

DOI 10.33952/2542-0720-2020-1-21-91-99

УДК (636.085.51:631.589.2):621.492

Соколенко О. Н.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ОДНОУРОВНЕВОЙ  
ГИДРОПОННОЙ УСТАНОВКИ С УПРУГИМИ НЕСУЩИМИ  
ЭЛЕМЕНТАМИ**

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени 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 имени И. Т. Трубилина» разработана одноуровневая гидропонная установка с упругими несущими элементами. Цель исследований – определение жесткостных и массовых комплексных соотношений, обеспечивающих устойчивую динамику движения всех элементов системы в процессе эксплуатации одноуровневой гидропонной установки. Задача изучения движения одноуровневой гидропонной установки с упругими несущими элементами сводится к приближенному определению закона движения пружинного маятника. При коэффициенте статического удлинения пружины  $\gamma = 1/3$ , вертикальные колебания пружинного маятника неустойчивы, то есть происходит перекачивание энергии колебаний, происходящих в вертикальной плоскости, в энергию поперечных колебаний. Для обеспечения устойчивой динамики движения всех элементов одноуровневой гидропонной установки, необходимо подобрать суммарную массу лотка с урожаем и направляющими, при которой жесткостно-массовое комплексное соотношение  $\frac{EF}{mg} \approx 3$  не будет выполняться. При выращивании ГЗК и репчатого лука на перо используют лотки с площадью вегетационной поверхности 1–1,5 м<sup>2</sup>, при этом для несущих упругих элементов гидропонной установки следует использовать стальную проволоку диаметром 2,0–2,5 мм с разрывным усилием не менее 2000 Н/мм<sup>2</sup>. При выращивании гидропонных зеленых овощных растений (ГЗОР), несущим элементом является стальная проволока диаметром 1 мм с разрывным усилием 1400–1600 Н/мм<sup>2</sup>. Для сохранения товарного вида выращиваемых ГЗОР, рекомендуемая площадь вегетационной поверхности лотка должна составлять не более 1 м<sup>2</sup>.*

**Ключевые слова:** *гидропонная установка, гидропонный зеленый корм (ГЗК), гидропонные зеленые овощные растения (ГЗОР), пружинный маятник, дифференциальные уравнения Лагранжа, динамика движения, несущие элементы, разрывное усилие.*

**Введение**

В настоящее время перед работниками агропромышленного комплекса Российской Федерации поставлены задачи, касающиеся формирования новых стратегий и перспектив развития животноводческого и птицеводческого секторов. Это объясняется тем, что их конечная продукция занимает одно из основных мест в системе правильного и сбалансированного питательного рациона человека. Успех развития и внедрения в производство новых стратегий и технологий будет зависеть от количества и постоянства секторальных инвестиций, степени квалификации рабочих, но в первую очередь от технической оснащенности агропредприятий [1].

Кроме того, следует отметить, что на сегодняшний день не полностью раскрыт генетический запас (потенциал) сельскохозяйственных культур, животных и птиц, а это значительно снижает темпы развития соответствующих секторов [2].

Также не следует забывать о необходимой финансовой и технической помощи на государственном уровне для развития малых фермерских и подсобных хозяйств. Именно в процессе работы малых фермерских и подсобных хозяйств, довольно часто возникают перебои, связанные с закупкой и заготовлением нужного ассортимента кормов для животных и птиц, обеспечивающих сбалансированные питательные рационы. В связи с этим повышается интерес к развитию новых, прогрессивных технологий, позволяющих малым агропредприятиям самостоятельно производить сбалансированные питательные корма. Одним из таких методов является способ гидропонного выращивания зеленых кормов [1, 3, 4].

Гидропонный зеленый корм (ГЗК) – высококачественная экологическая продукция, содержащая полный спектр требуемых питательных веществ и витаминов. Кроме того, ГЗК хорошо поедают и усваивают животные и птицы в целом и измельченном в состоянии [5].

В ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина» разработана одноуровневая гидропонная установка с упругими несущими элементами. В состав данной конструкции входит поверхность для вегетации растений в виде каркасного лотка с плоским перфорированным дном. На плоскую перфорированную поверхность укладывают пленку, на которую производят посев семенного материала (как правило, ячменя). К меньшим торцевым сторонам каркаса лотка приварены цилиндрические сектора (обычно это обрезки цилиндрической трубы длиной 70–80 мм и диаметром 20 мм), которые свободно устанавливаются на дуговые направляющие (радиус направляющих должен составлять 2–3 радиуса цилиндрического сектора). Дуговые направляющие при помощи упругих стержней крепятся к перекрытию производственного помещения.

