УДК 629.76 https://doi.org/10.15407/itm2025.01.028

О. Д. НІКОЛАЄВ, І. Д. БАШЛІЙ, Д. В. КЛИМЕНКО, Н. В. ХОРЯК

ВЗАЄМОДІЯ АКУСТИЧНИХ КОЛИВАНЬ ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ В КАМЕРІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З ВІБРАЦИЯМИ КОРПУСУ

Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; nikolaev.o.d@nas.gov.ua

Найбільш критичні режими роботи камер енергетичних установок часто зумовлені розвитком динамічних процесів, які характеризуються наднормативними величинами режимних параметрів. Стрибки тиску та різке зростання локальної температури продуктів згоряння можуть призводити до порушення міцності та руйнування конструкції камери згоряння, переходу на критичний режим роботи енергетичної установки, аж до згасання процесу горіння палива в установці.

Розроблено підхід для вирішення задач динаміки енергетичних установок – оцінка впливу акустичних коливань продуктів згоряння в камері з урахуванням їх взаємодії з корпусом твердопаливної установки та з урахуванням демпфування коливань палива та конструкції корпусу на динамічні (акустичні) процеси в камерах згоряння.

Проведено чисельні дослідження щодо динамічної взаємодії робочого процесу у енергетичних установках на твердому паливі з просторовими коливаннями корпусу. Для отримання розуміння механізму цього зв’язку динамічну взаємодію між коливаннями тиску та поздовжніми коливаннями конструкції корпусу досліджено за допомогою методу гармонічного аналізу (при величині гармонічного збурення ~1 % від величини тяги). Показано, що динамічний зв’язок між коливаннями конструкції корпусу та акустичними коливаннями в об’ємі продуктів згоряння камери згоряння слід враховувати при дослідженні стійкості енергетичних установок. Активний прояв динамічного зв'язку між коливаннями конструкції установки та акустичними коливаннями реалізується у разі близькості частот власних коливань корпусу та акустичних коливань у камері енергетичної установки. Показано, що на певних частотах (залежно від фазових співвідношень) акустичні коливання тиску в камері згоряння можуть посилюватися або послаблюватися. Регулювання цього динамічного процесу з метою зниження рівня коливань у певному діапазоні часу польоту вимагає вирішення таких завдань: подальшого вивчення впливу на ці динамічні процеси особливостей форми проточної частини камери, впливу її режимних параметрів або впливу можливих демпфуючих елементів конструкції камери згоряння.

Ключові слова: *твердопаливна енергетична установка, стійкість робочого процесу, камера згоряння, динамічна взаємодія акустичних коливань та коливань корпусу установки.*

The most critical operating conditions of propulsion system chambers are often due to the development of dynamic processes characterized by excess values of operational parameters. Pressure surges and a sharp increase in the local temperature of the combustion products may result in a structural failure of the combustion chamber and a critical behavior of the propulsion system, to the point of combustion termination.

An approach was developed to solving problems of propulsion system dynamics – assessment of the effect of the acoustic oscillations of the combustion products in the chamber with account for their interaction with the solid-propellant propulsion system structure and for propellant oscillation and structural vibration damping on dynamic (acoustic) processes in the combustion chamber.

The dynamic interaction of the operating process in solid-propellant propulsion systems with the spatial vibrations of the chamber structure was studied numerically. To get insight into its mechanism, the dynamic interaction between pressure oscillations and longitudinal structural vibrations was studied with adding a harmonic disturbance (~1 % of the thrust). It was shown that the dynamic coupling between the structural vibrations and the acoustic oscillations in the bulk of the combustion products should be taken into account in studying the strength of propulsion systems. This dynamic coupling manifests itself actively when the eigenfrequencies of the structural vibrations are close to those of the acoustic oscillations. It is shown that at some frequencies (depending on the phase relationships) the acoustic oscillations of the combustion chamber pressure may increase or decrease. Controlling this dynamic process with the aim to reduce the oscillation level for a certain flight time period calls for a further study of the effect of the following factors on these dynamic processes: the geometry of the combustion chamber, its operational conditions, and the presence of damping elements.

