

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ТЕЛО ВРЕДИТЕЛЯ РАСТЕНИЙ

Г. И. СОКОЛ, д. т. н., проф.; Т. А. РЫБАЛКА, студентка

*Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара ,
физико-технический факультет, кафедра технической механики
49010 г. Днепропетровск - 10, ГСП, пр Гагарина, 72.
Раб. тел (056) 373-12-60. E-mail: gsokol@ukr.net, trybalka@mail.ru*

Разработаны методики для определения резонансной частоты сердца колорадского жука, основанные на представлениях сердца как тонкого стержня из мышечной ткани и моделировании сердца многокамерной системой. Рассчитана резонансная частота сердца на основе метода электромеханических аналогий. Доказано, что колорадский жук погиб от повреждения сердечной системы при воздействии на него вибраций и акустических колебаний.

ВВЕДЕНИЕ

Используя широкие возможности прогрессивных технологий, разработаны новые способы уничтожения вредителей растений. Среди них наиболее популярны химические, механические и электромагнитные способы [1, 2]. Каждый из приведенных способов уничтожения по-своему эффективен, но оказывает вредное влияние на человека и окружающую среду. Поэтому, опираясь на сведения о негативном воздействии акустических колебаний определенных частот на живые организмы, разработан и запатентован новый метод уничтожения вредителя растений: колорадского жука.

Целью настоящей работы является моделирование акустического воздействия на тело и отдельные органы колорадского жука.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИОЛОГИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

В основу акустического способа [3] уничтожения колорадского жука положен физический принцип, заключающийся в механическом воздействии на ткани органов жука давлением с последующим их разрывом. Способ, от разработанных ранее, отличается тем, что механическое воздействие производят акустическими колебаниями с амплитудой звукового давления в воздухе, равной отношению силы разрыва соединительных тканей и органов жука к их площади сечения, с частотой, равной собственной частоте тела жука или собственной частоте одного из его жизненно важных органов. Экспериментально определены резонансные частоты органов человека [4]. Они лежат в области частот, ниже 60 Гц. Частотный диапазон резонансных частот отдельных органов человека (голова 20-100 Гц, вестибулярный аппарат от 0,5 до 13 Гц, сердце от 4 до 6 Гц). Губительные резонансные частоты колебаний для вредителей растений в литературе не приводятся.

Вид уравнений, описывающих колебательные движения тканей органов биологического объекта, определяются принятыми аппроксимациями, допущениями, границы, применимости которых должны выводиться из основных законов физики изучаемых явлений. Условно выделяют конструкции, состоящие из твердых биологических материалов (кости) или мягких (мышцы, сосуды, легкие, сердце и т.п.)

тканей. Для построения математической модели колебания тканей органов биологического объекта необходимы экспериментальные исследования их физико-механических и структурных характеристик.

Если поведение упругого тела промоделировать с помощью пружины, а вязкого тела - с помощью поршня в цилиндре, то поведение реальной механической системы можно математически представить и описать с помощью моделей из различных вязких и упругих элементов. Уравнение движения тела вредителя растений как вязкоупругой колебательной системы имеет вид [4, 5]

$$\ddot{\delta} + (k_{\delta} / m_{\text{жс}}) \dot{\delta} + (C_{\text{жс}} / m_{\text{жс}}) \delta = a(t) \quad (1)$$

где $m_{\text{жс}}$ – масса, k_{δ} – коэффициент демпфирования, $C_{\text{жс}}$ – коэффициент жесткости, δ – деформация, a – ускорение.

Резонансная частота колебаний $f_{\text{жс}}$ вязкоупругого тела определяется как

$$f_{\text{жс}} = 1 / 2\pi \sqrt{C_{\text{жс}} / m_{\text{жс}}} \quad (2)$$

Согласно [4, 5] тело жука рассматриваем как систему из механических элементов, обладающих инерционными, упругими, демпфирующими свойствами. В этом случае система имеет собственную резонансную частоту $f_{\text{жс}}$. Тогда уничтожение жука возможно на резонансной частоте какого-либо жизненно важного органа.