Работа описанной установки состоит в следующем. Под определенным углом (примерно  $4^\circ$  к горизонту) фиксируют лоток и равномерным слоем производят посев семян ячменя по всей поверхности для вегетации. С ростом урожая ГЗК будет происходить изменение координаты положения общего центра тяжести системы «лоток – урожай» в вертикальном и горизонтальном положениях [6].

По истечении семи–восьми суток высота растений достигает 30 см при ожидаемом урожае с  $1\text{ м}^2$  поверхности вегетации – около 50 кг зеленой массы [1, 3].

При ослаблении элементов, фиксирующих лоток, цилиндрические сектора перекачиваются без скольжения по дуговым направляющим. При повороте каркаса лотка поверхности вегетации на угол  $90^\circ$ , происходит обнуление скорости всей системы, и как следствие, плавная разгрузка зеленой массы. Каркас лотка возвращается в исходное положение под действием сил тяжести [6].

Практикой доказано, что одноуровневые (одноярусные) гидропонные установки имеют ряд преимуществ по сравнению с многоуровневыми, особенно в процессе их эксплуатации на мелких фермерских и подсобных животноводческих хозяйствах. Такая конструктивная особенность установок данного типа будет оказывать положительное влияние, в первую очередь, на системы орошения (полива), освещения и закладки исходного материала (посева). Кроме того, при изготовлении установок такого типа ожидается экономия металла и материалов для каркасных частей лотка, а также несущих конструктивных элементов.

Крепление вегетационной поверхности (лотка) к перекрытию (потолку) осуществляют с помощью стальной проволоки диаметром 1–2 мм (разрывная сила 1600–2000 Н/мм<sup>2</sup>). Такая разрывная прочность при выращивании ГЗК в три–четыре раза выше максимальной статической прочности. Более того, при многоуровневом расположении лотков проволока такого диаметра практически не влияет на распространение световых потоков при облучении выращиваемых растений.

Крепление при помощи шарнира позволяет лотку с урожаем перемещаться в вертикальной плоскости. Лоток с упругими несущими элементами можно рассматривать как физический или математический маятник. Достаточно проблематично решить задачу динамики движения математического или физического маятника в окончательном виде. Приближенное решение этих задач с использованием функций Якоби рассмотрено в [7].

**Цель исследований** – определение жесткостных и массовых комплексных соотношений, обеспечивающих устойчивую динамику движения всех элементов системы в процессе эксплуатации одноуровневой гидропонной установки.

#### **Материалы и методы исследований**

В работе [6] исследована динамика одноуровневой гидропонной установки с упруго-жесткими несущими элементами. В результате проведенных исследований установлено, что в процессе эксплуатации данной гидропонной установки с отмеченными конструктивными особенностями возможны возникновения колебательных процессов, распространяющихся на всю систему в целом. Кроме того, рассчитан критерий, позволяющий исключить явления параметрического резонанса в процессе работы рассматриваемой установки.

Проводимые исследования динамики движения одноуровневой установки носили теоретический характер. Исследовательский аппарат включал в себя использование правил и положений высшей математики, динамики колебательных процессов, а также теоретической механики материальной точки и системы материальных тел [7, 8].

Для определения комплексных массовых и жесткостных соотношений, обеспечивающих устойчивую динамику движения всех элементов гидропонной установки, необходимо произвести математическое описание рассматриваемой системы [9, 10]. Кроме того, следует отметить, что при проведении исследований по данной тематике, часто возникает проблема отсутствия базовой научной литературы в новых изданиях.

Гидропонную установку с упругими несущими элементами можно рассматривать как пружинный маятник. Вопросы, касающиеся динамики движения пружинного маятника, являются более сложными с точки зрения решения, чем вопросы динамики движения стандартных колебательных систем [11].

В зависимости от преследуемой цели решение данной задачи может быть сведено к приближенному определению закона движения пружинного маятника или исследованию устойчивости его движения. Анализ устойчивости движения позволяет определить сочетание геометрических, жесткостных и массовых параметров изучаемого объекта, приемлемых для практической реализации.

