

EDN RJJGNS

DOI 10.5281/zenodo.8272040

УДК (636.085.51:631.589.2):621.492

Соколенко О. Н., Буркова А. Г., Степанова В. В.

**К ВОПРОСУ ДИНАМИКИ ДВУХЪЯРУСНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ
ГИДРОПОННЫХ УСТАНОВОК С ЖЕСТКИМИ НЕСУЩИМИ
ЭЛЕМЕНТАМИ**

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина»

Реферат. Гидропонный зеленый корм (ГЗК) является высококачественной экологической продукцией, содержащей полный спектр требуемых питательных веществ и витаминов. В ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина» разработана двухъярусная гидропонная установка с жесткими несущими элементами, используемая для выращивания ГЗК из зерна ячменя в фермерских (подсобных) животноводческих и птицеводческих хозяйствах. Опыт эксплуатации двухъярусных механических гидропонных установок с жесткими несущими элементами и лотками, вегетационная поверхность которых превышает $1,5 \text{ м}^2$, позволяет утверждать, что эти системы обладают определенными недостатками. В процессе разгрузки нижнего лотка вся система приводится в колебательное движение, что в свою очередь приводит к изгибу жестких несущих стержней. В гидропонных установках с вегетационной площадью не более $1,5 \text{ м}^2$ указанные несовершенства практически отсутствуют из-за малых масс и моментов инерции лотков. Несмотря на то, что эти установки отличаются простотой изготовления, исследование динамики таких систем не проводили. Целью исследований является определение прочностных и массовых комплексных соотношений, обеспечивающих устойчивую динамику движения всех элементов в процессе эксплуатации двухъярусной гидропонной установки, для исключения взаимного обмена энергиями движущихся масс системы. Экспериментальные исследования проводили в гидропонной лаборатории ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина» в период с 2021 по 2022 гг. В процессе работы использовали основные положения высшей математики, динамики колебательных процессов, а также теоретической механики материальной точки и системы материальных тел. Получено решение системы дифференциальных уравнений динамики элементов установки (20). В результате экспериментальных исследований доказано, что максимальное отклонение центра масс системы «лоток-урожай-направляющие» не превышает 15 см. На основании теоретических исследований определено соотношение параметров рассматриваемой системы, при котором отсутствует явление биения. Длины несущих элементов не должны быть разными, а соотношение масс груженого и свободного лотков должно изменяться в пределах $0,15-0,25$.

Ключевые слова: двухъярусная механическая гидропонная установка, гидропонный зеленый корм (ГЗК), дифференциальные уравнения Лагранжа, динамика движения, несущие элементы.

Для цитирования: Соколенко О. Н., Буркова А. Г., Степанова В. В. К вопросу динамики двухъярусных механических гидропонных установок с жесткими несущими элементами // Таврический вестник аграрной науки. 2023. № 2(34). С.117–126. EDN: RJJGNS. DOI 10.5281/zenodo.8272040.

For citation: Sokolenko O. N., Burkova A. G., Stepanova V. V. On the issue of dynamics of two-tier mechanical hydroponic systems with rigid load-carrying components // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2023. No. 2(34). P. 117–126. EDN: RJJGNS. DOI 10.5281/zenodo.8272040.

Введение

Основой продовольственной безопасности страны является продукция птицеводческой и животноводческой отраслей АПК, поэтому особое внимание следует уделять обеспечению сбалансированных кормовых рационов сельскохозяйственных животных [1, 2].

Гидропонный зеленый корм (ГЗК) – высококачественная экологическая продукция, содержащая полный спектр требуемых питательных веществ и витаминов [3, 4]. В ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина» разработана двухъярусная гидропонная установка с жесткими несущими элементами. Опыт эксплуатации двухъярусных механических гидропонных установок с жесткими несущими элементами и лотками, вегетационная поверхность которых превышает $1,5 \text{ м}^2$, позволяет утверждать, что эти системы обладают определенными недостатками [1, 2].

