
ПРОБЛЕМЫ КОСМИЧНОЙ БИОЛОГИИ

УДК 534.7

Г. И. Сокол, Т. А. Рыбалка

МЕХАНИЗМ ВОЗДЕЙСТВИЯ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА СЕРДЕЧНУЮ СИСТЕМУ НАСЕКОМОГО

Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара

Выяснен механизм воздействия акустических колебаний в окружающей среде на сердце отдельных особей вредителя растений – колорадского жука. Разработана новая методика по определению динамических характеристик сердца насекомых. Сделан вывод, что насекомые гибнут от воздействия на них акустических колебаний.

Ключевые слова: механизм воздействия, акустические колебания, насекомое, гибель, сердце, моделирование, метод, электромеханические аналогии.

Г. І. Сокол, Т. А. Рибалка

Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара

З'ЯСУВАННЯ МЕХАНІЗМУ ВПЛИВУ АКУСТИЧНИХ КОЛИВАНЬ НА СЕРЦЕВУ СИСТЕМУ КОМАХИ

З'ясовано, згідно якого механізму виникає вплив акустичних коливань у доквіллі на серце окремих особів шкідника рослин: колорадського жука. Розроблена нова методика, що може бути використана для визначення динамічних характеристик серця комах. Зроблено висновок, що до загибелі комах може призвести вплив акустичних коливань.

Ключові слова: механізм, вплив, акустичні коливання, комаха, загибель, серце, моделювання, метод, електромеханічні аналогії.

G. I. Sokol, T. A. Rybalka

O. Gonchar Dnipropetrovsk National University

MECHANISM OF ACOUSTIC VIBRATION IMPACT ON THE CARDIAC SYSTEM OF AN INSECT

The mechanism of influence of acoustic waves in surrounding environment on the heart of separate plant pests – Colorado beetles is ascertained. A new method to define dynamic characteristics of insect's heart is developed. It is concluded that the death of insects is possible under the influence of acoustic waves.

Key words: mechanism, influence, acoustic vibrations, insect, death, heart, modeling, method, electromechanical analogy.

Природа – это дом для диких животных, для птиц, зверей и насекомых, змей и червей. Этот же дом стал окружающей средой для различного вида машин и механизмов. Работу машин сопровождают различные физические поля: тепловые, акустические, электромагнитные, радиационные. Природа и окружающая среда во взаимосвязи и стали объектом для экологии. В работах С. Н. Романова (1991), Г. И. Сокол (2000), Г. И. Сокол и О. М. Дуплищевой (2007) приводятся сведения о механизме воздействия звуковой вибрации на биологические существа. Смертельный исход от воздействия вибрационными колебаниями наблюдался в экспериментах с насекомыми и животными. Определено, на какой частоте погибло насекомое

© Сокол Г. И., Рыбалка Т. А., 2012

определенной массы. Скорость гибели животных повышалась с увеличением амплитуды колебаний. В серии экспериментов было показано, что смертельный исход от действия вибрации наступает в результате смещения органов. Каждый орган обладает своей массой, своими динамическими свойствами, и в силу этого при вибрации тела насекомого и животного, как, впрочем, и человека, в той или иной области возникает явление резонанса. Так же действуют на живые организмы и акустические колебания. Ограничим круг наших исследований взаимодействием акустических полей с организмами живых насекомых.

Целью настоящей работы является выяснение экологических аспектов механизма взаимодействия акустических колебаний в окружающей среде с органами и телами насекомых, а также применение этих исследований в моделировании взаимодействия акустических колебаний с динамической механической системой сердца вредителя растений – на колорадского жука.