Keywords: *solid-propellant propulsion system, operating process stability, combustion chamber, dynamic interaction of acoustic oscillations and structural vibrations.*

Вступ. Одна з актуальних проблем роботи енергетичних установок – термоакустична нестійкість робочого процесу течії продуктів згоряння в об'ємі камери згоряння енергетичної установки, яка може суттєво посилюватись при взаємодії коливань продуктів згоряння в камері енергетичної установки з коливаннями її корпусу. Більш як за п'ятдесятирічний період досліджень у

© О. Д. Ніколаєв, І. Д. Башлій, Д. В. Клименко, Н. В. Хоряк, 2025

цьому напрямі актуальність проблеми не зменшилася [1].

Питанням взаємодії динамічних процесів у конструкції корпусу та у камері згоряння приділялося відносно мало уваги внаслідок складності цих процесів. Більше того, у зв'язку з розробкою енергетичних установок нового покоління актуальність проблеми загострилася. Нестійкість процесу течії продуктів згоряння енергетичної установки є автоколивальним процесом зміни робочих параметрів, кількісні параметри яких можуть виходити за встановлені межі.

В роботі [2] показано, що в результаті розвитку та взаємодії процесів різної природи (займання, горіння, тепловиділення, коагуляції та дроблення частинок, вихроутворення, хімічних реакцій, акустичних явищ тощо), які відбуваються в газодинамічній частині робочого простору камери енергетичної установки (на всіх режимах роботи), в камері створюється складна динамічна обстановка, в умовах якої можуть виникати самозбуджуванні поздовжні акустичні коливання і акустична нестійкість енергетичної установки.

В той же час K. Dotson з Aerospace Corporation [3] на основі обробки експериментальних даних – результатів численних вимірювань, проведених в умовах польоту американської ракети «Titan IV», показав вплив поздовжніх коливань конструкції корпусу великих ракет-носіїв на динамічні процеси в камері згоряння двигунів при польоті.

Метою статті є розробка підходу для чисельної оцінки впливу просторових коливань корпусу енергетичної установки на динамічні (акустичні) процеси в камерах згоряння.

Для розробки підходу необхідно виконати аналіз параметрів власних динамічних коливань корпусу енергетичної установки, розробити модель зв’язаних коливань – акустичних процесів в камері згоряння та поздовжніх коливань корпусу енергетичної установки.

Розробка математичної моделі просторових коливань корпусу енергетичної установки. З метою виконання кількісного аналізу динамічних характеристик корпусу енергетичної установки було проведено розробку математичної моделі просторових коливань корпусу енергетичної установки під час польоту на прикладі фізичної моделі (з співвідношенням геометричних параметрів його камери L/d =12,0) близької за параметрами до фізичної моделі двигуна ракети-носія ARIANE [4].

Поздовжні коливання корпусу досліджуваної енергетичної установки описувалися як вільні коливання лінійної динамічної системи «балочна конструкція корпусу – маси стабілізаторів, корисного вантажу, апаратури приладового відсіку» з постійними («замороженими») коефіцієнтами. Її математична модель представлялася у матричному вигляді диференціальним рівнянням:

$$\ddot{X}(t) + M^{-1}C\dot{X}(t) + M^{-1}KX(t) = 0, \qquad (1)$$

де X – вектор ($\dot{X} = dX/dt$; $\ddot{X} = d^2X/dt^2$) вузлових переміщень динамічної системи «балочна конструкція корпусу – маси стабілізаторів, корисного вантажу, апаратури приладового відсіку», що має розмірність n_1; M , C , K – позначені матриці мас, коефіцієнтів демпфування та жорсткості, що мають порядок n_1 відповідно; n_1 – кількість ступенів свободи системи.

Урахування залежності коефіцієнтів системи (1) від часу *t* здійснюється в рамках методу «заморожених» коефіцієнтів. Спрощене скінченно-елементне представлення частини конструкції досліджуваного корпусу (відповідної енергетичної установки) без корисного навантаження та приладового відсіку наведено рисунку 1.