В процессе разгрузки нижнего лотка вся система установки приводится в колебательное движение. Плоские шарнирные соединения жестких несущих элементов с лотками и точкой подвеса установки исключают податливость всей системы в горизонтальной и одной из вертикальных плоскостей. Отсутствие податливости приводит к изгибу жестких несущих стержней (арматурных прутков диаметром 5–6 мм). Последнее вызывает перед следующей закладкой исходного материала для проращивания дополнительные ремонтные работы с предварительным демонтажом установки [2, 5].

В гидропонных установках с вегетационной площадью не более $1,5 \text{ м}^2$ указанные несовершенства практически отсутствуют из-за малых масс и моментов инерции лотков [5]. Однако исследование динамики таких систем не проводилось несмотря на то, что эти установки отличаются простотой изготовления и наиболее приемлемы для оборудования гидропонных цехов в фермерских хозяйствах. Более того, двухъярусные установки с жесткими несущими элементами значительно дешевле аналогичных с упругими несущими канатами того же диаметра [1, 2, 5].

Цель исследований – определение прочностных и массовых комплексных соотношений, обеспечивающих устойчивую динамику движения всех элементов в процессе эксплуатации двухъярусной гидропонной установки, для исключения взаимного обмена энергиями движущихся масс системы.

Материалы и методы исследований

Экспериментальные исследования проводили в гидропонной лаборатории ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина» в период с 2021 по 2022 гг.

В процессе определения прочностных и массовых комплексных соотношений, обеспечивающих устойчивую динамику движения всех элементов системы в процессе эксплуатации двухъярусной гидропонной установки, использовали основные положения высшей математики, динамики колебательных процессов, а также теоретической механики материальной точки и системы материальных тел [6–9].

Результаты и их обсуждение

Для исследования динамики двухъярусной установки с лотками специальной конструкции рассмотрим механическую модель, представленную на рисунке 1 а. Расчётная схема установки при разгрузке нижнего лотка представлена на рисунке 1 б, где L и l соответственно длины несущих элементов, M – масса верхнего лотка с урожаем и направляющими, m – масса нижнего лотка с направляющими. Поместим начало осей координат в точку подвеса системы O . Направление осей (x , y) показано на рисунке 1 б.

