DOI: 10.15421/4220008
УДК 534.7

Т. Л. Савчук¹, Г. І. Сокол¹, д-р техн. наук,
В. М. Савчук², О. В. Алхімов¹

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЗОНАНСНИХ ЯВИЩ У СЕРЦІ КОМАХ В КОСМІЧНИХ БІОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ

При виведенні космічного апарату з живими істотами на орбіту навколо Землі ракета має значні вібраційні навантаження. Виконаний аналітичний огляд наукових робіт, в яких описано застосування програмного комплексу ANSYS, показав, що моделювання проводилося в основному для характеристик конструкцій, які застосовуються в техніці. Моделювання коливань живих тіл розглянуто дуже обмежено. Цим визначається актуальність обраної теми. У роботі представлено моделювання резонансних властивостей серця комахи в програмному комплексі ANSYS.

Ключові слова: *коливання органів; серце комахи; резонансна частота; жорсткість.*

Вступ. Бурхливий розвиток ракетно-космічних досліджень стимулює розширення і поглиблення нових завдань у фізиці, астрономії, машинобудуванні, інформатиці, космічній біології та медицині. Космічна біологія – це галузь біології, що вивчає особливості існування живих організмів у позаземних умовах, вплив на них космічних факторів, а також можливість існування життя на інших планетах [5]. Космічна біологія розробляє методи досліджень і засоби забезпечення життєдіяльності людини та тварин в умовах космічного польоту, коли на живий організм можуть одночасно впливати різні чинники. В першу чергу – це іонізуюча радіація [6], прискорення і невагомість, а також тривала ізоляція в умовах обмеження рухової активності, штучна атмосфера, деякі особливості харчування та інші чинники. Дія цих специфічних умов на людину, тварин і рослини вивчається в лабораторних умовах, що імітують окремі фактори космічного польоту, або в польотах на штучних супутниках Землі і космічних кораблях, керованих безпосередньо людиною. Як об'єкти дослідження використовують тварин (мавп, собак, мишей, морських свинок), комах (мух дрозофіл та ін.), рослини (одноклітинні водорості – хлорелла; насіння пшениці, гороху, цибулі та ін.) [6–9].

Перед випробуваннями виживання живих організмів в середовищі космічних станцій попередньо проводяться дослідження механічних властивостей тіл живих організмів у земних умовах, у приміщеннях лабораторій [10].

При виведенні космічного апарату з живими істотами на орбіту навколо Землі ракета має значні вібраційні навантаження. В даний час в

науці все ширше використовується моделювання коливальних процесів в пружних тілах з використанням програмних комплексів. У лабораторних земних умовах особливий інтерес представляє моделювання власних коливань органів і тіл живих організмів із застосуванням програмного комплексу ANSYS [4, 11]. Проведений аналітичний огляд наукових робіт, в яких описано застосування цього комплексу, показав, що в основному проводиться моделювання характеристик конструкцій, що застосовуються в техніці. Моделювання коливань живих тіл в них розглянуто дуже обмежено. Цим визначається актуальність обраної теми.

Метою даної роботи є моделювання багатокамерної системи серця комах в програмному комплексі ANSYS.

Розробка фізичної моделі серця комах. Із енциклопедичних даних відомо, що серце колорадського жука - це ряд послідовно з'єднаних між собою камер, заповнених кров'ю [3]. Раніше в [2] попередньо розроблена фізична модель серця комах (в даному випадку колорадського жука) і створена розрахункова схема визначення величини частоти резонансних коливань. Для визначення резонансної частоти серця колорадського жука необхідно розрахувати масу серця і його жорсткість як багатокамерної системи. Для аналізу таких систем розумно розвинути засновану на лагранжевому формалізмі єдину теорію, в якій три системи: механічна, електрична та акустична – трактуються однаково. Такий підхід отримав назву методу "електроакустичних аналогій". Система електроакустичних аналогій містить наступні відповідності: тиск – електрична напруга, об'ємна швидкість – електричний струм, електричний опір – акустичний опір, електрична ємність – повна акустична стисливість обсягу, індуктивність - акустична маса [1].