Интерес представляют имеющиеся в литературе данные о механических характеристиках биологических тканей (кожа, мышцы, ткани внутренних органов, костей, хрящей и т.д.). В работе Т.Н. Пашовкина и А.П. Сарвазяна [6] высказано предположение, что высокая информативность механических характеристик обусловлена наличием и качеством контактов между элементами, составляющими ткань. Было предложено оценки механических характеристик биологических тканей проводить по динамическому модулю сдвига, динамической вязкости. Приведены данные о вязкоупругих свойствах мягких тканей (почек, печени, сердца, кишечника, селезенки, кожи, мозга) кроликов, лягушек, кур и кожного покрова человека. Механические характеристики ткани вредителей растений в работе не исследовались.

ВОЗДЕЙСТВИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН НА ТЕЛО ВРЕДИТЕЛЯ РАСТЕНИЙ

Когда тело вредного насекомого помещается в акустическое поле (см. рис. 1, на котором представлена схема воздействия акустических волн на тело насекомого), то волновое воздействие описывается избыточным, то есть звуковым давлением p_i , которое находится из уравнения для плоской волны

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c_0^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2},$$

где p – звуковое давление, t – время, c_0 – скорость звука, x – координата.

Его решение для p_i имеет известный вид

$$p_i = p_m \sin \omega t,$$

где p_m – амплитудное значение звукового давления, ω – круговая частота.

То есть на панцирь действует переменное давление с амплитудой p_m . Проникая через панцирь, акустические волны воздействуют на внутренние органы. Значение уровня p_m , равное 120 дБ и губительное для жука, было определено экспериментально [4, 5]. Поэтому дальнейшие усилия в моделировании были направлены на определение

частотных характеристик того органа, ткани которого могли быть подвержены разрыву. Предположительно, этот орган должен представлять собой некую механическую систему, обладающую резонансными качествами. Для лабораторного опробования акустического метода уничтожения вредного насекомого использовались вибростенд УВЭ-100/5-3000 и весы [5]. Масса вредных насекомых, подвергнутых воздействию акустическими волнами, составляла 100 - 250 мг. Время воздействия было ограничено 2 - 3,5 минутами. Воздействие проводилось на фиксированной частоте в диапазоне 900 - 1500 Гц. Насекомое подвешивалось в марлевом мешочке над столом вибростенда на расстоянии от поверхности стола 0,2 - 0,7 м. Уровень звукового давления измерялся микрофоном, который находился рядом с телом насекомого, шумомером ИШВ-1.

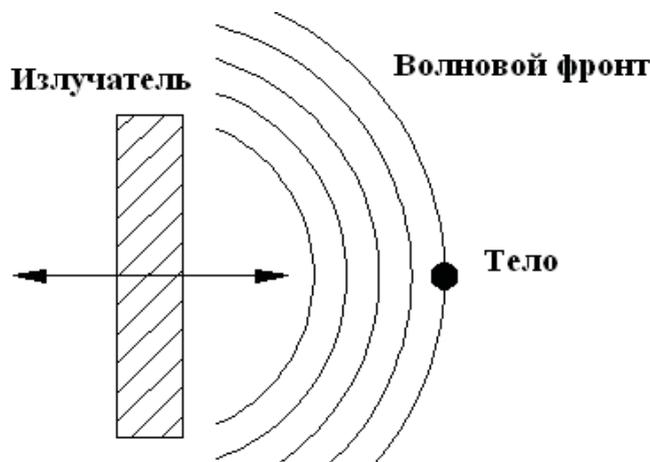


Рис. 1

Осмотр вредных насекомых непосредственно после воздействия показал, что без признаков жизни было вредное насекомое массой 110 мг подвергшееся воздействию акустических волн частотой 1000 Гц. Осмотр вредного насекомого через 6 часов показал, что действительно наступила биологическая смерть указанного вредного насекомого. Проведенный осмотр вредных насекомых через 24 часа выявил, что наступила биологическая смерть всех вредных насекомых, подвергшихся акустическим воздействиям. Полученные результаты подтвердили возможность уничтожения вредных насекомых акустическими волнами. Для проведения экспериментальных исследований с целью подтверждения предложенного способа осуществлено проектирование и изготовление действующего макета акустического генератора [5]. Испытание воздействия акустических волн на вредных насекомых было проведено в полевых условиях дачного участка. Для проведения испытаний и осуществления необходимых измерений была собрана схема, состоящая из генератора и измерительных приборов. Куст картофеля, на котором находились вредители, полностью накрывался концентратором акустической энергии. Анализирующий и вычислительный комплекс состоял из блока питания БП, микрофона МК и компьютера.

