

Ал-й Л. Мисун*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»**г. Минск, Республика Беларусь**E-mail: LLM_90@mail.ru***МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННЫХ БЕЗОПАСНЫХ ДВИЖЕНИЙ
ОПЕРАТОРА МОБИЛЬНОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ
ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Аннотация. Предложена математическая модель состояния опорно-двигательного аппарата тела человека при выполнении регулировочных технологических воздействий на техническое средство, дана оценка безопасности их выполнения с учетом антропометрических характеристик работника.

Ключевые слова: опорно-двигательный аппарат человека, технологическое воздействие на техническое средство, безопасность труда.

Al-i L. Misun*EI "Belarusian State Agrarian Technical University"**Minsk, Republic of Belarus**E-mail: LLM_90@mail.ru***MODELING OF TARGET-DIRECTED SAFE MOVEMENTS OF THE OPERATOR
OF MOBILE AGRICULTURAL MACHINERY WHEN PERFORMING ADJUSTMENT
TECHNOLOGICAL INFLUENCES**

Abstract. A mathematical model of the state of the human body's musculoskeletal system is proposed when performing technological adjustments to a technical device; an assessment of the safety of their implementation is given, taking into account the anthropometric characteristics of the worker.

Keywords: human musculoskeletal system, technological impact on technical equipment, labor safety.

Введение

Физический труд (ФТ) оператора мобильной сельскохозяйственной техники (МСХТ) стимулирует обменные процессы в организме и сопровождается высокими энергозатратами. Например, выполнение регулировочных воздействий на техническое средство из-за затруднения использования механических устройств повышает энергозатраты: в положении сидя – на 5–10 %, в положении стоя – на 10–15 %, при вынужденной неудобной позе – на 40–50 % [1].

Основная часть

При разработке организационно-технических мероприятий по формированию комфортной производственной среды большое значение имеют антропометрические характеристики (АХ) работника (рисунок 1) – линейные, угловые, параметрические, которые используются для определения объема рабочих движений, зон досягаемости и видимости (таблица 1, рисунок 2).

Выбор размеров зон досягаемости определяется характером выполняемой технологической регулировки технического средства, параметрами используемого технологического приспособления (рабочего инструмента). Например, при необходимости дотянуться до узла рабочего органа МСХТ руководствуются минимальными размерами зон. Условием же для правильного выбора рабочей позы считается расположение проекции общего центра тяжести оператора МСХТ в пределах площади опоры. В полной мере этому соответствует рабочая поза «сидя» (рисунок 3, б). Если при прямой позе «сидя» энергозатраты принять за единицу, то при прямой позе