Насекомое колорадский жук и механическая структура его тела

Класс насекомых – это самый многочисленный класс, включающий более 1 млн. видов. Насекомые заселили самые различные наземные местообитания, почву, пресные водоемы, побережье морей. Большое разнообразие местообитаний в наземной среде способствовало видообразованию и широкому расселению этой многочисленной группы членистоногих. Большинство насекомых приносит пользу как опылители растений, некоторые виды производят вещества (мед, воск, лак, шелк), которые используются как пищевые продукты и сырье для промышленности. С помощью большой биомассы и разнообразности трофических связей насекомые принимают участие в кругообороте веществ в биосфере, в процессах почвообразования. Среди числа насекомых, которые не приносят пользу, имеются вредители лесных и сельскохозяйственных культур, носители болезней растений, животных и человека. Например, картофельный или колорадский жук (*Leptinotarsa, Doryphora, decemlineata* Say). Он принадлежит к семейству листогрызцов (*Crysomelidae*), до 1 см длины и до 7 мм ширины. Тело красновато-желтое, надкрылья светло-желтые, с 5 черными продольными полосками; на грудном щите несколько черных точек, местами сливающихся в пятна; вершина утолщающихся усиков и задний край головы тоже черные. Картофельный жук впервые был найден и описан в 1823 г. в Скалистых горах, где жил и питался за счет дикорастущих представителей семейства пасленовых (*Solaneae*); впоследствии же перешел на картофельные плантации колонистов. Первые произведенные им опустошения замечены были в 1859 г. в штате Колорадо – отсюда и название жука (Шванвич, 1949; Энциклопедический словарь, 1993–1998).

Воздействие акустического поля

Среда, окружающая живые существа, насыщена физическими полями различного характера, одним из видов которых является акустическое. Оно оказывает как позитивное, так и негативное влияние на биологические объекты. Это тепловой эффект в ультразвуковой терапии, использование ультразвуковых исследований (УЗИ) для диагностики человеческого организма, применение виброакустических колебаний в приборах типа «Витафон» для лечения заболеваний человека (Аппарат ..., 1994). Особым случаем является совпадение резонансных частот отдельных органов человека с некоторыми частотами акустических полей (Сокол, 2000). Акустические поля взаимодействуют с организмами многих живых существ. В работе А. Г. Лейко и его соавторов (1999) изложена концепция борьбы с грызунами и защита объектов производственной сферы акустическими методами. А. А. Землякова и В. Н. Олийных моделировали (2005) акустомеханические свойства компонент, формирующих мышечную ткань туловища и руки человека.

Губительное действие акустических колебаний с высоким уровнем интенсивности на живые организмы живых существ вследствие проведения рок-концертов на природе, описано в работе П. А. Семилетова. Автор приводит доказательства того вреда, который наносит человек, вторгаясь в мир природы, когда

устраиваются музыкальные концерты и фестивали в живописных местах нашей природы. При этом устанавливается сверхмощная акустическая аппаратура, громкость звучания которой заставляет дрожать все окрестности. Автор статьи П. Семилетов разделил согласно общепринятой трактовке воздействие на два вида: громкостью и частотами. Громкость рок-концертов приближена к критической черте, которая определяет насколько уровни звука в децибелах (дБ) вредны для человека. Шум обычного дождя в 50 дБ создает вибрацию в почве, которая панически заставляет дождевых червей выползать из нор. Уровень звука при рок-концерте составляет 130 дБ. Насколько губительно воздействие при проведении концерта с громкостью 130 дБ на дождевых червей, если сцена сооружена прямо в поле? Из музыки рок-концертов исчезают тихие звуки, остаются только громкие и очень громкие. Причем, у животных и насекомых порог слышимости гораздо ниже, чем у человека. Шепот трав для них – как человеческая громкая речь. Каково же тогда воздействие звуков от музыкальных инструментов, аплодисментов, топая ногами в знак удовольствия?

Грызуны улавливают колебания от 19 000 до 70 000 Гц. Воздействие на таких частотах заставляет их покидать поле и не возвращаться туда минимум неделю. Уровень в 95 дБ им уже безразличен. Люди, которые держали у себя дома хомячков, но применили для отпугивания мышей акустическое устройство, увидели, как у их любимцев выпучивались глаза, вылезала шерсть, а затем следовала смерть.

П. Семилетов приводит факт, когда один из рок-концертов был столь громким, что сейсмографы университета Амстердама зарегистрировали землетрясение. Рок-концерты все чаще стали сопровождать усиленные звуки низких частот. В то же время резонансные частоты органов человека лежат в инфразвуковом диапазоне (1–32 Гц), резонансная частота сердца собаки – 20–40 Гц, а крыс и хомячков – 40–60 Гц. Вот почему в цирке для усиления ощущения тревоги при исполнении опасных номеров используют инфразвук от барабанной дроби.

Скрипка играет на частотах, близких к 1500 Гц. Высокий уровень громкости звука на такой частоте может оказаться губительным для насекомых.