По результатам проведенных экспериментов рассчитана жесткость тела колорадского жука, ее величина составила $C_{жк} = 8,86 \times 10^6 \text{ Н / м}$. (Прикидочный расчет величины жесткости печени человека дал величину $4 \times 10^6 \text{ Н / м}$).

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ СЕРДЦА КОЛОРАДСКОГО ЖУКА

Изучение строения органов колорадского жука, описание которых приведено в [7], показало, что, предположительно негативное влияние вибрационными и акустическими колебаниями было оказано на сердце насекомого.

Аппроксимируем механическую модель сердца колорадского жука на основе известных моделей акустических систем. Учтём, что длина тела насекомого ~ 1 см, а ширина ~ 7 мм. Строение тела жука состоит из головы, груди, брюшка, то длина брюшка равна примерно 8 мм. Сердце проходит через все брюшко в виде многокамерной механической системы [7], один конец которой обычно замкнут (см. рис. 2, 3) и на первый взгляд напоминает длинную тонкую трубку. Длина всей сердечной системы $L \sim 8$ мм. Брюшной отдел имеет 9 – 10 сегментов, сердце вздуто в каждом сегменте. В первом брюшном сегменте обособленной камеры часто нет. Таким образом, при условии, что брюшной отдел жука имеет 9 сегментов, то количество камер – 8 и они наполнены кровью. Сегменты соединены остиями. Через остии кровь движется из перикардиального синуса в сердце, кроме того, они регулируют это движение. Остии представляют собой отверстия в боковой стенке сердца. Основные характеристики сердца колорадского жука определялись не путем измерений, а по габаритным размерам, приведенным на рисунках в энциклопедии [10]. На рисунке 3 представлены: a_1, a_2, \dots – остии сердечной системы находящиеся внутри камер и соединяющие их между собой, индекс указывает принадлежность остии к передней или задней камере соответственно [7].

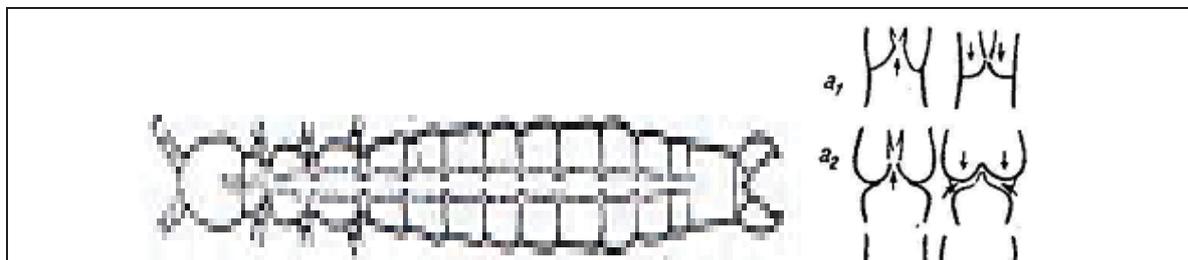


Рис.2

Рис. 3

На первом этапе аппроксимируем сердце трубой с жесткими стенками, закрытой с одного конца, и длиной L . Используем метод расчета резонансной частоты для трубы закрытой с одного конца, изложенный у Е. Скучика [8].

Расчет резонансной частоты модели дал результат: $f_{рез} = c / 4L = 46875$ Гц (c – скорость звука в жидкости типа крови, $c = 1500$ м/с). Полученный результат не отвечает диапазону частот, при которых зафиксирована гибель колорадского жука в проведенных вибрационных экспериментах [5]. Гибель жука была зарегистрирована на частотах 1000 – 1500 Гц. Поэтому разработана вторая модель сердца колорадского жука как акустической системы на основе метода электромеханических аналогий (см. рис. 4) [9]. Представим сердечную систему в виде последовательно соединенных камер, напоминающих своеобразный фильтр (см. рис. 4).