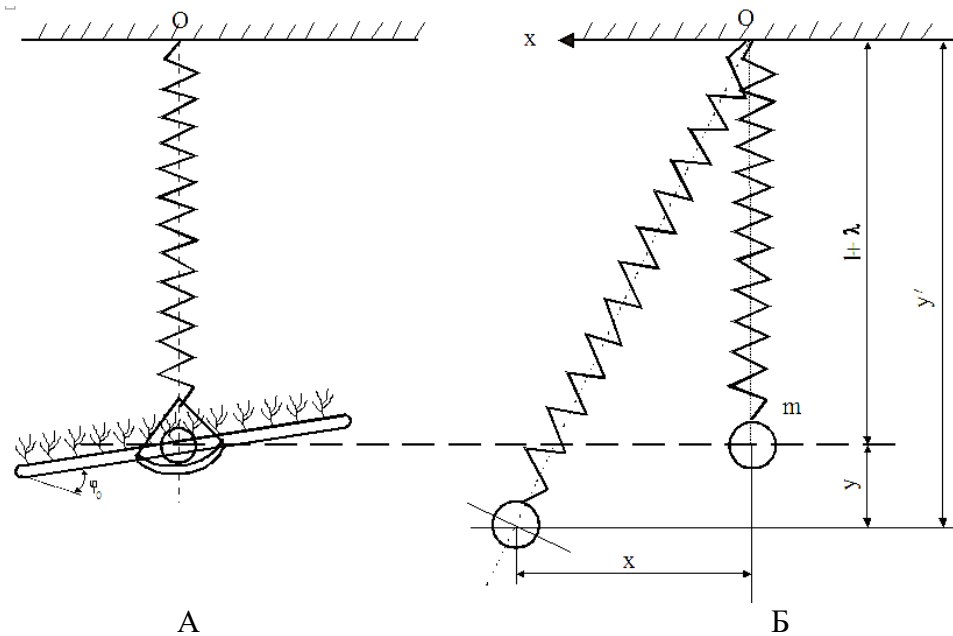
#### **Результаты и их обсуждение**

Рассмотрим движение одноуровневой гидропонной установки как пружинного маятника массы  $m$ , с эквивалентной жесткостью пружины  $C$  и недеформированной ее длины  $l$ . Начало координат модели и расчетной схемы установки помещено в точку подвеса маятника  $O$ , ось  $y$  направим вертикально вниз (рисунок 1). На рисунке (а) представлена механическая модель одноуровневой установки, на рисунке (б) – расчетная схема к ней.

Для вывода дифференциальных уравнений движения лотка использованы дифференциальные уравнения Лагранжа второго рода в форме

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = 0 \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{y}'} \right) - \frac{\partial L}{\partial y'} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $L = T - \Pi$  – функция Лагранжа;  
 $T$  и  $\Pi$  – кинематическая и потенциальная энергии системы соответственно;  
 $x, y'$  – обобщенные координаты;  
 $\dot{x}, \dot{y}'$  – обобщенные скорости.



**Рисунок – Схема к моделированию одноуровневой установки для выращивания ГЗК и ГЗОР**

*Примечание.* А – механическая модель; Б – расчетная модель.

Кинетическая и потенциальная энергии рассматриваемой системы соответственно равны

$$\begin{cases} T = \frac{m}{2}(\dot{x}^2 + \dot{y}'^2) \\ \Pi = \frac{1}{2}C \left[ (x^2 + y'^2) - 2l\sqrt{x^2 + y'^2} \right] mgy' \end{cases} \quad (2)$$

Уравнения в форме Лагранжа второго рода [8] для рассматриваемой системы имеют вид

$$\begin{cases} m\ddot{x} + Cx - \frac{Clx}{\sqrt{x^2 + y'^2}} = 0 \\ m\ddot{y}' + Cy' - \frac{Cly'}{\sqrt{x^2 + y'^2}} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Для дальнейших выводов необходимо ввести динамическую составляющую  $y$ , с учетом того, что  $y' = l + \lambda + y$ ,  $\lambda = mg/C$  – статическое удлинение пружины. С учетом введенной динамической составляющей  $y$ , система уравнений (3) имеет вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + Cx - \frac{Clx}{\sqrt{x^2 + (l + \lambda + y)^2}} = 0 \\ m\ddot{y}' + Cy' - \frac{Cl(l + \lambda + y)}{\sqrt{x^2 + (l + \lambda + y)^2}} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Система уравнений (4) предполагает решение в виде

$$x = 0, y = y_0 \times \cos \omega t, \text{ где } \omega^2 = C/m, y = \text{const}. \quad (5)$$

Согласно исследовательским методикам В. М. Старжинского [9], исследуемую систему необходимо рассматривать как находящуюся в возмущенном движении:

$$x = \xi, y = y_0 \cos \omega t + \eta. \quad (6)$$

С учетом уравнений (6), могут быть получены вариации в первом приближении в виде:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \xi}{dt^2} + \frac{\gamma + \varepsilon \cos \omega t}{1 + \gamma + \varepsilon \cos \omega t} \cdot \xi = 0 \\ \frac{d^2 \eta}{dt^2} + \eta = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

где  $\gamma = \lambda/l$  – коэффициент статического удлинения пружины;

$\varepsilon = y_0/l$  – относительная амплитуда колебаний системы.