В [2] на основі методу електроакустичних аналогій розроблена методика визначення резонансних частот механічної системи, що замінює серце комах.

Моделювання багатокамерною акустичної системи представлено на рис. 1.

Так як серце комах не є суцільний тонкий стрижень, а камери, заповнені кров'ю, то представимо серцеву систему у вигляді послідовно з'єднаних камер, що нагадують своєрідний фільтр.

Рис.1 – Модель багатокамерної акустичної системи серця комах

Математична модель. Розрахункова схема досліджуваної коливної системи зображується у вигляді дискретних мас, пов'язаних між собою пружними зв'язками. При розв'язанні задачі про розрахунок частотної характеристики коливної системи, її замінюють еквівалентною. Необхідно визначити наведені масу і жорсткість механічної системи, яка є аналогом серця комахи. На основі знання цих величин визначається резонансна частота серця.

Відомо [1], що наведена жорсткість еквівалентної механічної системи при послідовному з'єднанні елементів дорівнює

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

де $C_1, C_2, \dots, C_n$ – жорсткості на окремих ділянках.

При паралельному з'єднанні елементів системи приведена її жорсткість дорівнює сумі жорсткостей на окремих ділянках і визначається з виразу:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n. \quad (2)$$

У випадку зміщеного з'єднання елементів при розрахунку жорсткості системи слід дотримуватися правил послідовного і паралельного з'єднання.

Резонансна частота тіла або окремого органу живої комахи визначається виразом [2]

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{m}}, \quad (3)$$

де C – жорсткість системи; f – резонансна частота; m – маса тканини органу.

Для розрахунку жорсткості, введеної в формулу (1) резонансної частоти серця комахи, застосуємо вираз (3).

При моделюванні були враховані розміри серця, представлені в [3]. Орієнтовна довжина черевця близько 8 мм. Серце проходить через все черевце у вигляді довгої трубки, один кінець якої зазвичай замкнений. Приймаємо довжину всієї серцевої системи L , що дорівнює 8 мм. Черевний відділ має 9 – 10 сегментів. Серце роздує в кожному сегменті і розподілено на камери. Здебільшого, камери знаходяться лише в черевці, але в першому черевному сегменті відокремленої камери часто не буває. Таким чином, за умови, що черевний відділ колорадського жука має 9 сегментів, кількість камер в ньому – 8 і вони наповнені кров'ю.

Дані розрахунку резонансної частоти багатокамерної акустичної системи. Для визначення резонансної частоти серця колорадського жука необхідно розрахувати його масу серця m і його жорсткість C як багатокамерної резонансної системи.

У схемі моделі серця маємо 8 камер, розташованих по довжині всієї серцевої системи $L = 8 \text{ мм}$. Для розрахунку використовуємо дані: довжина однієї з камер серцевої системи $l_k = 10^{-3} \text{ м}$.

Камери з'єднані між собою остіями. Довжина остії $l_o = 10^{-4} \text{ м}$. Площа поперечного перерізу остії позначимо через S_2 . Приймаємо

$$S_2 = \frac{S_1}{3}, \quad (4)$$

де S_1 – площа поперечного перерізу камер.

За умови, що діаметр тіла колорадського жука $\approx 3,5 \text{ мм}$, а діаметр остії дорівнює $1/7$ від діаметра тіла комахи, отримаємо діаметр камери $d_1 = 5 \times 10^{-4} \text{ м}$.

Обчислюємо площу поперечного перерізу камери S_1

$$S_1 = \frac{\pi \times d_1^2}{4}. \quad (5)$$

Тоді площа поперечного перерізу остії $S_2 = 6,53 \times 10^{-8} \text{ м}^2$.

Щільність крові приймаємо $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Розрахуємо масу m_0 однієї остії за формулою: $m_0 = \rho \times l_o \times S_2$, тоді $m_0 = 6,53 \times 10^{-9} \text{ кг}$.

Маса однієї камери m_k визначиться з виразу:

$$m_k = \rho \times l_k \times S_1. \quad (6)$$

Звідки маємо $m_k = 19,625 \times 10^{-8} \text{ кг}$.