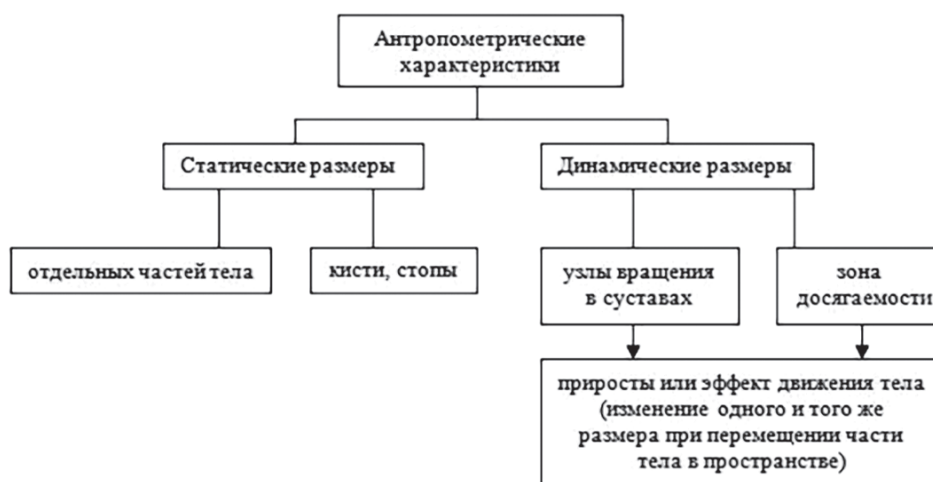


Рисунок 1 – Классификация антропометрических характеристик

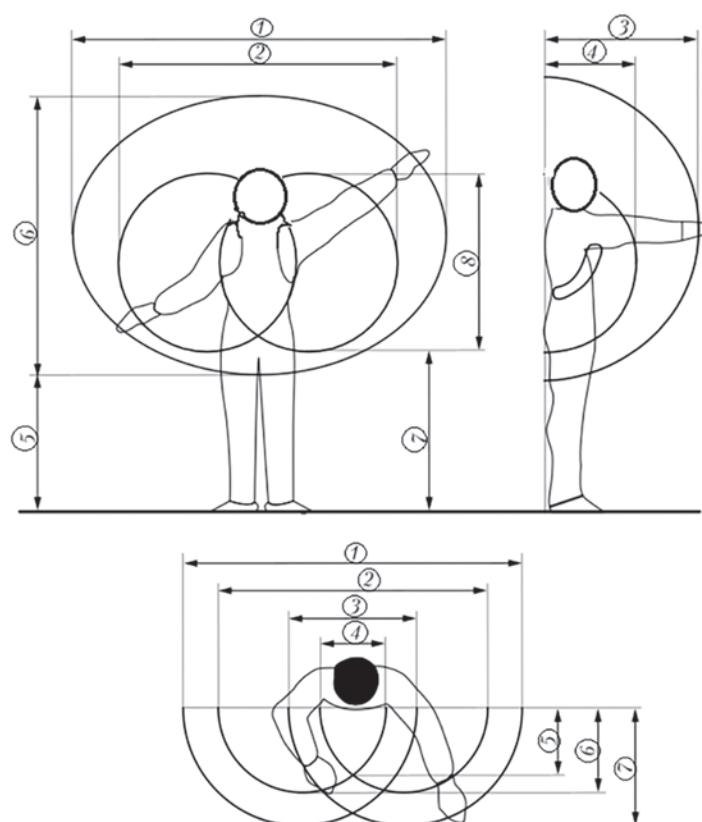


Рисунок 2 – Зоны досягаемости (1–8) рук человека в вертикальной и горизонтальной плоскостях [1]

«стоя» они составят уже 1,6 [1]. Исключить биомеханическую перегрузку у оператора МСХТ возможно при соответствии управляющего воздействия на технологическую регулировку технического средства биомеханическим возможностям оператора (таблица 2).

Рабочую зону, удобную для действия обеих рук, нужно обязательно совмещать с зоной, удобной для охвата человеческим взором (рисунок 4). По этому критерию зона 1 является самой благоприятной. Зоны 2 и 3 хорошо доступны для одной и мало доступны для другой руки, зрительный контроль осложнен. Зона 4 – труднодоступная. Зоны 5 и 6 доступны только для правой (левой) руки.

Таблица 1 – Характеристика зоны досягаемости рабочих движений

Зона досягаемости рабочих движений	Размеры зоны досягаемости рабочих движений, м			
	в вертикальной плоскости		в горизонтальной плоскости	
	для мужчин	для женщин	для мужчин	для женщин
1	1,55	1,40	1,55	1,37
2	1,35	1,10	1,35	1,10
3	0,80	0,73	0,72	0,66
4	0,50	0,43	0,24	0,20
5	0,70	0,63	0,24	0,20
6	1,40	1,26	0,33	0,30
7	0,77	0,68	0,55	0,48
8	0,80	0,72	–	–

Таблица 2 – Соответствие управляющего воздействия на регулировку технического средства биомеханическим возможностям оператора МСХТ

Биомеханические возможности оператора МСХТ	Кисть (сжатие динамометра), Н		Бицепс, Н		Кисть (сгибание), Н		Кисть (разгибание), Н		Стан (мышцы, выпрямление, согнутое туловище), Н
	правая рука	левая рука	правая рука	левая рука	правая рука	левая рука	правая рука	левая рука	
Мужчина	38,6	36,2	27,9	26,8	27,9	26,6	11,9	10,9	123,1
Женщина	22,5	20,04	13,6	13,0	21,7	20,07	9,0	8,3	71,0

Для построения расчетной модели анализа движений оператора МСХТ при выполнении технологических регулировок рассмотрим кинематическую схему шестизвенной модели опорно-двигательного аппарата (ОДА) тела человека (рисунок 5), в которой стопа – первое звено, голень – второе, бедро – третье, туловище с головой – четвертое, плечо – пятое, предплечье (вместе с удерживаемым оператором рабочим инструментом) – шестое звено. На принятую модель наложены ограничения:

– звенья тела человека и рабочий инструмент считаются абсолютно твердыми телами;

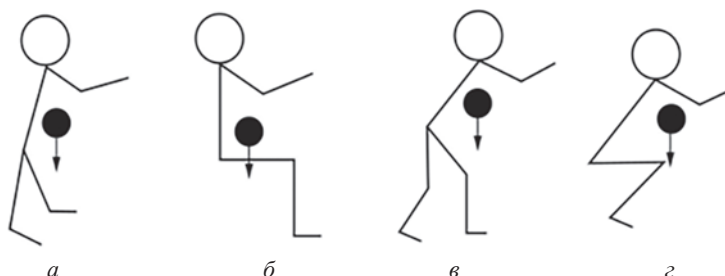


Рисунок 3 – Схемы биомеханического анализа рабочей позы «стоя» (а, в) и «сидя» (б, г) при устойчивой (а, б) и неустойчивой (в, г) позах [1]