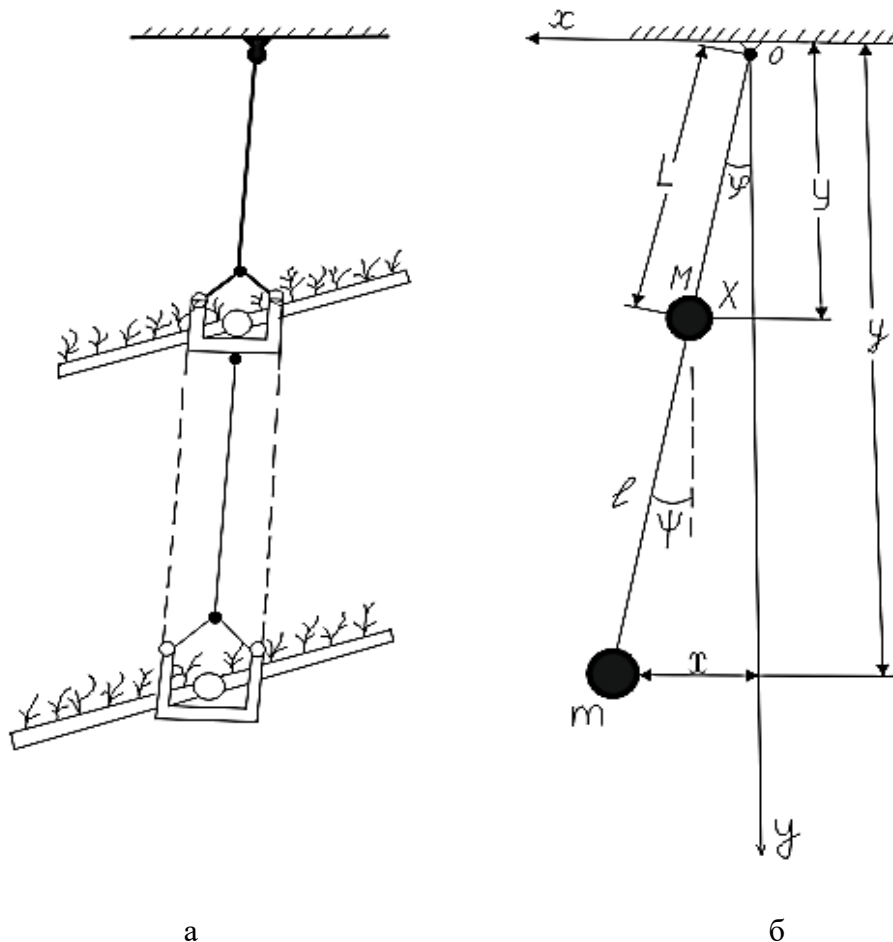


Рисунок 1 – Схема к моделированию двухъярусной механической гидропонной установки

Примечание: а – механическая модель; б – расчетная модель.

Для вывода дифференциальных уравнений движения системы воспользуемся уравнениями Лагранжа второго рода в виде [6, 7]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0, \quad (1)$$

где $L = T - \Pi$ – функция Лагранжа;

T и Π – кинематическая и потенциальная энергии системы соответственно;

q_i и \dot{q}_i – обобщенные координаты и обобщенные скорости.

В качестве обобщенных координат приняты углы отклонения от вертикальной оси φ и Ψ .

Тогда будут справедливы следующие соотношения:

$$\begin{cases} X = L \sin \varphi, & x = L \sin \varphi + l \sin \Psi, \\ Y = L \cos \varphi, & y = L \cos \varphi + l \sin \Psi. \end{cases} \quad (2)$$

Кинетическая и потенциальная энергии рассматриваемой системы соответственно равны:

$$\begin{cases} T = \frac{M}{2}(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) + \frac{m}{2}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) = \frac{m}{2}l^2\dot{\Psi}^2 + mL \cos(\varphi - \Psi) \dot{\varphi} \dot{\Psi} + \frac{M+m}{2}L^2\dot{\varphi}^2, \\ \Pi = -mgy - MgY = -mgl \cos \Psi - (M+m)gL \cos \varphi = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Подставив системы уравнений (2) и (3) в уравнение Лагранжа (1), получим нелинейную систему дифференциальных уравнений движения рассматриваемой установки в форме Лагранжа второго рода:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi} + \frac{ml}{(M+m)L} \ddot{\Psi} \cos(\varphi - \Psi) - \frac{ml}{M+m} \dot{\Psi}^2 \sin(\varphi - \Psi) + \frac{g}{L} \sin \varphi = 0, \\ \ddot{\Psi} + \frac{L}{l} \ddot{\varphi} \cos(\varphi - \Psi) - \frac{L}{l} \dot{\varphi}^2 \sin(\varphi - \Psi) + \frac{l}{g} \sin \Psi = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Исследования показали, что при соблюдении технологии закладки замоченного зерна в лотки $5,5 \text{ кг/м}^2$ (вегетационная площадка лотков $1,5 \text{ м}^2$) урожай зеленой массы составляет 55 кг с одного квадратного метра [1, 2, 5]. Разгрузка урожая производилась на восьмые сутки. В ходе проводимых экспериментов непосредственными замерами устанавливали отклонение центра масс нижнего лотка от вертикали. Это отклонение изменялось в пределах $14\text{--}16 \text{ см}$ при длине жестких несущих стержней $0,85 \text{ м}$. Верхний груженный ярус с длиной несущего элемента $0,70 \text{ м}$ отклонился меньше чем на 14 см . Полученные результаты экспериментов дают основание принять углы отклонения φ и Ψ малыми. Следовательно, система уравнений (4) принимает вид:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi} + \frac{ml}{(M+m)l} \ddot{\varphi} + \frac{g}{L} \varphi = 0 \\ \ddot{\Psi} + \frac{L}{l} \ddot{\varphi} + \frac{g}{l} \Psi = 0. \end{cases} \quad (5)$$

В полученной системе линейных дифференциальных уравнений (5) положено:

$$\varphi = \frac{X}{L}, \quad \Psi = \frac{x-X}{l}, \quad (6)$$

Тогда, подставив (6) в (5), получим систему уравнений относительно линейных координат X и x в виде:

$$\begin{cases} \ddot{X} + K_1^2 X - \alpha x = 0 \\ \ddot{x} + K_2^2 x - K_2^2 X = 0, \end{cases} \quad (7)$$

где $K_1^2 = \frac{g}{L} + \left(1 + \frac{m}{M}\right) + \frac{mg}{Ml}$, $\gamma = \frac{mg}{Ml}$, $K_2^2 = \frac{g}{l}$.