Сумарна маса семи остій і восьми камер складе величину

$$m_{ok} = 8 \times m_k + 7 \times m_o = 161,58 \times 10^{-8} \text{ кг}. \quad (7)$$

Сумарна маса всього серця комахи m_Σ в три рази більше сумарної маси остій і камер: $m_\Sigma = 3 \times m_{ok} = 484,74 \times 10^{-8} \text{ кг}$.

Якщо камера серця моделюється резонатором Гельмгольца [1], то гнучкість рідини в порожнині однієї з камер визначається з виразу

$$K_M = \frac{V}{\gamma \times p_{ac} \times S_2^2}, \quad (8)$$

де V – об'єм камери; γ – питома вага крові; p_{ac} – акустичний тиск крові в системі.

Вважаємо, що акустичний тиск крові всередині камери становить $p_{ac} = 20 \text{ Н/м}^2$, а питома вага $\gamma = 9810 \text{ Н/м}^3$. Гнучкість $K_M = 0,2337 \text{ м/Н}$.

Жорсткість камери дорівнює $C_k = 1/K_M = 4,279 \text{ Н/м}$.

Сумарна жорсткість системи з восьми камер і семи остій визначається як:

$$\frac{1}{C_{\Sigma}} = \frac{8}{C_k}, \text{ отже } C_{\Sigma} = \frac{C_k}{8} = 0,5349 \text{ Н/м.}$$

В результаті проведеного розрахунку отримано, що резонансна частота серця колорадського жука становить величину

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_{\Sigma}}{m_{\Sigma}}} = 1129 \text{ Гц.}$$

Моделювання багатокамерної системи серця комахи в програмному середовищі ANSYS. В даний час однією з найпоширеніших програм, що використовує метод скінченних елементів, є ANSYS. Програма представляє собою багатоцільовий пакет проектування і аналізу, визнаний у всьому світі. ANSYS широко використовується в багатьох університетах для навчання студентів і виконання науково-дослідних робіт [12].

На рис. 2 представлений загальний вигляд скінченно-елементної моделі серця колорадського жука, яка виконана в програмному середовищі ANSYS; на рис. 3 – скінченно-елементна модель серця колорадського жука в перерізі.

Рис. 2 – Скінченно-елементна модель серця колорадського жука

Рис. 3 – Скінченно-елементна модель серця колорадського жука у розрізі

У табл. 1 наведені результати розрахунку в ANSYS значень мод резонансної частоти.

Таблиця 1 – Значення мод резонансної частоти

Моди	Значення резонансних частот, Гц
1	52,258
2	59,369
3	66,593
4	66,595
5	67,334
6	69,517
7	69,518
8	72,752
9	72,754
10	73,683
Середнє значення мод	67,037

Після розрахунку резонансних частот серця колорадського жука отримуємо картини мод резонансної частоти. На рис. 4 представлена перша мода резонансної частоти, а на рис. 5 – вищі моди резонансних частот, отриманих в програмному середовищі ANSYS.

Обговорення отриманих результатів. Виконані розрахунки показали, що на першій моді значення резонансної частоти, отримане при моделюванні в ANSYS, менше, ніж аналітичне значення. На інших дев'яти модах значення, отримані при розрахунку в ANSYS більше, ніж аналітичні результати. Різниця в величинах розрахунків становить 1,27 рази. Похибка обчислень склала 27%.

Рис. 4 – Перша мода резонансної частоти

Рис. 5. – Вищі моди резонансної частоти

Висновки. Проведено моделювання резонансних властивостей сечі комахи в програмному комплексі ANSYS.

З порівняння отриманих результатів значень резонансних частот сектора комахи, виконаних аналітичним методом і в програмному комплексі ANSYS, видно, що значення частоти, отримане на основі моделювання в ANSYS, більше, ніж при розрахунках, виконаних аналітично.