Решение первого уравнения системы (7) при  $\xi = 0$  ведет к неустойчивости исследуемого движения ( $x = 0, y = y_0 \times \cos \omega t$ ) рассматриваемой колеблющейся упругой системы [10, 11]. Первое уравнение системы (7) может быть представлено с точностью до малых второго порядка в виде:

$$\frac{d^2 \xi}{dt^2} + [f_0(\gamma) + \varepsilon f_1(\omega t, \gamma) + 0(\varepsilon^2)] \times \xi = 0, \quad (8)$$

где  $f_0(\gamma) = \gamma/1 + \gamma, f_1(\omega t, \gamma) = \frac{1}{(1 + \gamma)^2} \times \cos \omega t$ .

Собственная частота системы, находящейся в невозмущенном состоянии (при  $\varepsilon = 0$ ), может быть рассчитана как:

$$\omega_1 = \sqrt{f_0(\gamma)} = \sqrt{\frac{\gamma}{1 + \gamma}}. \quad (9)$$

Критические значения  $\gamma$  могут быть определены из уравнений:

$2\omega_1 = K$ , при ( $K = 1, 2, 3, \dots, 7$ ),  $\gamma = K^2(4 - K^2)^{-1}$ , где для  $K = 1$ , получено  $\gamma = 1/3$ .

Из неравенства  $\frac{1}{1 + \gamma} \neq 0$  следует, что этому значению отвечает широкая область динамической неустойчивости.

Таким образом, при коэффициенте  $\gamma = mg/Cl \approx 1/3$  вертикальные колебания пружинного маятника неустойчивы, то есть происходит перекачивание энергии колебаний, происходящих в вертикальной плоскости, в энергию поперечных колебаний. Области неустойчивости в плоскости  $\varepsilon\gamma$  (вертикальная плоскость) могут примыкать к оси  $\varepsilon = 0$ , то есть к тем точкам  $\gamma_k$ , которые удовлетворяют уравнению:

$$\sqrt{\frac{\gamma_k}{1+\gamma_k}} = K \quad (10)$$

или:

$$\gamma_k = \frac{K^2}{4-K^2}, \quad (K = 1, 2, 3, \dots, 7) . \quad (11)$$

Тангенс угла наклона касательных определяется по формуле:

$$\pm \left. \frac{(1+\gamma)^2}{2(1+\gamma)^2} \right]_{\gamma=\gamma_1} = \pm \frac{1}{2}. \quad (12)$$

Таким образом, окончательно может быть записано в первом приближении, следующее неравенство:

$$\frac{1}{3} - \frac{1}{2}\varepsilon + \dots \gamma < \frac{1}{3} + \frac{1}{2}\varepsilon + \dots . \quad (13)$$

Необходимо пояснить практическую реализацию полученного в первом приближении неравенства (13). Потеря устойчивости вертикальных колебаний наступает при следующих соотношениях:

$$\gamma = \frac{mg}{cl} \approx \frac{1}{3} \text{ или } \frac{cl}{mg} \approx 3. \quad (14)$$

Если учесть, что  $C = \frac{EF}{l}$ , то соотношения (14) примут вид:

$$\frac{EF}{mg} \approx 3, \quad (15)$$

где  $E = 1,2 \cdot 10^7$ , Н/мм<sup>2</sup>;

$F$  – площадь сечения стальной проволоки (справочная величина).

Из соотношения 15 следует, что для того, чтобы в процессе эксплуатации одноуровневой гидропонной установки наблюдалась устойчивая динамика движения всех элементов системы, необходимо подобрать суммарную массу лотка с урожаем и направляющими, при которой это соотношение не будет выполняться.

При выращивании ГЗК и репчатого лука на перо рекомендовано использовать лотки с площадью вегетационной поверхности 1,0–1,5 м<sup>2</sup>, при этом для несущих упругих элементов гидропонной установки следует использовать стальную проволоку диаметром 2,0–2,5 мм с разрывным усилием не менее 2000 Н/мм<sup>2</sup>.