Последнее преобразование будет справедливым, когда $\frac{m}{M} > 1$ и $L < l$, что отвечает конструктивным параметрам реальных двухъярусных установок при разгрузке урожая. Полагая, что $L < l$, вводим обозначения $\frac{g}{L} = \omega_0^2$. Тогда системы уравнений (7) примут вид:

$$\begin{cases} \ddot{X} + \left(2\frac{m}{M} + 1\right) \omega_0^2 X - \frac{m}{M} \omega_0^2 x = 0 \\ \ddot{x} + \omega_0^2 x = \omega_0^2 X. \end{cases} \quad (8)$$

Решение полученной системы уравнений будет в виде [6, 7]:

$$X = B e^{i\lambda t}, \quad x = A e^{i\lambda t}, \quad \text{где } i = \sqrt{-1}. \quad (9)$$

Подстановка уравнений (9) в (8) дает возможность получить следующую систему алгебраических уравнений для определения λ :

$$\begin{cases} (\omega_0^2 - \lambda^2)A - \omega_0^2 B = 0 \\ -\frac{m}{M}\omega_0^2 A + \left[\left(1 + 2\frac{m}{M}\right)\omega_0^2 - \lambda^2\right] = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Преобразуем полученную систему (10) в квадратное уравнение относительно λ^2 , раскрыв ее определитель, в виде:

$$(\lambda^2 - \omega_0^2)^2 + 2\frac{m}{M}\omega_0^2(\omega_0^2 - \lambda^2) - \frac{m}{M}\omega_0^4 = 0. \quad (11)$$

Корни этого уравнения с достаточной для практики точностью будут равны:

$$\omega = \lambda = \omega_0 \left(1 + \sqrt{\frac{m}{4M}}\right), \quad (12)$$

$$\omega_1 = \lambda_1 = \omega_0 \left(1 - \sqrt{\frac{m}{4M}}\right). \quad (13)$$

Общее решение исходной системы (7) может быть записано в следующей форме:

$$x = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t + C'_1 \cos \omega_1 t + C'_2 \sin \omega_1 t, \quad (14)$$

$$X = \beta C_1 \cos \omega t + \beta C_2 \sin \omega t + \beta' C'_1 \cos \omega_1 t + \beta' C'_2 \sin \omega_1 t. \quad (15)$$

Величины β и β' являются значениями отношения $\frac{B}{A}$, которые получаются из уравнений (12, 13) после подстановки в них $\lambda^2 = \omega^2$ и $\lambda^2 = \omega_1^2$. На основании вышесказанного получаем:

$$\beta = -\sqrt{\frac{m}{M}}, \quad \beta' = \sqrt{\frac{m}{M}}. \quad (16)$$

Для определения произвольных постоянных C_1, C_2, C'_1 и C'_2 следует ввести начальные условия. При $t = 0$ $x = x_0, X = 0, \dot{x} = 0, \dot{X} = 0$, что соответствует реальной системе, то есть, в начальный момент времени центр масс нижнего лотка с урожаем сместился на x_0 в сторону опрокидывания и произошла разгрузка урожая. Центр масс верхнего лотка при $t = 0$ остался неподвижным. Учитывая сказанное, для определения произвольных постоянных получены следующие соотношения:

$$\begin{cases} x_0 = C_1 + C'_1 \\ 0 = \beta C_1 + \beta' C'_1 \end{cases} \quad \begin{cases} 0 = C_2 \omega + C'_2 \omega_1 \\ 0 = \beta C_2 \omega + \beta' C'_2 \omega_1 \end{cases} \quad (17)$$