Вскрытие кроликов, которые были подвергнуты высокоинтенсивным вибрационным колебаниям, показало, что смерть наступила от кровоизлияния (то есть разрыва тканей с последующим кровоизлиянием) в легких, кишечнике, печени. Чувствительность к вибрации у кузнечика в тысячу раз выше, чем у человека. Пауки улавливают звуки от пролетающей мухи в нескольких сантиметрах от них. Звук интенсивностью 80–100 Б при частотах 1000–3000 Гц вызывает в изолированных клетках повреждения, которые регистрировались с помощью красителей. В этом диапазоне частот играет большинство музыкальных инструментов.

Рассмотрим, какой же орган у насекомых реагирует на воздействие акустических полей. Знание резонансных частот их тел или отдельных органов здесь крайне необходимо.

Разработка моделей сердечной системы насекомых и методов расчета резонансных частот

Метод определения резонансных частот тел живых организмов разработан профессором И. К. Косьюко (1971). Человеческое тело с точки зрения динамики представляет собой сложную механическую многомассовую систему и обладает рядом собственных парциальных частот. Ранее (Вибрации в технике, 1981) экспериментальным путем установлены вертикальные колебания тела стоящего человека 5–12 Гц, сидящего человека 4–6 Гц, головы 20–30 Гц, руки 30–40 Гц.

Для проведения расчетов составляется физическая модель колеблющейся системы органа или всего тела живого организма и затем расчетная схема. Схема изображается в виде дискретных масс, связанных между собой упругими связями. Важную роль здесь играет коэффициент жесткости системы. Метод позволяет определить резонансные частоты колебаний органов и тела человека, в частности, космонавта.

На схеме модели человека, предложенной профессором И. К. Косько (рис. 1), введены обозначения: 1 – голова, 2 – шейный отдел позвоночника, 3 – легкие, 4 – позвоночник, 5 – брюшная полость, 6 – грудная клетка.

Модель живого организма, представленную в работах И. К. Косько, сложно использовать для определения резонансной частоты тела насекомого, так как необходимо знать характеристики живых тканей органов. При препарировании тела насекомого можно определить массы отдельных органов, но жесткости живых и мертвых тканей существенно отличаются.

В работе Г. И. Сокол и Т. А. Рыбалки (2008) рассмотрен пример исследования резонансной частоты системы «паутина с насекомым». Паутина обладает известной упругостью, а тело насекомого – определенной массой. Такая система имеет некоторую собственную частоту колебаний, которая зависит от массы этого насекомого, от жесткости паутины и от демпфирующих факторов. Определена частота сокращений летательной мышцы насекомых (Сапожков, 1978; Сокол, 2008). Если мышцу раздражали током в то время, когда вибратор имитировал некоторый не слишком сильно задемпфированный груз, обладающий жесткостью и массой, то мышца производила осциллирующие сокращения. Частота этих сокращений зависела как от жесткости, так и от массы груза. Во всех приведенных выше работах не исследованы резонансные свойства тел вредителей растений.

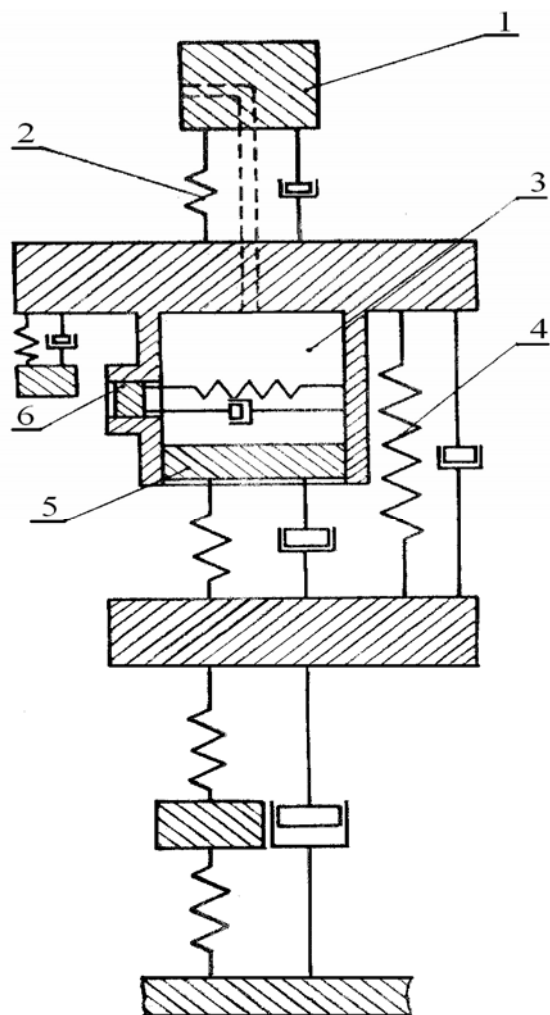


Рис. 1. Модель тела человека как многомассовой системы

Возникает вопрос о полосе частот воздействия, приводящих к уничтожению насекомых, о жесткости их тел и о массе их органов и тел.