Что касается выращивания гидропонных зеленых овощных растений (ГЗОР), а именно укропа, петрушки и салата, то несущим элементом может служить стальная проволока диаметром 1 мм с разрывным усилием 1400–1600 Н/мм<sup>2</sup>. Кроме того, для выращивания указанных культур рекомендуемая площадь вегетационной поверхности лотка должна составлять не более 1 м<sup>2</sup>. Данное ограничение площади вегетационной поверхности продиктовано необходимостью сохранения товарного вида выращиваемой продукции.

Предложенная конструкция гидропонной установки может быть использована не только на предприятиях агропромышленного комплекса. С точки зрения правильного и полноценного питания для людей, пребывающих

продолжительное время в научно-исследовательских экспедициях за полярным кругом, или работающих в сфере мореплавания, крайне необходимы витаминизированные добавки в виде свежесобраных зеленых растений. В частности установки с рассматриваемыми конструктивными особенностями могут быть использованы на промысловых и торговых судах дальнего плавания, для выращивания зеленого лука и некоторых видов ГЗОР. При выращивании зеленого лука следует использовать проволоку с разрывным усилием до 1200 Н/мм<sup>2</sup> и лотки с вегетационной площадью 0,6–1,0 м<sup>2</sup>. Такие же установки можно применять при выращивании других видов ГЗОР.

### Выводы

Решение задачи исследования движения одноуровневой гидропонной установки с упругими несущими элементами может быть сведено к приближенному определению закона движения пружинного маятника.

При коэффициенте статического удлинения пружины  $\gamma = 1/3$  вертикальные колебания пружинного маятника неустойчивы, то есть происходит перекачивание энергии колебаний, происходящих в вертикальной плоскости, в энергию поперечных колебаний.

Для обеспечения устойчивой динамики движения всех элементов системы в процессе эксплуатации одноуровневой гидропонной установки необходимо подобрать суммарную массу лотка с урожаем и направляющими, при которой соотношение  $\frac{EF}{mg} \approx 3$  не будет выполняться.

При выращивании ГЗК и репчатого лука на перо рекомендовано использовать лотки с площадью вегетационной поверхности 1,0–1,5 м<sup>2</sup>, при этом для несущих упругих элементов гидропонной установки следует использовать стальную проволоку диаметром 2,0–2,5 мм с разрывным усилием не менее 2000 Н/мм<sup>2</sup>.

При выращивании ГЗОР несущими элементами может служить стальная проволока диаметром 1 мм с разрывным усилием 1400–1600 Н/мм<sup>2</sup>. Для сохранения товарного вида выращиваемых ГЗОР рекомендуемая площадь вегетационной поверхности лотка должна составлять не более 1 м<sup>2</sup>.

Установки с предложенными конструктивными особенностями могут быть использованы на промысловых и торговых судах дальнего плавания, для выращивания зеленого лука и некоторых видов ГЗОР. В процессе выращивания следует использовать проволоку с разрывным усилием до 1200 Н/мм<sup>2</sup> и лотки с вегетационной площадью 0,6–1,0 м<sup>2</sup>.

### Литература

1. Соколенко О. Н. Обоснование параметров работы и конструкции установки для выращивания зеленых кормов гидропонным способом. Дисс. ... канд. техн. наук. Краснодар: ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина», 2015. С. 6–10.
2. 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.
3. Кругляков Ю. А. Оборудование для непрерывного выращивания зеленого корма гидропонным способом. М.: Агропромиздат, 1991. С. 5–24.
4. Васильев А. А., Москаленко С. П., Сивохина Л. А., Коробов А. П., Кузнецов М. Ю. Эффективность использования гидропонного зеленого корма в рационах поросят-отъемышей // Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы сельскохозяйственных наук в России и за рубежом». № 2. Новосибирск: ИНЦРОН, 2015. С. 34–45.
5. Сенько А. Я., Кудинов В. В., Корнилова В. А. Химический состав в зависимости от скармливания ГЗК // Сборник научных трудов «Актуальные проблемы и перспективы развития животноводства». Самара: ГСХА, 2002. С. 101–103.