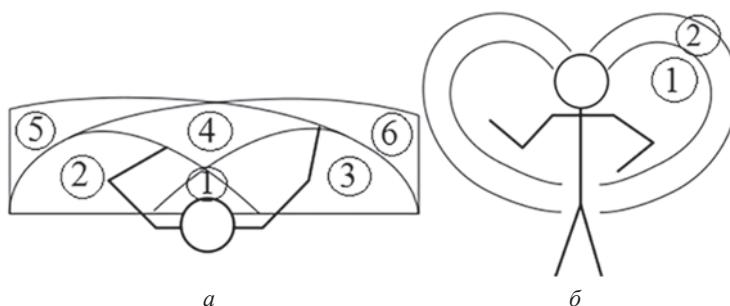


Рисунок 4 – Структурные схемы рабочих зон оператора МСХТ [1]: а – при позе «сидя» в горизонтальной плоскости; б – при позе «стоя» в вертикальной плоскости

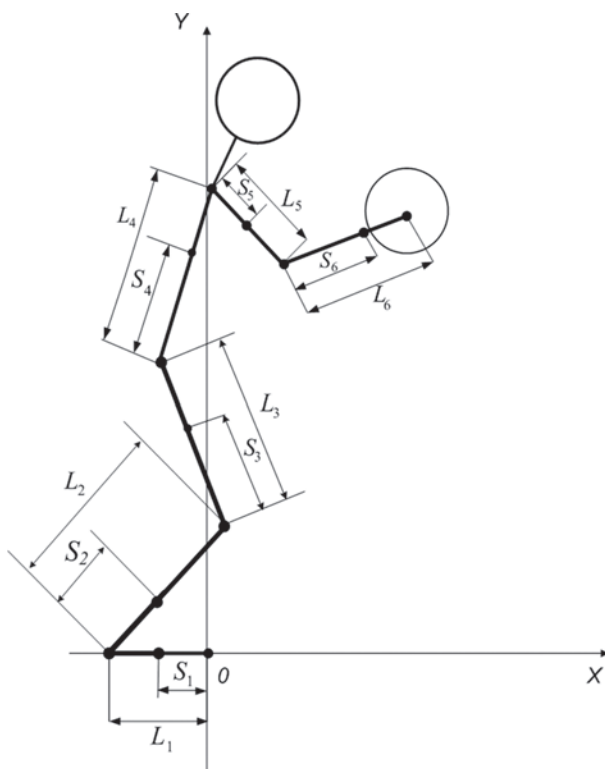


Рисунок 5 – Кинематическая схема шестизвенной модели ОДА тела человека [2]

- суставы, посредством которых звенья тела человека соединяются друг с другом, моделируются цилиндрическими шарнирами;
- трение в шарнирах отсутствует;
- центры масс (ЦМ) звеньев модели расположены на прямой, соединяющей их оси вращения в шарнирах (на продольной оси звена);
- распределение масс внутри каждого звена неизменно;
- масс-инерционные характеристики звеньев модели совпадают с соответствующими среднестатистическими параметрами сегментов тела работника.

Введем буквенную индексацию для обозначения номера звена:

L_i – длина i -го звена ($L_i = L_1, L_2, \dots, L_N$);
 S_i – расстояние от оси вращения i -го звена до его ЦМ ($S_i = S_1, S_2, \dots, S_N$); φ_i – угол наклона i -го звена тела человека к оси Ox (обобщенные координаты i -го звена) ($\varphi_i = \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N$);
 i – буквенный индекс, используемый для обозначения номера звена ($i = 1, 2, \dots, N$); N – количество звеньев модели.

В кинематическом анализе движений биомеханических систем необходимы сведения

[3–7] о пространственно-временных характеристиках (угловых скоростях и угловых ускорениях звеньев тела человека) и др. С этой целью введем обозначения для первой и второй производной по времени от обобщенных координат для N -звенной модели биомеханической системы: $\dot{\varphi}_i$ – угловая скорость i -го звена; $\ddot{\varphi}_i$ – угловое ускорение i -го звена.

В связи с тем, что за обобщенные координаты биомеханической системы приняты φ_i , то $\dot{\varphi}_i$ и $\ddot{\varphi}_i$ соответственно будут обозначать обобщенную скорость и обобщенное ускорение i -го звена.

Аналогично в буквенной индексации, распространяемой на N -звенную модель биомеханической системы, введем следующие идентификаторы для обозначения масс-инерционных характеристик звеньев биосистемы: P_i – вес i -го звена; m_i – масса i -го звена; J_i – центральный момент инерции i -го звена.

Для численной оценки развиваемых оператором МСХТ мышечных усилий при выполнении регулировочных воздействий использовался аналитический расчет значений управляющих моментов мышечных сил в суставах [2]. Для этого необходимы уравнения, описывающие ОДА оператора, в которых моменты мышечных сил будут входить в качестве параметров движения.