Полученные соотношения позволяют определить неизвестные величины:

$$C_1 = -\frac{x_0 \beta'}{\beta - \beta'}, \quad C'_1 = \frac{x_0 \beta}{\beta - \beta'}, \quad C_2 = C'_2 = 0. \quad (18)$$

Окончательно решение исходной системы уравнений (7) может быть записано в виде:

$$\begin{cases} x = \frac{x_0\beta'}{\beta-\beta'} \cos \omega t + \frac{x_0\beta}{\beta-\beta'} \cos \omega_1 t \\ X = \frac{\beta\beta'x_0}{\beta-\beta'} \cos \omega t + \frac{\beta\beta'x_0}{\beta-\beta'} \cos \omega_1 t, \end{cases} \quad (19)$$

или

$$\begin{cases} x = \frac{x_0}{\beta-\beta'} (\beta \cos \omega_1 t - \beta' \cos \omega t) \\ X = \frac{\beta\beta'x_0}{\beta-\beta'} (\cos \omega_1 t - \cos \omega t). \end{cases} \quad (20)$$

Следует отметить, что при $\frac{m}{M} \gg 1$ значение ω близко к ω_1 , что возбуждает в системе характер «биения» [8–9].

Закон движения верхнего лотка с урожаем и направляющими $X = X(t)$ представим в форме:

$$X = \frac{\beta\beta'x_0}{\beta-\beta'} (\cos \omega_1 t - \cos \omega t) = 2 \frac{\beta\beta'x_0}{\beta-\beta'} - \sin \frac{\omega_1-\omega}{2} t \cdot \sin \frac{\omega_1+\omega}{2} t. \quad (21)$$

Значения $\sin \frac{\omega_1-\omega}{2} t$ будут равны 0 в том случае, если будет выполняться равенство:

$$\frac{\omega_1-\omega}{2} t = \pi n, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (22)$$

или в момент времени:

$$t = \frac{2\pi n}{\omega_1-\omega}. \quad (23)$$

Нижний лоток будет возвращаться в положение равновесия, тогда как верхний – стремиться к максимальному отклонению. Таким образом, при близости значений ω_1 и ω происходит взаимный обмен энергиями движущихся масс системы [8, 9]. На рисунке 2 представлен характер изменения движения масс верхнего и нижнего ярусов с течением времени.

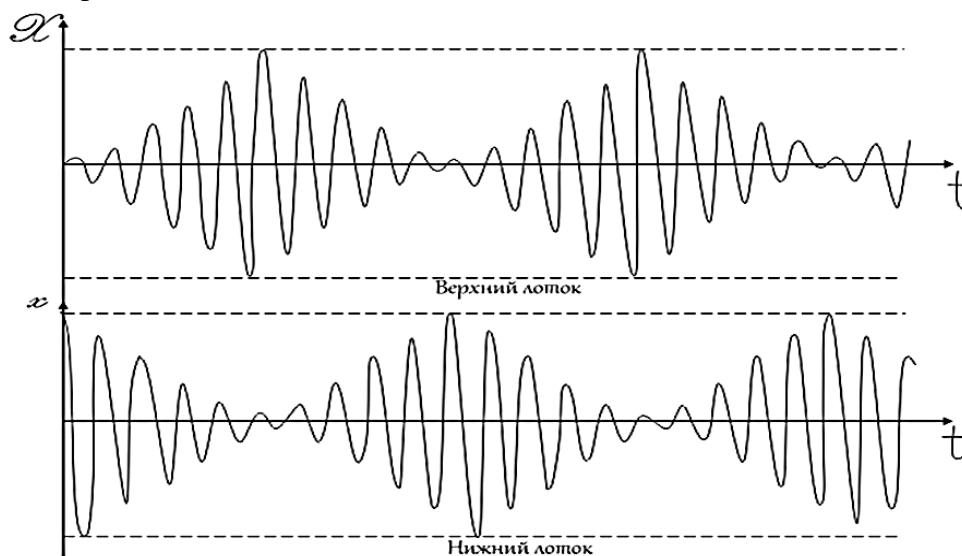


Рисунок 2 – Изменение закона движения верхнего и нижнего лотков с течением времени

Избежать указанного явления можно путем вариации массовых и геометрических параметров установки, то есть длины несущих элементов не должны быть разными, а соотношение масс груженого и свободного лотков должно изменяться в пределах 0,15–0,25. Существенную роль играют начальные условия. Графики, изображенные на рисунке 2, получены при следующих геометрических и массовых характеристиках: $L = \ell = 1\text{м}$, $\frac{m}{M} = 0,5$.