БІБЛІОГРАФІЧНІ ПОСИЛАННЯ

1. **Жидков А.В.** Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования. Учебно-методические материалы по программе повышения квалификации «Информационные системы в математике и механике» [Электронный ресурс] / <http://www.unn.ru/pages/e-library/aids/2006/1.pdf>
2. Изучение полёта стрекозы и инженерные инновации [Электронный ресурс] / <https://www.ansys.soften.com.ua/about-ansys/blog/232-izuchenie-poljota-strekozy-i-inzhenernye-innovatsii.html>
3. Комар выжил в открытом космосе [Электронный ресурс] / <https://ria.ru/analytics/20090217/162374293.html>
4. Космическая биология [Электронный ресурс] / <http://www.medical-enc.ru/10/astrobiology.shtml>.
5. **Малов И.Ф., Фролов В.А.** Космическое излучение и живые организмы [Электронный ресурс] // Спектр космического излучения и размеры живых организмов. Земля и Вселенная. 2005. № 3. С. 62–68, <http://infm1.sai.msu.ru/SETI/koi/bulletin/26/3.1.html>
6. **Сапожков М.А.** Электроакустика. М.: Связь, 1978. 272 с.
7. **Сокол Г.И., Дуплицева О.М.** Вибрационные технологии в определении жесткости и резонансной частоты тел насекомых // Вибрації в техніці та технологіях. 2007. № 1(46). С. 20–24.
8. Тараканы в космосе. <https://www.kommersant.ru/doc/2299685>.
9. Уникальный эксперимент провели на МКС. https://360tv.ru/news/nauka_i_tehnologiya/unikalnyi-jeksperiment-proveli-na-mks-6403/
10. Частный автоматический грузовой космический корабль снабжения «Сигнус» доставил на Международную космическую станцию восемь сотен муравьев <http://www.nat-geo.ru/science/47087-nasa-otpravilo-v-kosmos-muravev/>
11. Энциклопедический словарь: в 86 т. Репр. воспр. изд. «Энциклопедический словарь Ф. А. Брокгауза и И. А. Ефрона». СПб.: Фирма «ПОЛРАДИС», АО «Иван Федоров», 1993–1998. Т. 6. 14А (28). 450 с.
12. Dragonfly: The Mysterious Insect Driving Engineering Innovation <http://www.ansys.com/dragonfly-flapping-ansys/>.

УДК 534.7

*Т. Л. Савчук¹, Г. И. Сокол¹, д-р техн. наук,
В. Н. Савчук², А. В. Алхимов¹*

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В СЕРДЦЕ НАСЕКОМОГО В КОСМИЧЕСКИХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

При выведении космического аппарата с живыми существами на орбиту вокруг Земли ракета испытывает значительные вибрационные нагрузки. Аналитический обзор научных работ, в которых описано применение программного комплекса ANSYS, показал, что моделирование проводилось в основном для характеристик конструкций, применяемых в технике.

Моделирование колебаний живых тел рассмотрено очень ограничено. Этим определяется актуальность выбранной темы. В работе представлено моделирование резонансных свойств сердца насекомого в программном комплексе ANSYS.

Ключевые слова: колебания органов; сердце насекомого; резонансная частота; жесткость.

UDC 534.7

*T. L. Savchuk¹, G. I. Sokol¹, Dr. Sci. (Tech.),
V. N. Savchuk², A. V. Alkhimov¹*

MODELING RESONANCE PHENOMENA IN THE INSECT HEART IN SPACE BIOLOGICAL RESEARCH

When a spacecraft with living things is put into orbit around the Earth, the rocket experiences significant vibration loads. At present, in science, the modeling of oscillatory processes in elastic bodies using software complexes is increasingly used. The conducted analytical review of scientific works, in which the application of the software complex ANSYS is described has shown that the modeling of the characteristics of the structures used in engineering is carried out. Modeling the vibrations of living bodies in them is considered very limited. This determines the relevance of the selected topic. The purpose of this work is modeling of the multi-chamber heart system of an insect in the ANSYS software complex.

Keywords: body vibrations; insect heart; resonant frequency; hardness.

The rapid development of rocket and space research stimulates the expansion and deepening of new tasks in physics, astronomy, engineering, computer science, space biology and medicine. Cosmic biology is a branch of biology studying the features of the existence of living organisms in extra-terrestrial conditions, the impact of cosmic factors on them, and the possibility of the existence of life on other planets.