Для різних моментів часу *t*, зокрема, визначено (за допомогою методу скінченних елементів при розв'язанні рівнянь (1)) частоти поздовжніх коливань конструкції енергетичної установки. Наприклад, для t = 1 с часу польоту енергетичної установки частота першого тону поздовжніх коливань f_{1L} = 172,6 Гц; відповідно частота другого тону поздовжніх коливань f_{2L} = 255,5 Гц; частота коливань третього тону f_{3L} = 361,5 Гц; частота коливань f_{4L} = 419,0 Гц; частота коливань f_{5L} = 705,9 Гц, а відповідно для t =8 с часу польоту енергетичної установки частота коливань f_{1L} = 184,4 Гц; частота коливань f_{2L} = 281,4 Гц; частота коливань f_{3L} =394,7 Гц; частота коливань f_{4L} = 447,8 Гц; частота коливань f_{5L} = 706,6 Гц.

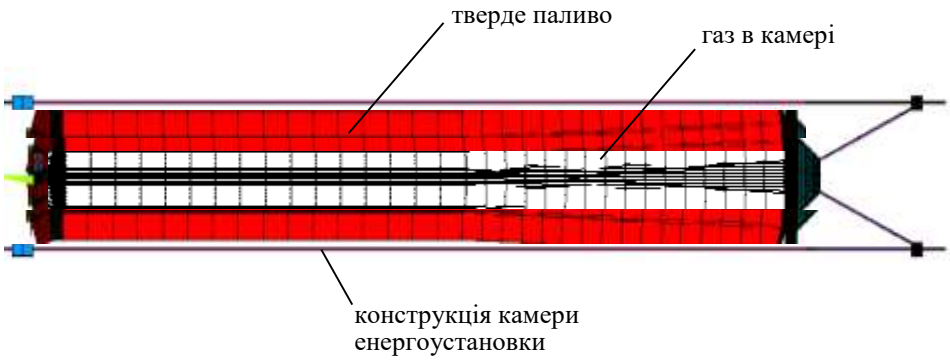


Рис. 1

Проведення теоретичних досліджень щодо динамічної взаємодії робочого процесу у камері згоряння з просторовими коливаннями корпусу енергетичної установки у польоті. Нестійкість робочого процесу в енергетичній установці на твердому паливі, що має відносно велике подовження каналу заряду $L/d > 4$ (L – довжина, d – діаметр каналу), як правило, має термоакустичну природу, що характеризується виникненням поздовжніх стоячих хвиль [6]. Досліджувана енергетична установка має заряд з співвідношенням геометричних параметрів його камери L/d ≈12,0, що свідчить про схильність робочих процесів в енергетичній установці до збурення в камері поздовжніх коливань акустичної природи. Частота реалізованих при вогневих випробуваннях акустичних автоколивань камери згоряння, зазвичай, співпадає (або близька) з власною частотою поздовжніх коливань газового стовпа в камері згоряння енергетичної установки від переднього днища до заднього днища та входу в сопло. Акустична нестійкість досліджуваної енергетичної установки має нелінійну природу, про що свідчать відомі експериментальні та теоретичні дослідження [6 – 9]. Поздовжні акустичні коливання тиску в камері згоряння та тяги енергетичної установки знаходяться в діапазоні частот f від ≈ 100 Гц до 1700 Гц, що відповідає довжині камери згоряння від 5 м до 0,3 м.

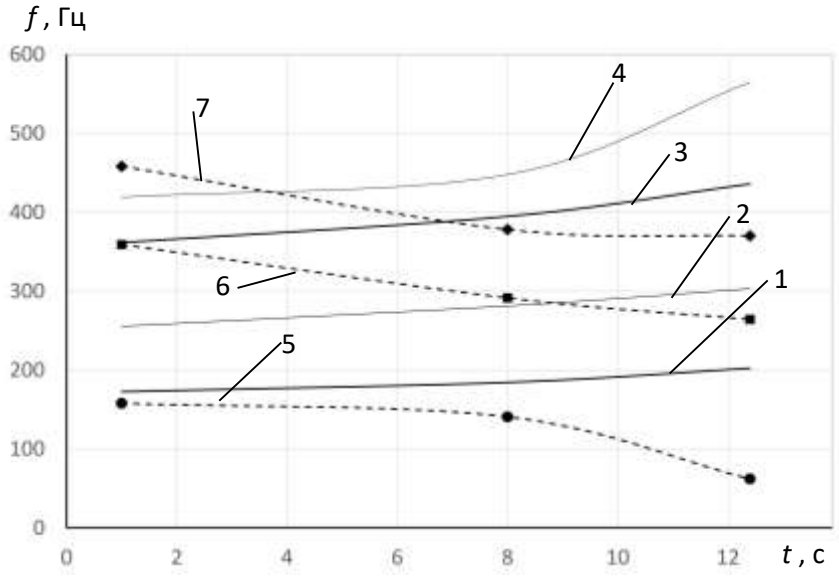


Рис. 2

На рис. 2 криві 1, 2, 3, 4 позначають розрахункові частоти першого, другого, третього, четвертого тону поздовжніх коливань конструкції, криві 5, 6, 7 розрахункові частоти першого, другого, третього тону поздовжніх акустичних коливань газу в камері.