Рассмотрим естественное (без управляющих воздействий) движение N -звенной биомеханической системы, когда величина управляющих моментов мышечных сил на рассматриваемом участке траектории равна нулю. Такое движение относится к естественным движениям. Дифференциальные уравнения движения можно записать в форме уравнений Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_m} - \frac{\partial T}{\partial \varphi_m} = F_m, \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия системы; φ_m – обобщенные координаты ($m = 1, \dots, N$); $\dot{\varphi}_m$ – обобщенные скорости ($m = 1, \dots, N$); F_m – обобщенные силы; N – число степеней свободы.

В качестве обобщенных координат принимаем углы наклона звеньев к оси Ox . Кинетическую энергию рассматриваемой биомеханической системы определим из выражения [8]

$$T = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^n A_{ij} \dot{\varphi}_i^2 + 2 \sum_{i=1}^N A_{ij} \sum_{j=i+1}^N \dot{\varphi}_i \dot{\varphi}_j \cos(\varphi_j - \varphi_i) \right], \quad (2)$$

где A_{ij} – элементы матрицы динамических коэффициентов размером $N \cdot M$, определяемых через значения масс-инерционных характеристик звеньев модели:

- массы звеньев m_i ;
- длины звеньев L_i ;
- расстояния до центров масс звеньев S_i ;
- центральные моменты инерции звеньев J_i ;

$$A_{ij} = \begin{cases} \delta_{ij}(J_i + m_i S_i^2) + m_i L_i S_i (1 - \delta_{ij}) + \sum_{k=j+1}^N m_k L_i L_j, & j \geq i, \\ A_{ij}, & j < i \end{cases} \quad (3)$$

где δ_{ij} – символ Кронекера, который определяется как

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i=j, \\ 0, & \text{если } i \neq j. \end{cases}$$

В рассматриваемой шестизвенной модели оператора МСХТ значения элементов матрицы определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} A_{11} &= J_1 + m_1 S_1^2 + L_1^2 (m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6); \\ A_{12} &= m_2 L_1 S_2 + L_1 L_2 (m_3 + m_4 + m_5 + m_6); \\ A_{13} &= m_3 L_1 S_3 + L_1 L_3 (m_4 + m_5 + m_6); \\ A_{14} &= m_4 L_1 S_4 + L_1 L_4 (m_5 + m_6); \\ A_{15} &= m_5 L_1 S_5 + L_1 L_5 m_6; \\ A_{16} &= m_6 L_1 S_6; \\ A_{22} &= J_2 + m_2 S_2^2 + L_2^2 (m_3 + m_4 + m_5 + m_6); \\ A_{23} &= m_3 L_2 S_3 + L_2 L_3 (m_4 + m_5 + m_6); \\ A_{24} &= m_4 L_2 S_4 + L_2 L_4 (m_5 + m_6); \\ A_{25} &= m_5 L_2 S_5 + L_2 L_5 m_6; \\ A_{26} &= m_6 L_2 S_6 + L_2 L_6; \\ A_{33} &= J_3 + m_3 S_3^2 + L_3^2 (m_4 + m_5 + m_6); \\ A_{34} &= m_4 L_3 S_4 + L_3 L_4 (m_5 + m_6); \\ A_{35} &= m_5 L_3 S_5 + L_3 L_5 m_6; \\ A_{36} &= m_6 L_3 S_6; \\ A_{44} &= J_4 + m_4 S_4^2 + L_4^2 (m_5 + m_6); \\ A_{45} &= m_5 L_4 S_5 + L_4 L_5 m_6; \\ A_{46} &= m_6 L_4 S_6; \\ A_{55} &= J_5 + m_5 S_5^2 + L_5^2 m_6; \\ A_{56} &= m_6 L_5 S_6; \\ A_{66} &= m_6 L_6 S_6. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставив формулу (2) в выражение (1) и дифференцируя в (1) по времени обобщенные координаты и обобщенные скорости, получим формальное представление дифференциального уравнения Лагранжа:

$$\sum_{i=1}^N A_{ij} \ddot{\varphi}_j \cos(\varphi_j - \varphi_i) - \sum_{i=1}^N A_{ij} \dot{\varphi}_i^2 \sin(\varphi_j - \varphi_i) = F_v. \quad (5)$$

Правую часть уравнения движения определим на основании векторного равенства

$$F_v = \sum_{v=1}^N F_v \frac{\partial r_v}{\partial \varphi_i}, \quad (6)$$

где F_v – N -мерный вектор внешних сил, приложенный к ЦМ звеньев биомеханической системы; r_v – радиус-вектор ЦМ звеньев.