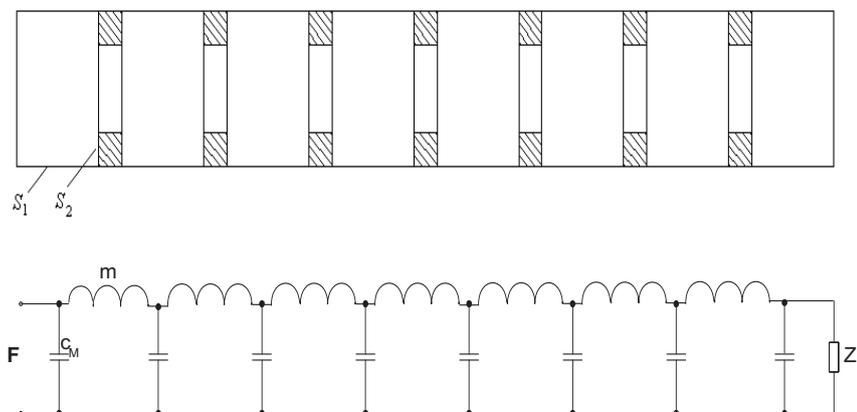


Рис. 4

Определяем массу сердца как

$$m = \rho l S_2, \quad (3)$$

где ρ - плотность крови, l - длина сечения остий, S_2 - площадь поперечного сечения остии.

Жесткость объема отдельной камеры по [9] равна

$$C_M = V/\gamma p_{ac} S_2^2, \quad (4)$$

где V - объём камеры, γ - удельный вес крови, p_{ac} - давление внутри камеры.

В схеме модели сердца имеем 8 камер, расположенных по длине всей сердечной системы $L = 6\text{мм} = 6 \times 10^{-3}\text{м}$. Для расчета используем данные: длина одной из камер сердечной системы $l_k = 7,5 \times 10^{-4}\text{м}$, площадь поперечного сечения камер $S_1 = \pi d_1^2/4 \approx 1 \times 10^{-3}\text{м}^2$, где d_1 - диаметр камеры.

На основе размеров тела жука, приведенных в [10] принимаем, что высота тела колорадского жука $\sim 3.5\text{мм}$, а диаметр остии примерно равен 1/7 от диаметра тела насекомого, тогда имеем данные для расчета: $d_1 = 5 \times 10^{-4}\text{м}$. Плотность крови составляет $\rho = 1 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$. Согласно [3] масса одной камеры $m = 7,5 \times 10^{-8}\text{кг}$. Тогда суммарная масса имеющихся камер $m_\Sigma = 6 \times 10^{-7}\text{кг}$. Объем V одной камеры массой m равен $V = m/\rho = 7,5 \times 10^{-11}\text{м}^3$

Считаем, что акустическое давление крови внутри камеры составляет $p_{ac} = 200 \text{ Н/м}^2$, а удельный вес $\gamma = 9810 \text{ Н/м}^3$. Гибкость полости одной из камер $K = V/\gamma p_{ac} S_2^2 = 3,8 \times 10^{-3} \text{ м/Н}$. Для многокамерного сердца насекомого жесткость имеющихся камер C_Σ может быть записана как

$$\frac{1}{C_\Sigma} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_8} \quad (5)$$

где C_1, C_2, \dots, C_8 - величины жесткостей, которые отвечают соответствующей камере в сердечной системе насекомого.

Жесткость одной камеры $C = 1/K = 263 \text{ Н/м}$. Согласно (5) определим суммарную жесткость имеющихся камер $\frac{1}{C_\Sigma} = \frac{1}{263} \times 8 = 3,04 \times 10^{-2} \text{ Н/м}$. Следовательно $C_\Sigma = 32,8 \text{ Н/м}$.

Резонансная частота сердца колорадского жука составила $f = 1179 \text{ Гц}$.

Полученный результат отвечает диапазону резонансных частот, которые были определены как губительные для колорадского жука во время проведенных испытаний.

Можно сказать, что колорадский жук во время воздействий на него вибраций и акустических колебаний погиб от повреждения сердечной системы.

Предлагаем третий метод определения резонансной частоты сердца колорадского жука на основе данных работы Ю.Ч. Фына [11]. Используя их можно рассчитать жесткость и упругость капиллярной мышцы сердца насекомого. Ю.Ч. Фын разработал кривые зависимости удлинения от нагрузки для образца сердечной капиллярной мышцы кролика при периодической нагрузке и разгрузке с постоянной скоростью. Исследования проведены при температуре 37 °С, удлинение мышцы составило $L_0 = 0.936$ см. Воспользовавшись полученными данными, рассчитаем жесткость и упругость капиллярной мышцы колорадского жука. Считаем при этом, что капиллярные мышцы сердца кролика и колорадского жука имеют одинаковые механические характеристики. Действительная сила $F = 0,01$ кг, удлинение мышцы насекомого $x = 1 / 0,12$ м. Тогда жесткость мышцы сердца составляет величину $C = F / x = 0.0012$ кг/м, а гибкость $K = 1 / C = 833.3$ Н/м.