Определение усилий в нижнем и верхнем стержнях производится по известным методикам [6, 7]. Усилие в нижнем несущем стержне S может быть определено при малых отклонениях масс по следующей формуле:

$$S \approx mg \cos \psi. \quad (24)$$

Усилия в верхнем несущем элементе определяются исходя из дифференциальных уравнений несвободного движения материальной точки или принципа Даламбера [6, 7]. Рассмотрим расчетную схему, изображенную на рисунке 3.

Связываем с движущейся точкой подвижной оси координат τ и n , обозначив все заданные силы Mg , а также и неизвестное натяжение (усилие в стержне) S и S_1 .

Согласно принципу Даламбера введены касательная Φ^τ и нормальная Φ^n силы инерции. Эти силы направлены как указано на рисунке 3, то есть в противоположную сторону к векторам истинных ускорений точки \bar{a}^r и \bar{a}^n в данный момент времени. Величины нормальной и касательной сил инерции будут равны соответственно:

$$\Phi^n = M \frac{V^2}{L}, \quad \Phi^\tau = M \frac{dV}{dt}, \quad (25)$$

где V – скорость движения центра масс лотка с урожаем и направляющими. За эту скорость можно принять скорость движения оси сектора лотка. Проектируя все силы на ось n , получаем:

$$S_1 = Mg \cos \varphi + S \cos(\Psi - \varphi) + M \frac{V^2}{L}. \quad (26)$$

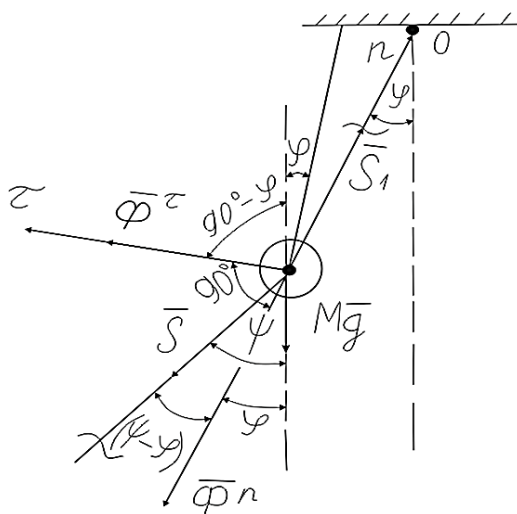


Рисунок 3 – Расчетная схема для определения усилий в стержнях

Скорость движения V с достаточной для практики точностью можно определить как $V = \frac{dX}{dt}$ или составить дифференциальное уравнение движения центра масс в проекции на ось τ , что дает:

$$\Phi^\tau + S \sin(\Psi - \varphi) - Mg \sin \varphi = 0, \quad (27)$$

или

$$M \frac{dV}{dt} = Mg \sin \varphi + S \sin(\Psi - \varphi). \quad (28)$$

Учитывая, что углы отклонения масс малы, определение усилия S_1 в верхнем несущем стержне не представляет принципиальных трудностей. Таким образом, определив величину S и скорость V , можно определить S_1 .

На основании приведенных теоретических исследований при реальных массовых и геометрических параметрах $M = 96$ кг, $m = 15,2$ кг, $l = 0,85$ м, $L = 0,75$ м динамические усилия в жестких несущих элементах превосходят статические на 12–15 %. Если учесть, что установка работает в квазистатическом режиме, то запас прочности несущих элементов не должен превышать $n = 2 - 2,5$ [9]. Используемые в качестве несущих элементов арматурные прутки диаметром 4 – 5 мм имеют запас прочности для установок с площадью посева $1,5 \text{ м}^2$ $n = 12 - 15$. Такие соотношения запасов прочности приемлемы только в тех случаях, когда не представляется возможным заменить имеющиеся позиции несущих элементов другими.