В декартовой системе координат с учетом уравнения на движение (6) определим обобщенные силы F_v

$$F_v = \sum_{v=i}^N \left[X_v \frac{\partial x_v}{\partial \varphi_i} + Y_v \frac{\partial y_v}{\partial \varphi_i} + Z_v \frac{\partial z_v}{\partial \varphi_i} \right]. \quad (7)$$

Так как внешней силой, приложенной к ЦМ звеньев тела, является сила тяжести, а X_v и Y_v равны нулю, то имеем следующее:

$$F_v = \sum_{v=i}^N Z_v \frac{\partial z_v}{\partial \varphi_i} = - \left(\sum_{k=i+1}^N P_k L_i + P_i L_i \right) \cos \varphi_i. \quad (8)$$

Введем обозначение

$$Y_i = \sum_{k=i}^n P_k L_i + P_i L_i. \quad (9)$$

Смысловые значения Y_i представляют собой выражение для определения обобщенных сил в уравнениях Лагранжа. Как следует из выражения (9) они определяются только масс-инерционными характеристиками звеньев тела. В частности, для шестизвенной биомеханической модели они имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} Y_1 &= P_1 S_1 + L_1 (P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6); \\ Y_2 &= P_2 S_2 + L_2 (P_3 + P_4 + P_5 + P_6); \\ Y_3 &= P_3 S_3 + L_3 (P_4 + P_5 + P_6); \\ Y_4 &= P_4 S_4 + L_4 (P_5 + P_6); \\ Y_5 &= P_5 S_5 + L_5 P_6; \\ Y_6 &= P_6 S_6. \end{aligned} \quad (10)$$

Запишем выражение (9) в виде

$$F_i = - \sum_{i=1}^N Y \cos \varphi_i. \quad (11)$$

В компактной записи дифференциальные уравнения естественного движения N -звенной биомеханической модели имеют вид

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N A_{ij} \ddot{\varphi}_j \cos(\varphi_j - \varphi_i) - \sum_{i=1}^N A_{ij} \dot{\varphi}_i^2 \sin(\varphi_j - \varphi_i) + Y_i \cos \varphi_i &= 0, \\ i &= 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (12)$$

Из выражения (12) видно, что количество уравнений, определяющих движение биомеханической системы, равно количеству ее степеней свободы или числу звеньев модели, а численное значение буквенного индекса i соответствует номеру уравнения в системе уравнений. Так, формульные выражения уравнений естественного движения неразветвленной шестизвенной модели биомеханической системы, представленные в форме уравнений Лагранжа второго рода, имеют вид:

$$\begin{aligned}
& A_{11}\ddot{\varphi}_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_1) + A_{12}\ddot{\varphi}_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + A_{13}\ddot{\varphi}_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_1) + A_{14}\ddot{\varphi}_4 \cos(\varphi_4 - \varphi_1) + \\
& + A_{15}\ddot{\varphi}_5 \cos(\varphi_5 - \varphi_1) + A_{16}\ddot{\varphi}_6 \cos(\varphi_6 - \varphi_1) - A_{11}\dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_1) - A_{12}\dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) - \\
& - A_{13}\dot{\varphi}_3^2 \sin(\varphi_3 - \varphi_1) - A_{14}\dot{\varphi}_4^2 \sin(\varphi_4 - \varphi_1) - A_{15}\dot{\varphi}_5^2 \sin(\varphi_5 - \varphi_1) - A_{16}\dot{\varphi}_6^2 \sin(\varphi_6 - \varphi_1) + Y_1 \cos \varphi_1 = 0, \\
& A_{21}\ddot{\varphi}_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_1) + A_{22}\ddot{\varphi}_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + A_{23}\ddot{\varphi}_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_1) + A_{24}\ddot{\varphi}_4 \cos(\varphi_4 - \varphi_1) + \\
& + A_{25}\ddot{\varphi}_5 \cos(\varphi_5 - \varphi_1) + A_{26}\ddot{\varphi}_6 \cos(\varphi_6 - \varphi_1) - A_{21}\dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_1) - A_{22}\dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) - \\
& - A_{23}\dot{\varphi}_3^2 \sin(\varphi_3 - \varphi_1) - A_{24}\dot{\varphi}_4^2 \sin(\varphi_4 - \varphi_1) - A_{25}\dot{\varphi}_5^2 \sin(\varphi_5 - \varphi_1) - A_{26}\dot{\varphi}_6^2 \sin(\varphi_6 - \varphi_1) + Y_2 \cos \varphi_2 = 0, \\
& A_{31}\ddot{\varphi}_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_1) + A_{32}\ddot{\varphi}_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + A_{33}\ddot{\varphi}_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_1) + A_{34}\ddot{\varphi}_4 \cos(\varphi_4 - \varphi_1) + \\
& + A_{35}\ddot{\varphi}_5 \cos(\varphi_5 - \varphi_1) + A_{36}\ddot{\varphi}_6 \cos(\varphi_6 - \varphi_1) - A_{31}\dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_1) - A_{32}\dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) - \\
& - A_{33}\dot{\varphi}_3^2 \sin(\varphi_3 - \varphi_1) - A_{34}\dot{\varphi}_4^2 \sin(\varphi_4 - \varphi_1) - A_{35}\dot{\varphi}_5^2 \sin(\varphi_5 - \varphi_1) - A_{36}\dot{\varphi}_6^2 \sin(\varphi_6 - \varphi_1) + Y_3 \cos \varphi_3 = 0, \\
& A_{41}\ddot{\varphi}_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_1) + A_{42}\ddot{\varphi}_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + A_{43}\ddot{\varphi}_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_1) + A_{44}\ddot{\varphi}_4 \cos(\varphi_4 - \varphi_1) + \\
& + A_{45}\ddot{\varphi}_5 \cos(\varphi_5 - \varphi_1) + A_{46}\ddot{\varphi}_6 \cos(\varphi_6 - \varphi_1) - A_{41}\dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_1) - A_{42}\dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) - \\
& - A_{43}\dot{\varphi}_3^2 \sin(\varphi_3 - \varphi_1) - A_{44}\dot{\varphi}_4^2 \sin(\varphi_4 - \varphi_1) - A_{45}\dot{\varphi}_5^2 \sin(\varphi_5 - \varphi_1) - A_{46}\dot{\varphi}_6^2 \sin(\varphi_6 - \varphi_1) + Y_4 \cos \varphi_4 = 0, \\
& A_{51}\ddot{\varphi}_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_1) + A_{52}\ddot{\varphi}_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + A_{53}\ddot{\varphi}_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_1) + A_{54}\ddot{\varphi}_4 \cos(\varphi_4 - \varphi_1) + \\
& + A_{55}\ddot{\varphi}_5 \cos(\varphi_5 - \varphi_1) + A_{56}\ddot{\varphi}_6 \cos(\varphi_6 - \varphi_1) - A_{51}\dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_1) - A_{52}\dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) - \\
& - A_{53}\dot{\varphi}_3^2 \sin(\varphi_3 - \varphi_1) - A_{54}\dot{\varphi}_4^2 \sin(\varphi_4 - \varphi_1) - A_{55}\dot{\varphi}_5^2 \sin(\varphi_5 - \varphi_1) - A_{56}\dot{\varphi}_6^2 \sin(\varphi_6 - \varphi_1) + Y_5 \cos \varphi_5 = 0, \\
& A_{61}\ddot{\varphi}_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_1) + A_{62}\ddot{\varphi}_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + A_{63}\ddot{\varphi}_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_1) + A_{64}\ddot{\varphi}_4 \cos(\varphi_4 - \varphi_1) + \\
& + A_{65}\ddot{\varphi}_5 \cos(\varphi_5 - \varphi_1) + A_{66}\ddot{\varphi}_6 \cos(\varphi_6 - \varphi_1) - A_{61}\dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_1) - A_{62}\dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) - \\
& - A_{63}\dot{\varphi}_3^2 \sin(\varphi_3 - \varphi_1) - A_{64}\dot{\varphi}_4^2 \sin(\varphi_4 - \varphi_1) - A_{65}\dot{\varphi}_5^2 \sin(\varphi_5 - \varphi_1) - A_{66}\dot{\varphi}_6^2 \sin(\varphi_6 - \varphi_1) + Y_6 \cos \varphi_6 = 0.
\end{aligned} \tag{13}$$

В уравнениях (13) коэффициенты A_{ij} характеризуют масс-инерционный и кинематический компоненты отдельных звеньев биомеханической системы: массы (m_j), момента инерции (J_j), длины (L_j) и положения ЦМ звеньев (S_j) на продольной оси звена. Таким образом, в численных значениях динамических коэффициентов звеньев биомеханической системы (A_{ij}) учитываются антропометрические особенности сегментов и звеньев ОДА тела работников.

Уравнения движения биомеханической системы, записанные в форме (12), являются уравнениями естественного движения без управляющих воздействий. Движения же работника являются целенаправленными, требующими пространства для их выполнения (например, регулировочных воздействий с учетом возможных опасных и вредных производственных факторов), и формируются при помощи особых мышечных сил, называемых управляемыми.

В математической форме учет управляющих воздействий мышечных сил на биомеханику движения заключается во введении в правую часть уравнений естественного движения управляющих моментов мышечных сил в суставах (M_j), записываемых для i -го уравнения системы (2.12) в виде алгебраической суммы слагаемых $M_i - M_{i+1}$, где

$$M_{i+1} \neq 0, \text{ если } i < N \text{ и } M_{i+1} = 0, \text{ если } i = N. \tag{14}$$

Включая алгебраическую сумму слагаемых (15) в правую часть уравнений (13), запишем уравнения целенаправленного движения N -звенной биомеханической системы в компактной форме

$$\sum_{i=1}^N A_{ij} \ddot{\varphi}_j \cos(\varphi_j - \varphi_i) - \sum_{i=1}^N A_{ij} \dot{\varphi}_i^2 \sin(\varphi_j - \varphi_i) + Y_i \cos \varphi_i = M_i - M_{i+1}. \tag{15}$$

Уравнение (15) представляет собой базовую математическую модель движения рассматриваемой N -звенной биомеханической системы, она может быть использована как для анализа, так и для синтеза выполнения технологических воздействий на техническое средство.