Определим резонансную частоту сердца колорадского жука, используя ранее полученные значения массы по (3).

Резонансная частота сердца колорадского жука составила $f = 638$ Гц. Этот результат по своему порядку также близок к тем частотам, что оказались губительными для колорадского жука во время воздействия вибрациями. Таким образом, полученный результат подтверждает, что в результате исследований, колорадский жук погиб из-за повреждения сердца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Опробовано губительное действие акустических волн на колорадского жука в лабораторных условиях. Получен эффект гибели жука при воздействии на него акустическими волнами в условиях лабораторного бокса.

2. Создана методика по определению динамических характеристик тела отдельных особей вредителя растений – колорадского жука: массы, жесткости и резонансной частоты.

3. Разработаны методики по определению резонансной частоты сердца колорадского жука, основанные на представлениях сердца как тонкого стержня из мышечной ткани и моделировании сердца многокамерной системой на основе метода электромеханических аналогий. Доказано, что колорадский жук погиб от повреждения сердечной системы при воздействии на него вибраций и акустических колебаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кошиць Ю. Ш.** Електронна концепція боротьби з гризунами і захист об'єктів соціально-цивільної виробничої сфери при проектуванні і будівництві./ Ю.Ш. Кошиць, О.Г. Лейко, О.Ф. Омельченко, Ю.О. Федоренко // Будівництво України.- 1999.- № 1.- С. 30-31.
2. **Верещагин Б.В.** Воздействие на этмофауну авиацимических обработок лесов Молдавии / Верещагин Б.В., Плугару С.П. // Респуб. науч.-техн. конф по охране природы, сентябрь 1972г., Кишинев:Сб. тезисов докладов. – Кишинев, Изд-во ЦК КП Молдавии, 1973. – 85с.
3. **Сокол Г. І.** Акустичний спосіб знищення колорадського жука і пристрій для його здійснення / Г.І. Сокол, А.В. Сокол, Т.В. Сокол // Патент на винахід № 25548 А

- Україна, А01М 1 / 4,1 / 08. – 1998.
4. **Вибрации в технике:** Справочник. В 6-ти томах / Под ред. К.В. Фролова. – т.6. Защита от вибраций и ударов. – М.: Машиностроение, 1981. – 456с.
 5. **Сокол Г. И.** Вибрационные технологии в определении жесткости и резонансной частоты тел насекомых / Г. И. Сокол, О. М. Дуплищева // Вібрації в техніці та технологіях. – 2007. – № 1 (46). – С. 20 - 24.
 6. **Пашовкин Т. Н.** Механические характеристики мягких биологических тканей / Т.Н. Пашовкин, А.П. Сарвазян // Методы вибрационной диагностики реологических характеристик мягких материалов и биологических тканей. – Горький: УПФ, АН СССР, 1989. – С. 105 - 115.
 7. **Шванвич Б. И.** Курс общей энтомологии / Б. И. Шванвич – М.: Советская наука, 1949. – 544 с.
 8. **Скучик Е.** Основы акустики / Е. Скучик – М.: Мир, 1976. – Т. 1, 2. – 542 с.
 9. **Сапожков М. А.** Электроакустика / М. А. Сапожков – М.: Связь, 1978. – 272 с.
 10. **Энциклопедический словарь:** в 86 т. – Репр. воспр. изд. ”Энциклопедический словарь Ф. А. Брокгауза и И. А. Ефрона” – СПб.: Фирма “ПОЛРАДИС”, АОТ “Иван Федоров”, 1993 – 1998, том 6 – 14А (28) – 450 с. ISBN 5 – 900741 – 01 – X
 11. **Фын Ю. Ч.** Биомеханика / Ю. Ч. Фын // Теоретическая и прикладная механика: Тр. XIV межд. конгресса ИУТАМ – М.: Мир, 1979. – С. 100 – 133.