Зазначимо, що в досліджуваному частотному діапазоні (до 1000 Гц) поздовжні коливання (основних нижчих тонів) корпусу енергетичної установки реалізуються з частотами коливань в діапазоні від 172,6 Гц (частота першого тону власних коливань корпусу) до 706,6 Гц (частота 5-го тону власних коливань корпусу). З даного аналізу та рис. 2, зокрема, випливає, що в частотному діапазоні до 1000 Гц при польоті досліджуваної енергетичної установки частоти акустичних мод коливань продуктів згоряння та мод механічних коливань конструкції корпусу наближаються один до одного, внаслідок чого протягом часу польоту є умови реалізації для резонансної взаємодії поздовжніх коливань корпусу енергетичної установки та продуктів згоряння в її камері згоряння.

З метою спрощення математичного опису та наступного аналізу результатів при чисельному моделюванні не враховувалися рівняння хімічної кінетики процесу згоряння та його вплив на процес тепловиділення, які необхідні для отримання додаткових характеристик течії продуктів згоряння та подальшої деталізації характеру течії внутрішнього потоку в камері.

Для попередньої аналітичної оцінки впливу поздовжніх коливань корпусу енергетичної установки на акустичні процеси в камері розглянемо найпростіший випадок, коли в розрахунку враховується лише один елемент газового тракту камери при одномірному коливальному русі газу уздовж поздовжньої осі (без урахування впливу коливань тиску в камері на швидкість горіння палива та впливу динаміки вихрових структур в камері).

Нехай сила $\vec{F}$ відображає сумарний силовий вплив динамічної складової тиску газу на стінки елемента конструкції камери згоряння, що розглядається, (на рис. 3 представлено спрощене схематичне відображення течії продуктів згоряння в камері при проведенні аналізу динамічної

взаємодії робочого процесу у енергетичній установці з поздовжніми коливаннями корпусу енергетичної установки у польоті в поздовжньому напрямку, позначення величин відповідає вищенаведеним параметрам):

$$\vec{F} = p_0 A_0 - p_{kr} A_{kr} - \frac{\dot{G}_{ps}}{g} L - m_{gas} \ddot{\vec{r}}_0 - m_{gas} \ddot{\vec{r}}_{kr}, \qquad (2)$$

де A_{kr} – площина критичного перерізу; A_0 – площина початкового перерізу газового простору камери згоряння; G_{ps} – вагова витрата продуктів згоряння уздовж поздовжньої осі; m_{gas} – маса продуктів згоряння в об'ємі скінченного елементу; $\ddot{r}$ – віброприскорення стінки камери згоряння (в перерізі 0 – 0 та в критичному перерізі kr – kr); $\vec{F}$ – сила, що відображає сумарний силовий вплив динамічної складової тиску газу на стінки елемента конструкції камери згоряння; D_0 – діаметр початкового перерізу газового простору камери згоряння; p_0, p_{kr} – тиск продуктів згоряння в перерізі 0 та в критичному перерізі kr – kr; V_0, V_{kr} – швидкість газу в перерізі 0 – 0 та в критичному перерізі kr – kr; D_{kr} – діаметр критичного перерізу газового простору камери згоряння; R_{en} – тяга двигуна (див. рис. 3).