At present, in science, the modeling of oscillatory processes in elastic bodies using software complexes is increasingly used. Therefore, in laboratory terrestrial conditions, modeling of natural vibrations of organs and bodies of living organisms with the use of the ANSYS software complex is of particular interest. The positive effect of acoustic oscillations on the human body and the use of the characteristics of acoustic fields in the diagnosis are increasingly used in modern medicine.

The conducted analytical review of scientific works, in which the application of the software complex ANSYS is described has shown that the modeling of the characteristics of the structures used in engineering is carried out. Modeling the vibrations of living bodies in them is considered very limited.

The development of physical model of the insect heart was based on encyclopedic data. The heart of the Colorado potato beetle is a series of interconnected chambers filled with blood. For the analysis of such systems, it is reasonable to use the method of "electroacoustic analogies", in which three systems - mechanical, electrical and acoustic - are treated in the same way. On the basis of a mathematical model, the design scheme of the

investigated oscillating system. It is depicted in the form of discrete masses connected by elastic bonds.

The purpose of this work is modeling of the multi-chamber heart system of an insect in the ANSYS software complex.

Modeling of the resonance properties of the insect heart in the ANSYS software complex was carried out.

The performed calculations showed that the value of the resonant frequency obtained in the ANSYS simulation is less than the value obtained analytically. The difference in the calculation values is 1.27 times. The error in the calculations was 27%.

REFERENCES

1. **Zhidkov A.V.** Application of the ANSYS system to solving geometric and finite element modeling problems. Teaching materials on the continuing education program "Information Systems in Mathematics and Mechanics" <http://www.unn.ru/pages/e-library/aids/2006/1.pdf>. (in Russian).
2. The study of dragonfly flight and engineering innovation. <https://www.ansys.soften.com.ua/about-ansys/blog/232-izuchenie-poljota-strekozy-i-inzhenernye-innovatsii.html>. (in Russian).
3. Mosquito survived in outer space/ [Electronic resource]/ <https://ria.ru/analytics/20090217/162374293.html> . (in Russian).
4. Space Biology. <http://www.medical-enc.ru/10/astrobiology.shtml>. (in Russian).
5. **Malov I.F., Frolov V.A.** Cosmic radiation and living organisms // Cosmic radiation spectrum and sizes of living organisms. Earth and the universe. 2005. No 3, P.62–68, <http://lnfm1.sai.msu.ru/SETI/koi/bulletin/26/3.1.html> . (in Russian).
6. **Sapozhkov M.A.** Electroacoustics. Moscow: Communication, 1978. 272 p. (in Russian).
7. **Sokol G.I., Duplischeva O.M.** Vibration technologies in determining the stiffness and resonance frequency of insect bodies // Vibrations in engineering and technology. 2007. No 1 (46). P. 20–24. (in Russian).
8. Cockroaches in space. <https://www.kommersant.ru/doc/2299685>. (in Russian).
9. A unique experiment was conducted on the ISS. https://360tv.ru/news/nauka_i_tehnologiya/unikalnyj-eksperiment-proveli-na-mks-6403/. (in Russian).
10. Signus, a private automatic cargo supply spacecraft, delivered eight hundred ants to the International Space Station. <http://www.nat-geo.ru/science/47087-nasa-otpravilo-v-kosmos-muravev/> . (in Russian).
11. Encyclopedic Dictionary: in 86 vol. - Reproduction reproduced edition of the "Encyclopedic Dictionary F.A. Brockhaus and I.A. Efron "[Text] . St. Petersburg: Firm "POLRADIS", AOOT "Ivan Fedorov", 1993 – 1998. Vol 6 – 14A (28). 450 p. (in Russian)
12. Dragonfly: The Mysterious Insect Driving Engineering Innovation. <http://www.ansys.com/dragonfly-flapping-ansys/> (in Russian).

¹Дніпровський національний університет
імені Олеся Гончара,
Дніпро, Україна,

²Державне підприємство
«КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля»,
Дніпро, Україна,