Поэтому одним из этапов исследования стала разработка методики измерения и расчета, указанных трех величин. Именно знание этих трех характеристик позволяет выяснить, как вибрационные или акустические колебания взаимодействуют с биологическими объектами, которые являются вязкоупругой системой. Методику будем развивать на примере насекомого – колорадского жука. Тело жука рассматриваем как сложную систему, состоящую из механических элементов, обладающих инерционными, упругими, демпфирующими свойствами.

В работе Г. И. Сокол и О. М. Дуплищевой (2007) из экспериментальных исследований получено, что величина жесткости тела колорадского жука составила $\kappa = 8,86 \cdot 10^6$ Н/м. По данным Энциклопедического словаря (1993–1998), пищеварительные органы жука не имеют печени в своем составе, но имеют ярко выраженную многокамерную акустическую резонансную систему, представляющую собой сердце. Поэтому дальнейшее моделирование разрыва тканей органов вредителя при воздействии на его тело колебаний основано на описании его сердца.

При моделировании были учтены размеры тела насекомого и его отдельных органов (Энциклопедический словарь, 1993–1998). Длина тела насекомого ≈ 10 мм, а ширина ≈ 7 мм. Тело жука состоит из головы, груди, брюшка. Примерная длина брюшка около 8 мм. Сердце проходит через все брюшко в виде длинной трубки, один конец которой обычно замкнут. Длина всей сердечной системы L равна 8 мм. Брюшной отдел имеет 9–10 сегментов. Сердце вздуто в каждом сегменте и подразделено на камеры. По большей части камеры находятся лишь в брюшке, но в первом брюшном сегменте обособленной камеры часто не бывает (Энциклопедический словарь, 1993–1998). Таким образом, при условии, что брюшной отдел колорадского жука имеет 9 сегментов, количество камер в нем – 8 и они наполнены кровью. Через остии кровь движется из перикардинального синуса в сердце. Остии представляют собой отверстия в боковой стенке сердца (рис. 2 и 3).



Рис. 2. Сердце тела насекомого



Рис. 3. Схема передвижения крови через остии

В работе Г. И. Сокол и Т. А. Рыбалки (2008) проводилось моделирование сердца насекомого и определение резонансной частоты сердца несколькими методами. В

первом приближении моделирование проводилось на основе представлений о механических характеристиках длинных стержней. Учитывались диаграммы растяжения для мышц живых организмов, приведенные у Ю. Ч. Фына. Воспользовавшись данными из его работы о линейном участке кривой на диаграмме растяжения, была рассчитана жесткость и упругость капиллярной мышцы сердца колорадского жука. Из расчета было получено, что резонансная частота мышцы сердца насекомого равна 638 Гц, что дало отличие с данными работы (Сокол, 2007) на 63,8 %. Поэтому было проведено моделирование сердца насекомого тонкой трубкой с жесткими стенками, закрытой крышкой с одного конца, так как сердце насекомого не сплошной тонкий стержень, а камера, заполненная кровью. Был использован метод расчета резонансной частоты акустической системы, представляющей собой трубку, закрытую с одного конца. В расчетах было принято, что скорость звука в жидкости типа крови равна $c_0 = 1500$ м/с. Тогда рассчитанная резонансная частота модели составляет величину $f_{рез} = 46875$ Гц. Полученный результат дал завышенное значение по сравнению с данными работы (Сокол, 2007) и не отвечал данным проведенных экспериментов.

Тогда было проведено моделирование сердца насекомого многокамерной акустической системой. Из Энциклопедического словаря (1993–1998) известно, что сердце насекомого – это механическая система, состоящая из сосредоточенных масс, соединенных между собой упругими связями, внутри которых расположены трубки, содержащие вязкую жидкость. Предложена новая методика расчета резонансной частоты на основе метода электромеханических аналогий (Сапожков, 1978). Метод электромеханических аналогий применялся ранее для решения многих проблем, возникающих при моделировании акустических устройств. Электроакустическая аппаратура обычно имеет в своем составе механическую колебательную систему как посредник между электрической и акустической системами. Для решения практических задач встречающихся при рассмотрении механических и акустических систем, целесообразно использовать удобный и эффективный математический аппарат в виде теории четырехполюсников. Метод электромеханических аналогий позволяет применять этот аппарат непосредственно к механическим системам (Сапожков, 1978). Сердечная система насекомого была представлена в виде последовательно соединенных камер, напоминающих своеобразный фильтр (рис. 4).