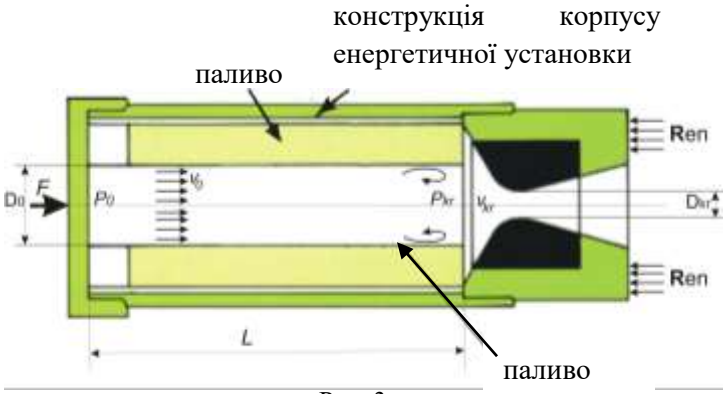


Рис. 3

При квазістатичному тиску газу в камері $\bar{p}_{kk}$ тиск в перерізі 0 визначається як $p_0 = \bar{p}_{kk} + \delta p_0$, де δp_0 – амплітуда коливань продуктів згоряння в перерізі камері 0 – 0.

Величина динамічної складової сили $\delta\vec{F}$ може бути отримана з розрахунку динаміки процесу течії продуктів згоряння в камері при номінальній тязі.

Кількісну оцінку впливу динамічної взаємодії вищевказаних акустичних коливань та поздовжніх (механічних) коливань корпусу енергетичної установки можна встановити на основі рішення задачі визначення параметрів гармонічних коливань досліджуваної зв'язаної динамічної системи «камера згоряння – корпус енергетичної установки» з урахуванням та без урахування зворотного зв'язку поздовжніх коливань корпусу через тиск камери та тягу *Ren* установки. Для спрощення аналізу дані розрахунки проведено без урахування впливу коливань тиску в камері на швидкість горіння палива та впливу динаміки вихрових структур в камері.

Для виконання чисельного гармонічного аналізу були використані засоби методу скінченних елементів [10]. З цією метою проведено дискретизацію газового об'єму досліджуваної камери та конструкції енергетичної установки на скінченні елементи газового тракту камери (загальна кількість – 103936 елементів).

Для чисельної оцінки впливу поздовжніх коливань корпусу досліджуваної енергетичної установки на динамічні процеси в камері та динамічну складову тяги в поздовжньому напрямку порівняно дві частотні характеристики (при величині гармонічного збурення ~ 1 % від величини тяги):

1) частотну характеристику камери $\frac{\delta p_{kr}(j\omega)}{\delta p_0(j\omega)}$ (відношення амплітуди коливань тиску p_{kr} критичного перерізу камери до амплітуди коливань тиску p_0 на вході в камеру згоряння), що характеризує акустичні процеси в робочому просторі камери (без урахування поздовжніх коливань корпусу енергетичної установки, тобто при жорстко закріпленому корпусу енергетичної установки);

2) частотну характеристику камери $\frac{\delta p_{kr}(j\omega)}{\delta p_0(j\omega)}$ (відношення амплітуд коливань тиску p_{kr} до критичного перерізу камери до амплітуди коливань тиску p_0 на вході в камеру згоряння), отриману з урахуванням динамічної взаємодії акустичних коливань в камері та механічних коливань корпусу енергетичної установки.

Математичне моделювання динамічної системи «камера згоряння – корпус енергетичної установки» без урахування (крива 1) та з урахуванням (крива 2) впливу поздовжніх коливань корпусу енергетичної установки проведено при жорстко закріпленому корпусу енергетичної установки (варіант розрахунку для 1 с наведено на рис. 4, для 8 с – на рис. 5, на яких представлені амплітудні характеристики $\mathrm{mod}\frac{\delta p_{kr}(j\omega)}{\delta p_0(j\omega)}$, побудовані на основі гармонічного аналізу динамічної системи «камера згоряння – корпус енергетичної установки» при гармонічному збуренні за торцевим перерізом конструкції корпусу енергетичної установки з амплітудою коливань сили в 1 кН).

Зокрема, з рис. 4, 5 видно (крива 1), що без урахування впливу поздовжніх коливань корпусу енергетичної установки в діапазоні до 1 кГц резонансні максимуми амплітудних характеристик $\mathrm{mod}\frac{\delta p_{kr}(j\omega)}{\delta p_0(j\omega)}$ відповідають розрахунковим акустичним частотам коливань $f_{1L} - f_{5L}$ та поступово знижуються за величиною. Тобто, у цьому випадку без урахування динамічної взаємодії поздовжніх та акустичних коливань стійкість робочого процесу у камері визначається виключно акустичними коливаннями продуктів згоряння.

