., Pysny L. - Aoculty of Education, Jan Evangelista Purkyne University in Usti nad Labem, Czech Republik, 2010 - 168 s.
12. **Choppin SB, Goodwill SR, Haake SJ, Miller S.** Ball and Racket Movement Recorded at the 2006 Wimbledon Qualifying Tournament. In: Estivalet M, Brisson P, editors. The Engineering of Sport 7; 2008; Biarritz, France: Springer; 2008. p. 563.

#### References

1. **Adashevskiy, V.M.** Theoretical Foundations of Mechanics biosystems: Textbook / V.M. Adashevskiy. - Kharkiv NTU "KhPI", 2001. - 258 p.
2. **Aivasian, S.A.** Applied Statistics: A Textbook for universities: in 2 v. - T1: Ayvazyan SA Basics of econometrics. - M.: UNITY-DANA, 2001. - 432p.
3. **Babak, V.P.** and others. Statistical analysis of the data. MIVVTS, Kyiv, 2001. - 388 p.
4. **Galitsa, V.I., Kachanov P.A.** Dynamic models of byokynematic parameters movements of athletes. - Abstracts International school-seminar "Biomedical

Engineering: Challenges and Prospects for Development". - NTU "KPI", Odessa, 20145.

5. **Galitsa V.I., Kachanov P.A., Gorlov A.S., Karetsky E.A.** Technical means and systems of express diagnostics for use in technologies of management training athletes / News NTU "KhPI" 37-2012 for Ed. prof. Kachanova PO - Kharkiv: NTU "KhPI", 2012. - P. 42-50.
6. **Kachanov P.A., Galitsa V.I., Adashevsky V.M. Gorlov A.S.** Adaptation of control processes to training spear-throwers in the preparatory period by interactive simulator // News NTU "KhPI." Seriya: Automation is the priladobuduvannya. -Kharkiv: NTU "KhPI», 2014. - №15 (1058). - S.63-74. - Bibliogr.: 11 nazv.-ISSN 2079-083x7.
7. **Bartonietz, K.** Javelin Throwing: an Approach to Performance Development/ K.Bartonietz, V.M. Zatsiorsky (ed.) // Biomechanics in Sport: Performance Enhancement and Injury Prevention. Blackwell Science. – LTD, Oxford, 2000. – P. 435-457.
8. **Campos J., Brizuela G., Ramon V.** Three-dimensional kinematic analysis of elite javelin throwers at the 1 Haddad, J.M., van Emmerik, R., Wheat, J.S and Hamill, J. (2010). Relative phase coordination analysis in the assessment of dynamic gait symmetry. Journal of Applied Biomechanics, 26, 109-113.
9. **Lanka, J.** Biomechanics of Javelin Throw (Latvian) / J. Lanka. – Riga: Elpa-2, 2007. – 335 p.
10. **Prusik Ka.** [Methods of kinezometria in solving the problem of physical culture] Metoda kinezjometrii w rozwiązywaniu wybranych problemów kultury fizycznej. / Prusik. Ka., Görner K. - In: Súčasnosc' a perspektivy tělovýchovného procesu na školách. Banská Bystrica: PF UMB KTV, 2006 - S. 246 - 252.
11. **Prusik Krz.** Optimisation of Athletes' Training Loades at the Initial Stage of Schooling. / Prusik Krz., Görner K., Pysny L. - Aoculty of Education, Jan Evangelista Purkyne University in Usti nad Labem, Czech Republik, 2010 - 168 s.
12. **Choppin SB, Goodwill SR, Haake SJ, Miller S.** Ball and Racket Movement Recorded at the 2006 Wimbledon Qualifying Tournament. In: Estivalet M, Brisson P, editors. The Engineering of Sport 7; 2008; Biarritz, France: Springer; 2008. p. 563.

Надійшла (received) 08.12.2014