Для обоснования оценочных показателей, например, удобства проведения технологической регулировки технического средства, использовался математический аппарат теории целенаправленной механики человека, поскольку тело человека можно моделировать в виде агрегата твердых тел (звеньев), связанных между собой при помощи как подвижных, так и неподвижных соединений. Положение рассматриваемой модели – руки человека, состоящей из трех звеньев («трехзвенник»), способной вращаться относительно оси OZ (рисунок 6), определяется углами ориентации звеньев «трехзвенника» в его плоскости, если точка D (точка крепления опорного сустава «трехзвенника» к плечевому суставу) неподвижна или движется заранее заданным образом. В этом случае модель имеет четыре степени свободы с обобщенными координатами $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \psi$.

Уравнения связей позволяют описать девять координат ($x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2; x_3, y_3, z_3$) центров масс звеньев длиной l_1, l_2, l_3 , имитирующих, соответственно, плечо, предплечье и кисть «трехзвенника», в виде функций от четырех обобщенных координат, а также определить закономерности движения центров инерции (c_1, c_2, c_3) звеньев.

В результате проведенных исследований получены зависимости [10] для определения координаты (x_D, y_D, z_D) точки крепления опорного сустава «трехзвенника» (руки) к плечевому суставу (надплечью), а также координаты (x_E, y_E, z_E) конечной точки «трехзвенника», принадлежащей звену, имитирующему кисть руки и находящемуся в положении после выполнения регулировки [10]:

$$\begin{cases} x_D = x_1 + (l_1/2) \cos \varphi_1 \sin \psi; \\ y_D = y_1 - (l_1/2) \cos \varphi_1 \cos \psi; \\ z_D = z_1 - (l_1/2) \sin \varphi_1; \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} x_E = x_D - (l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 + (l_3/2) \cos \varphi_3) \sin \psi; \\ y_E = y_D + (l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 + (l_3/2) \cos \varphi_3) \cos \psi; \\ z_E = z_D + l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 + (l_3/2) \sin \varphi_3. \end{cases} \quad (17)$$

Результаты проведенных исследований позволяют оценивать область досягаемости F i -й технологической регулировки, предлагать рекомендации с точки зрения повышения удобства выполнения регулировочных работ с учетом физиологически возможных показателей положения туловища, руки, антропометрических характеристик работника и условий выполнения регулировочных работ [10]:

$$F(x_E, y_E, z_E; x_D, y_D, z_D) = \left[\sqrt{(x_E - x_D)^2 + (y_E - y_D)^2} - (l_1 + l_2 + l_3/2) \right] K_a K_{т.р}, \quad (18)$$

где K_a – коэффициент, учитывающий антропометрические характеристики (таблица 3); $K_{т.р}$ – коэффициент, учитывающий условия выполнения технологической регулировки технического средства (таблица 4).

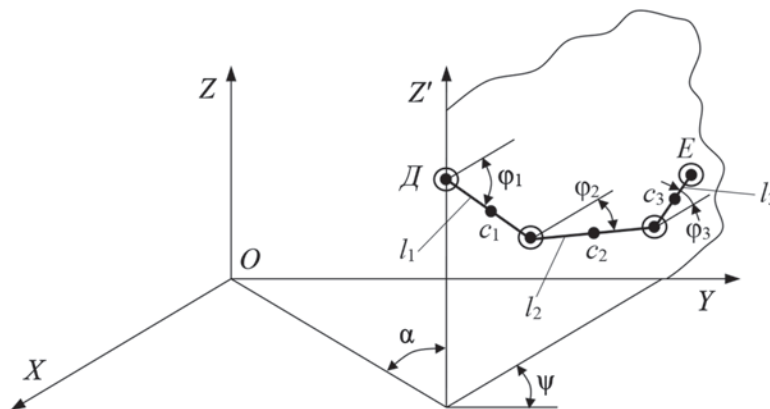


Рисунок 6 – «Трехзвенник» модели руки человека [9]

Таблица 3 – Результаты исследований антропометрических характеристик работников

Количество замеров	Группа роста	Длина, мм						Коэффициент K_a
		плечо		предплечье		кисть		
		мужчины	женщины	мужчины	женщины	мужчины	женщины	
5	А	317	291	238	220	172	160	0,91
5	Б	331	295	251	227	177	168	0,91
5	В	335	301	254	236	182	173	0,92
5	Г	337	312	277	244	189	181	0,94
5	Д	340	319	280	251	199	191	0,92

Примечание: составлено на основе [9].