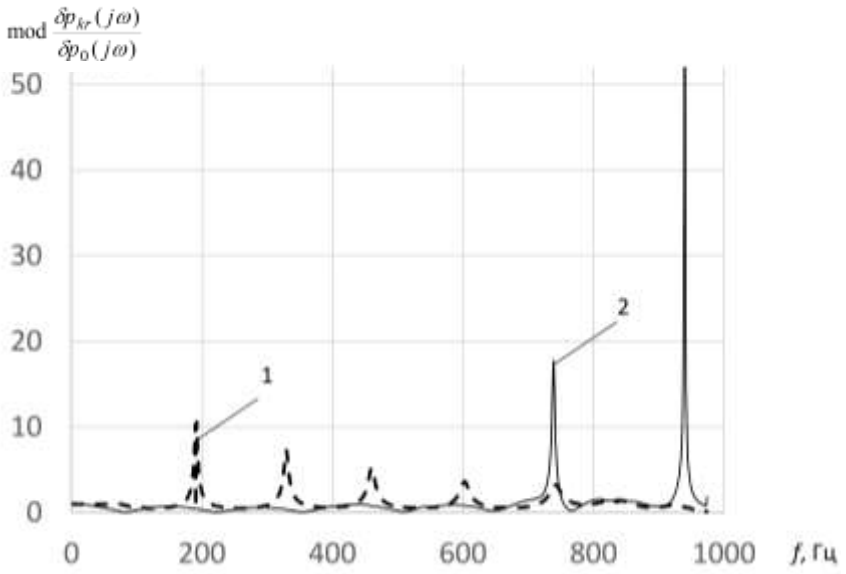


Рис. 4

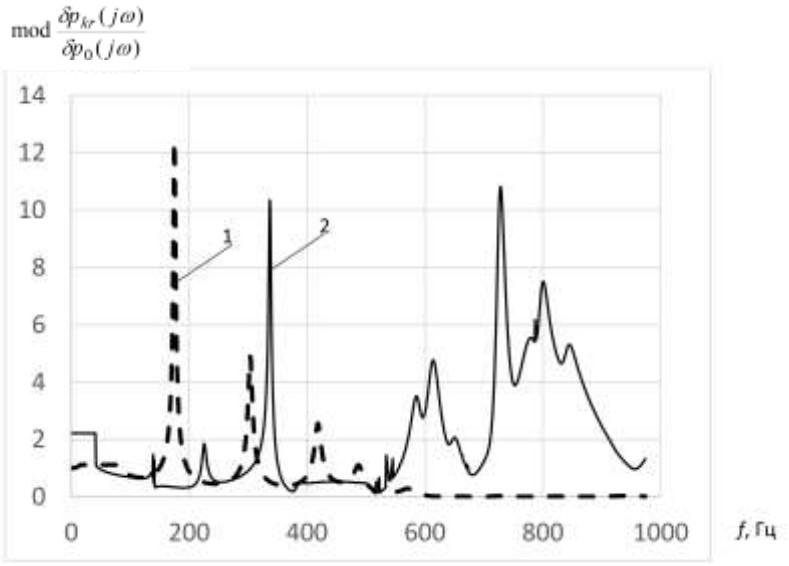


Рис. 5

В той же час з урахуванням впливу поздовжніх коливань корпусу енергетичної установки ці максимуми амплітудних характеристик $\mathrm{mod}\dfrac{\delta p_{kr}(j\omega)}{\delta p_0(j\omega)}$ навпаки суттєво зростають (крива 2 на рис. 4, 5) в діапазоні частот до 1 кГц внаслідок динамічної взаємодії між коливаннями корпусу енергетичної установки та акустичними коливаннями в об'ємі продуктів згоряння камери згоряння.

З цього випливає, що регулювання цього динамічного процесу з метою зниження рівня коливань у певному діапазоні часу польоту вимагає вирішення таких завдань: подальшого вивчення впливу на ці динамічні процеси особливостей форми проточної частини камери, впливу її режимних

параметрів або впливу можливих демпфуючих елементів конструкції камери згоряння.