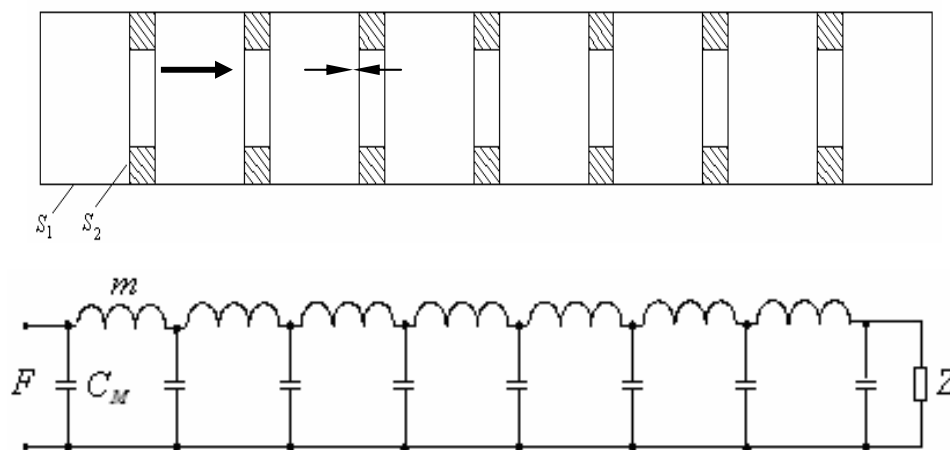


Рис. 4. Схема сердца в виде соединенных камер

Расчет и анализ результатов

При решении задачи об определении частотной характеристики колеблющейся системы ее заменяют эквивалентной (Косько, 1971).

Приведенная жесткость эквивалентной механической системы при последовательном соединении элементов равна

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n},$$

где C_1, C_2, \dots, C_n – жесткости на отдельных участках.

При параллельном соединении элементов системы приведенная жесткость равна сумме жесткостей на отдельных участках:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n.$$

При смешенном соединении элементов при расчете жесткости системы следует придерживаться правил последовательного и параллельного соединений.

Для определения резонансной частоты сердца колорадского жука, необходимо рассчитать массу сердца m и его жесткость C_Σ как многокамерной резонансной системы.

Масса одной камеры равна

$$m = \rho l S_2,$$

где ρ – плотность крови; l – длина остий; S_2 – площадь поперечного сечения остии.

Если взять полость цилиндрической формы с длиной l_n и поперечным сечением S_n , то ее гибкость k будет равна

$$k = l_n / \gamma p_{ac} S_n,$$

где γp_{ac} представляет собой модуль упругости крови при адиабатическом процессе, γ – удельный вес крови; p_{ac} – акустическое давление крови в системе.

Пересчитанная к горлу резонатора жесткость полости после замены произведения $S_n l_n$ на объем V имеет вид (Кошиць, 1999)

$$C_m = V / \gamma p_{ac} S_2^2,$$

где V – объем камеры.

В схеме модели сердца имеем 8 камер, расположенных по длине всей сердечной системы $L = 8$ мм. Для расчета используем данные: длина одной из камер сердечной системы $l_k = 0,001$ м, длина остии $l_o = 0,0001$ м, площадь поперечного сечения остии S_2 примем на основе рис. 7 равной

$$S_2 = S_1 / 3,$$

где S_1 – площадь поперечного сечения камер, $S_1 = \pi d_1^2 / 4 \approx 0,000196$ м²; d_1 – диаметр камеры.

При условии, что длина тела колорадского жука $\approx 3,5$ мм, а диаметр остии равен 1/7 от диаметра тела насекомого, получим $d_1 = 0,0005$ м, $S_2 = 6,53 \times 10^{-5}$ м². Плотность крови $\rho = 1000$ кг/м³. Масса одной остии $m = \rho l S_2 = 0,0000065$ кг. Суммарная масса имеющихся остий $m_\Sigma = 5,2 \times 10^{-5}$ кг. Объем одной камеры равен

$$V_1 = m_1 / \rho = 6,5 \times 10^{-9} \text{ м}^3.$$

Считаем, что акустическое давление крови внутри камеры составляет $p_{ac} = 20$ Н/м², а удельный вес $\gamma = 9810$ Н/м³.