6. Соколенко О. Н. Количественные показатели химического состава гидропонного зеленого корма // Рыбное хозяйство Украины. 2007. Вып. 7. С. 94–96.
7. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики. М.: Высшая школа, 2010. С. 232–250.
8. Барбашова Т. Ф., Кугушев Е. И., Попов Т. В. Теоретическая механика в задачах. Лагранжева механика. Гамильтонова механика. М.: МЦНМО, 2013. С. 7–186.
9. Ланда П. С. Нелинейные колебания и волны. М.: Наука, Физматлит, 2019. С. 153–169.
10. Ананьев И. В. Справочник по расчету собственных колебаний упругих систем. М.: ОГИЗ Гостехиздат, 1946. С. 124–247.
11. Бутенин Н. В. Введение в теорию нелинейных колебаний. М.: Наука, 1987. С. 200–218.

### Reference

1. Sokolenko O. N. Justification of the operation parameters and design of the installation for growing green fodder in the hydroponic way. Diss. ... Cand. Sc. (Tech.). Krasnodar, FSBEI HE "Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin", 2015. P. 6–10.
2. Kurasov V. S., Sokolenko O. N. To the question of substantiating the design parameters of a mechanical installation with elastic-rigid load-bearing elements // Polytopical Network Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University. 2016. No. 4 (118). P. 1037–1049.
3. Kruglyakov Y. A. Equipment for the continuous cultivation of green fodder in the hydroponic way. Moscow: Agropromizdat, 1991. P. 5–24.
4. 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". Novosibirsk, Innovative Development Center of Education and Science (IDCES) No. 2. 2015. P. 34–45.
5. Senko A. Ya., Kudinov V. V., Kornilova V. A. Chemical composition depending on the feeding of HGF // Collection of scientific papers "Actual problems and prospects for the development of animal husbandry". Samara: State Agricultural Academy, 2002. P. 101–103.
6. Sokolenko O. N. On the issue of the motion dynamics of a single-tier hydroponic installation with elastic-rigid load-bearing elements // Vestnik AIC of Stavropol. 2017. No. 2 (26). P. 40–43.
7. Targ S. M. Short course of theoretical mechanics. Moscow: Vysshaya Shkola, 2010. P. 232–250.
8. 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.
9. Landa P. S. Nonlinear vibrations and waves. Moscow: Nauka, Fizmatlit, 2019. P. 153–169.
10. Ananyev I. V. Handbook for calculating the natural vibrations of elastic systems. Moscow: Gostekhizdat, 1946. P. 124–247.
11. 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.

### RESEARCH OF DYNAMICS OF MOTION OF A SINGLE-LEVEL HYDROPONIC INSTALLATION WITH ELASTIC LOAD-BEARING ELEMENTS

*Summary.* Hydroponic green fodder (HGF) is a high-quality ecological product containing the full range of required nutrients and vitamins. A single-level hydroponic installation with elastic load-bearing elements was developed in FSBEI HE Kuban SAU "Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin". The purpose of the research is to determine the mass-and-stiffness complex ratios that provide stable motion dynamics of all elements of the system during operation of a single-level hydroponic installation. The task of studying the motion of a single-level hydroponic installation with elastic load-bearing elements is confined to an approximate determination of the law of motion of a spring pendulum. With the coefficient of static elongation of the spring  $\gamma = 1/3$ , the spring pendulum heaving oscillations are unstable, i.e. the energy of vibrations occurring in the vertical plane is pumped into the energy of transversal oscillations. To ensure stable dynamics of the movement of all elements of a single-level hydroponic installation, it is necessary to select the total mass of the tray with a crop and guides, at which the mass-



and-stiffness complex ratio  $\frac{EF}{mg} \approx 3$  will not be satisfied. When growing HGF and sprouting onions, trays with a vegetation surface area of 1.0–1.5 m<sup>2</sup> are used, while for supporting elastic elements of a hydroponic installation, a steel wire with a diameter of 2.0–2.5 mm with a tensile strength of at least 2000 N/mm<sup>2</sup> should be used. When growing hydroponic green vegetable plants (HGVP), the load-bearing element is the steel wire with a diameter of 1 mm with a tensile strength of 1400–1600 N/mm<sup>2</sup>. To preserve the marketable state of the grown HGVP, the recommended vegetation surface area of the tray should be not more than 1 m<sup>2</sup>.

**Keywords:** hydroponic installation, hydroponic green fodder (HGF), hydroponic green vegetable plants (HGVP), spring pendulum, Lagrange differential equations, motion dynamics, load-bearing elements, tensile strength.

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

Sokolenko Oksana Nikolaevna, Candidate of Sc. (Tech.), assistant professor of the Department of Tractors, automobiles 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.

*Дата поступления в редакцию – 27.01.2020.*

*Дата принятия к печати – 10.03.2020.*