Таким чином, розрахунковим шляхом показано, що динамічний зв'язок поздовжніх коливань корпусу та акустичних коливань продуктів згоряння у камері згоряння сприяє реалізації резонансної взаємодії зазначених видів коливань енергетичної установки. Даний динамічний зв'язок між коливаннями конструкції енергетичної установки та акустичними коливаннями в об'ємі продуктів згоряння камери згоряння при роботі енергетичної установки слід враховувати при дослідженні її стійкості.

Висновки. Таким чином, розроблено підхід та виконані чисельні дослідження (на основі 3D скінченно-елементного моделювання) щодо динамічного зв’язку акустичних коливань в камері згоряння енергетичної установки з просторовими коливаннями її корпусу у характерні моменти часу.

За допомогою методу гармонічного аналізу досліджено механізм цього зв’язку між коливаннями тиску та поздовжніми коливаннями конструкції корпусу. Визначено, що в частотному діапазоні до 1000 Гц при роботі досліджуваної енергетичної установки частоти акустичних мод коливань продуктів згоряння у камері та мод механічних коливань конструкції корпусу зближуються, внаслідок чого протягом часу роботи енергетичної установки створюються умови для реалізації резонансної взаємодії поздовжніх коливань корпусу енергетичної установки та акустичних коливань продуктів згоряння в її камері згоряння, що зрештою може призвести до розвитку небезпечних для працездатності коливань тяги камери в певні моменти часу роботи. Тобто при штатній роботі енергетичної установки рівень коливань тиску в камері згоряння може бути підвищений відносно даних вимірів динамічних складових тиску в камері згоряння при її вогневих наземних випробуваннях.

Динамічний зв’язок між коливаннями конструкції енергетичної установки та акустичними коливаннями в об’ємі продуктів згоряння камери згоряння слід враховувати при дослідженні стійкості енергетичної установки.

1. *Nikolayev O. D., Bashliy I. D., Khoriak N. V., Bondarenko S. H.* Effect of the surface roughness of a power plant chamber on low-frequency self-oscillations of a cold working gas. ТМ. 2023. № 3. P. 3–17. https://doi.org/10.15407/itm2023.03.003
2. *Pylypenko O. V., Nikolayev O. D., Khoriak N. V., Bashliy I. D., Dolgopolov S. I.* Dynamic processes in solid rocket motors and their interaction with rocket structure vibrations: the state of the art and current problems. ТМ. 2023. № 1. P. 3–13. https://doi.org/10.15407/itm2023.01.003
3. *Dotson K. W., Koshigoe S., Pace K. K.* Vortex driven pressure oscillations in the Titan IV solid rocket motor upgrade Pace. 31st Propulsion Conference and Exhibit., San-Diego, CA. Copyright 1995 by American Institute of Aeronautics and Astronautics. 1995. July 10 – 12. 11 p. https://doi.org/10.2514/6.1995-2732
4. Zhang Q., Wang N., Li J., Su W., Zhang Y. Effect of the head cavity on pressure oscillation suppression characteristics in large solid rocket motors. Science China. Technological Sciences. 2015. July. Vol. 58, No.7. P. 1250–1262. https://doi.org/10.1007/s11431-015-5834-z
5. *Ли К.* Основы САПР (CAD/CAM/CAE). Санкт-Петербург: Питер, 2004. 560 с.
6. *Kirk Dotson W.* Interaction Between Solid Rocket Motor Internal Flow and Structure During Flight. Journal of Propulsion and Power. 2007. Vol. 23, No. 1. (January–February). P. 140–145. https://doi:10.2514/1.20477
7. *Mason D., Morstadt R., Cannon S., Gross E., Nielsen D.* Pressure oscillations and structural vibration in space shuttle RSRM and ETM-3 Motors. 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. 11–14 July. Fort Launderdale. Florida. 2004. P. 1–17. https://doi.org/10.2514/6.2004-3898
8. *Волков К. Н., Емельянов В. Н.* Газовые течения с массоподводом в каналах и трактах энергоустановок. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 464 с.
9. *Калинин В. В., Ковалев Ю. Н., Липанов А. М.* Нестационарные процессы и методы проектирования узлов РДТТ. М.: Машиностроение, 1986. 216 с.
10. *Зенкевич О. К.* Метод конечных элементов в технике*:* Пер. с англ. М.: Мир, 1975. 541 с.

Отримано 16.01.2025,
в остаточному варіанті 18.03.2025