Жесткость жидкости в полости одной из камер $C_m = V / \gamma p_{ac} S_2^2 = 0,000007$ Н/м. Жесткость всех камер, входящих в систему равна $C_\Sigma = 5,6 \times 10^{-5}$ Н/м.

Резонансная частота сердца колорадского жука f

$$f = 1 / 2\pi \sqrt{(C_\Sigma / m)} = 2954 \text{ Гц},$$

здесь m – суммарная масса частей системы, π число «π».

Полученный результат отвечает диапазону резонансных частот, которые были определены во время испытаний, описанных в работе Г. И. Сокол и О. М. Дуплищевой (2007). Поэтому можно сделать вывод, что воздействие на сердечную систему колорадского жука акустическими колебаниями приводит к ее губительному повреждению.

ВЫВОДЫ

1. Выявлен механизм взаимодействия между акустическими колебаниями в окружающей воздушной среде и механической резонансной системой – сердцем отдельных особей вредителя растений – колорадского жука.

2. Разработана новая методика по определению динамических характеристик сердца как многокамерной системы на основе метода электромеханических аналогий. Разработка методики позволила определить резонансную частоту, жесткость и гибкость сердца вредного насекомого. Рассчитанные величины попадают в диапазон данных, полученных на основе проведенных вибрационных и акустических испытаний.

3. В экологическом аспекте насекомые могут гибнуть от повреждения сердечной системы при воздействии на нее вибрациями и акустическими колебаниями, которые генерируются в окружающей среде устройствами, сконструированными человеком.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

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.

Романов С. Н. Биологическое действие вибрации и звука / С. Н. Романов. – Л. : Наука, 1991. – 210 с.

Сокол Г. И. Особенности инфразвуковых процессов в инфразвуковом диапазоне частот / Г. И. Сокол. – Д. : Промінь, 2000. – 136 с.

Энциклопедический словарь: в 86 т. – Репр. воспр. изд. «Энциклопедический словарь Ф. А. Брокгауза и И. А. Ефрона». – СПб. : Фирма «ПОЛРАДИС», АООТ «Иван Федоров», 1993–1998, т. 6 – 14А (28) – 450 с.

Шванвич Б. И. Курс общей энтомологии / Б. И. Шванвич. – М. : Советская наука, 1949. – 544 с.

Аппарат виброакустического воздействия Витафон. Технический паспорт и рекомендации по применению. Рекомендован комиссией КНМТ Минздрава РФ, протокол № 5 от 16.05.1994г. Регистрационное удостоверение № 29-271/94.

Кошиць Ю. Ш. Електронна концепція боротьби з гризунами і захист об'єктів соціально-цивільної виробничої сфери при проектуванні і будівництві. / О. Г. Лейко, О. Ф. Омельченко, Ю. О. Федоренко // Будівництво України. – 1999. – № 1. – С. 30-31.

Землякова А. А. Двухфазная модель для оценки акустических свойств компонент, формирующих мышечную ткань / А. А. Землякова, В. Н. Олейник // Консонанс – 2005 Акустичний симпозиум 27–29 вересня 2005: Збірник праць. – К., 2005. – С. 191-196.

Семилетов П. А. Мы пришли с миром / П. А. Семилетов / [Электронная версия] / <http://semiletov.ho.ua/works/antinoise.html>.

Косько И. К. Рекуррентные частотные уравнения многомассовых систем / И. К. Косько // Вопросы надежности и разрушения механических систем. – 1971. – № 1. – С. 23-30.

Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти томах / Под ред. К. В. Фролова. – Т. 6. Защита от вибраций и ударов. – М. : Машиностроение, 1981. – 456 с.

Сокол Г. И. Моделирование резонансных механических систем методом электромеханических аналогий. / Г. И. Сокол, Т. А. Рыбалка // Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла: Збірник наукових праць. – Д. : ДНУ, 2008. – Вип. 9. – С. 195-203.

Сапожков М. А. Электроакустика / М. А. Сапожков. – М. : Связь, 1978. – 272 с.

Надійшла до редколегії 05.07.11