Выводы

Выведены и получены решения дифференциальных уравнений динамики элементов двухъярусной гидропонной установки с жесткими несущими стержнями (система уравнений 20).

Экспериментально доказано, что в процессе эксплуатации двухъярусной гидропонной установки с жесткими несущими стержнями, максимальное отклонение центра масс системы «лоток-урожай-направляющие» не превышает 15 см.

Избежать явления биения можно путем вариации массовых и геометрических параметров установки, то есть длины несущих элементов не должны быть разными, а соотношение масс груженого и свободного лотков должно изменяться в пределах 0,15–0,25.

На основании приведенных теоретических исследований при реальных массовых и геометрических параметрах ($M = 96$ кг, $m = 15,2$ кг, $l = 0,85$ м, $L = 0,75$ м) динамические усилия в жестких несущих элементах превосходят статические на 12–15 %, а запас прочности несущих элементов не должен превышать $n = 2 - 2,5$.

Литература

1. Курасов В. С., Соколенко О. Н. К вопросу обоснования конструктивных параметров механической установки с упруго-жесткими несущими элементами // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского ГАУ. 2016. № 4 (118). С. 1037–1049.
2. Кругляков Ю. А. Оборудование для непрерывного выращивания зеленого корма гидропонным способом. М.: ВО Агропромиздат, 1991. С. 5–24.
3. Васильев А. А., Москаленко С. П., Сивохина Л. А., Коробов А. П., Кузнецов М. Ю. Эффективность использования гидропонного зеленого корма в рационах поросят-отъемышей // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы сельскохозяйственных наук в России и за рубежом». № 2. Новосибирск: ИНЦРОН, 2015. С. 42.
4. Сенько А. Я., Кудинов В. В., Корнилова В. А. Химический состав яиц в зависимости от скармливания зеленого гидропонного корма // Сборник научных трудов «Актуальные проблемы и перспективы развития животноводства». Самара: ГСХА, 2002. С. 101–103.
5. Соколенко О. Н. К вопросу динамики движения одноярусной гидропонной установки с упруго-жесткими несущими элементами // Вестник АПК Ставрополя. 2017. №2 (26). С. 40–43.

6. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики. М.: Высшая школа, 2010. С. 232–250.
7. Барбашова Т. Ф. Кугушев Е. И., Попов Т. В. Теоретическая механика в задачах. Лагранжева механика. Гамильтонова механика. М.: МЦНМО, 2013. С. 7–186.
8. Ланда П. С. Нелинейные колебания и волны. М.: Наука, Физматлит, 2019. 153–169.
9. Бутенин Н. В. Введение в теорию нелинейных колебаний. М.: Наука, 1987. С. 200–218.

References

1. Kurasov V. S., Sokolenko O. N. On the issue of substantiation of the design specifications on mechanical system with rigid elastic load-carrying components // Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University. 2016. No. 4 (118). P. 1037–1049.
2. Kruglyakov Yu. A. Equipment for the continuous cultivation of green fodder in the hydroponic way. Moscow: Agropromizdat, 1991. P. 5–24.
3. Vasiliev A. A., Moskalenko S. P., Sivokhina L. A., Korobov A. P., Kuznetsov M. Yu. Efficiency of using hydroponic green fodder in diets of weaned piglets // International Scientific and Practical Conference “Actual problems of agricultural sciences in Russia and abroad”. No. 2. Novosibirsk: Innovative Development Center of Education and Science (IDCES), 2015. P. 34–45.
4. Senko A. Ya., Kudinov V. V., Kornilova V. A. Chemical composition of eggs depending on the feeding of hydroponic green fodder // Collection of scientific papers “Actual problems and prospects for the development of animal husbandry”. Samara: Samara State Agricultural Academy, 2002. P. 101–103
5. Sokolenko O. N. On the issue of movement dynamics of the one-tier hydroponic system with rigid elastic load-carrying components // Agricultural Bulletin of Stavropol Region. 2017. No. 2 (26). P. 40–43.
6. Targ S. M. Short course of theoretical mechanics. Moscow: Vysshaya Shkola, 2010. P. 232–250.
7. Barbashova T. F. Kugushev E. I., Popov T. V. Theoretical mechanics in tasks. Lagrangian mechanics. Hamiltonian mechanics. Moscow: MCCME (Moscow Center for Continuous Mathematical Education), 2013. P. 7–186.
8. Landa P. S. Nonlinear vibrations and waves. Moscow: Nauka, Fizmatlit, 2019. P. 153–169.
9. Butenin N. V. Introduction to the theory of non-linear oscillations. Moscow: Nauka, 1987. P. 200–218.