Таблица 4 – Исходные данные для оценки «удобства» выполнения технологической регулировки технического средства

Положение тела оператора технического средства [11]	Положение рук	Коэффициент $K_{т.р}$	
		Оценка	
		в относительных единицах	баллах
1. Стоя или сидя	перед собой на уровне груди	1,0	5
2. Так же, как п. 1	над головой	0,8	4
3. Стоя или сидя с поворотом или наклоном туловища до 90°	то же, что в п. 1	0,8	4
4. В приседе	то же, что в п. 1	0,6	3
5. Так же, как п. 3	сбоку с изгибом, работа левой рукой	0,4	2
6. Стоя, в приседе или сидя с поворотом и наклоном туловища до 90°	то же, что в п. 1	0,4	2
7. Сидя, стоя подтягиваясь	над головой или сбоку	0,2	1
8. Работа с использованием дополнительных опор и др.	перед собой на уровне груди, сбоку, над головой	0,2	1

Примечание: составлено на основе [9].

Область досягаемости для выполнения технологической регулировки технического средства оценивается в пять баллов (наивысший балл), если выполняется условие [10]

$$\left[\sqrt{(x_E - x_D)^2 + (y_E - y_D)^2} - (l_1 + l_2 + l_3/2) \right] K_a K_{т.р} < 0.$$

Четыре балла выставляется, если выполняется условие

$$\left[\sqrt{(x_E - x_D)^2 + (y_E - y_D)^2} \right] K_a K_{т.р} = \left[(l_1 + l_2 + l_3/2) \right] K_a K_{т.р}.$$

Оценка три и менее баллов устанавливается, когда выполняется условие

$$\left[\sqrt{(x_E - x_D)^2 + (y_E - y_D)^2} - (l_1 + l_2 + l_3/2) \right] K_a K_{т.р} > 0.$$

Показатель безопасности проведения регулировочных работ $P_{т.р}$ определялся с учетом вероятности $P(A_k)$ нахождения оператора МСХТ в опасных зонах при выполнении технологических регулировок, наличия (отсутствия) дополнительных лестниц, подставок, другого вспомогательного оборудования [9], а также количества выполняемых технологических регулировок m и изменения параметра состояния производственной среды [10]:

$$P_{т.р.} = \prod_{k=1}^m P(A_k) = \prod_{k=1}^m P(1 - P_{R_{т.с}}), \quad (19)$$

где $P_{R_{т.с}}$ – показатель риска травмирования оператора технического средства.

С учетом области досягаемости технологической регулировки, рассчитанных значений показателей удобства, доступности и безопасности ее выполнения определялась приспособленность технического средства к проведению регулировочных воздействий.

Заключение

Проведен анализ энергозатрат и антропометрических характеристик оператора МСХТ при выполнении регулировочных технологических воздействий. Предложена математическая модель состояния опорно-двигательного аппарата тела человека при выполнении регулировочных воздействий. Дана оценка удобства их выполнения, что позволяет прогнозировать безопасность производственной деятельности оператора МСХТ с учетом антропометрических характеристик и условий проведения регулировочных работ.

Список использованных источников

1. Каракеян, В. И. Безопасность жизнедеятельности : учеб. пособие / В. И. Каракеян, И. М. Никулина // М. : Юрайт-Издат, 2012. – 286 с.
2. Воронович, Ю. В. Биомеханика тяжелоатлетических упражнений : монография / Ю. В. Воронович, Д. А. Лавшук, В. И. Загrevский. – Могилев : Институт МВД, 2014. – 196 с.
3. Mathematical high bar-human boody for analyzing and interpreting mechanical-energetic processes on the high bar / A. A. Arampatzis, G–P. Bruggemanna // Journal of Biomechanics. – 1998. – № 31. – P. 1083–1092.
4. Имитационное биомеханическое моделирование как метод изучения двигательных действий человека / А. В. Воронов // Теория и практика физической культуры. – 2004. – № 2. – С. 36–40.
5. Загrevский, В. И. Модели анализа движений биомеханических систем / В. И. Загrevский. – Томск : Томск. ун-т, 1990. – 124 с.
6. Корнев, Г. В. Введение в механику человека / Г. В. Корнев. – М. : Наука, 1977. – 264 с.
7. Корнев, Г. В. Целенаправленная механика манипуляторов (научные основы робототехники) / Г. В. Корнев. – М. : Наука, 1979. – 448 с.
8. Штойер, Р. Многокритериальная оптимизация, теория вычислений и приложения / Р. Штойер. – М. : Наука, 1992. – 504 с.
9. Научно-методические основы повышения техносферной безопасности на объектах АПК : монография: / Ал-й Л. Мисун, Ал-р Л. Мисун. – Минск : Бел. гос. агр. техн. ун-т, 2025. – 388 с.
10. Мисун, Ал-й Л. Прогнозирование удобства выполнения технологических регулировок технических средств с учетом антропометрических характеристик работника и условий их проведения / Ал-й Л. Мисун // Горная механика и машиностроение. – 2023. – № 1. – С. 75–81.
11. Машины и тракторы сельскохозяйственные и лесные. Методы оценки приспособленности к техническому обслуживанию : ГОСТ 26026 – 83. – М. : Изд-во стандартов, 2015. – 10 с.