UDC (636.085.51:631.589.2):621.492

Sokolenko O. N., Burkova A. G., Stepanova V. V.

ON THE ISSUE OF DYNAMICS OF TWO-TIER MECHANICAL HYDROPONIC SYSTEMS WITH RIGID LOAD-CARRYING COMPONENTS

Summary: *Hydroponic green fodder (HGF) is a high-quality ecological product containing a full range of required nutrients and vitamins. A two-tier hydroponic system with rigid load-carrying components was developed at Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin. This system can be used for producing HGF from barley grain in individual subsidiary farms of livestock and poultry growing direction. Our operating experience has shown that two-tier mechanical hydroponic systems with rigid load-carrying components and trays, the vegetation surface of which exceeds 1.5 m², have some disadvantages. In the process of unloading the bottom tray, the whole system is driven into oscillating motion, which in turn leads to bending of the rigid support rods. In hydroponic systems with trays, the vegetation surface of which does not exceed 1.5 m², these disadvantages are practically absent owing to their small mass and, therefore, moments of trays inertia. Although these systems are easy and simple in production, their dynamics have not been studied. The purpose of the research was to determine the strength and mass complex ratios that ensure stable dynamics of movement of all elements during the operation of a two-tier hydroponic system in order to exclude the mutual exchange of energies of the moving masses. Experiments and studies were carried out in the Hydroponic Laboratory of the Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin from 2021 to 2022. During work, along with the basic principles of higher mathematics and dynamics of oscillatory processes, we used theoretical mechanics of a material point and a system of material bodies. The solution of the system of differential equations of the system elements*

dynamics was obtained (20). As a result of experimental studies, it was proved that the maximum deviation of the center of mass of the system “tray-crop-guides” did not exceed 15 cm. Based on theoretical studies, the ratio of the parameters of the system, in which there was no beating phenomenon, was determined. The lengths of the load-carrying components should not differ, and the mass ratio of the loaded and empty trays should vary within 0.15–0.25.

Keywords: *two-tier mechanical hydroponic system, hydroponic green fodder (HGF), Lagrange differential equations, motion dynamics, load-carrying components.*

Соколенко Оксана Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры тракторов, автомобилей и технической механики, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина»; 350044, г. Краснодар, ул. Калинина,13; e-mail: sokolenko.oksana@mail.ru.

Буркова Анастасия Георгиевна, студент третьего курса факультета механизации ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина»; 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13; e-mail: an-burkova03@yandex.ru.

Степанова Виктория Вячеславовна, студент третьего курса факультета механизации ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина»; 350044, г. Краснодар, ул. Калинина,13; e-mail: vichka_stepanova_0300@mail.ru.

Sokolenko Oksana Nikolaevna, Cand. Sc. (Tech.), assistant professor of the Department of tractors, cars and technical mechanics, FSBEI HE “Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin”; 13, Kalinina str., Krasnodar, 350044, Russia; e-mail: sokolenko.oksana@mail.ru.

Burkova Anastasia Georgievna, 3rd year student of the faculty of mechanization, FSBEI HE “Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin”; 13, Kalinina str., Krasnodar, 350044, Russia; e-mail: an-burkova03@yandex.ru.

Stepanova Viktoriya Vyacheslavovna, 3rd year student of the faculty of mechanization, FSBEI HE “Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin”; 13, Kalinina str., Krasnodar, 350044, Russia; e-mail: vichka_stepanova_0300@mail.ru.

Дата поступления в редакцию – 04.06.2023.

Дата принятия к печати – 13.07.2023