

С.С. Василів

## КОМПЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ РОЗРОБЦІ СТЕНДОВОГО ВИПРОБУВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ ДЕТОНАЦІЙНИХ РАКЕТНИХ ДВИГУНІВ

*Анотація.* Проведено проектування силових вузлів стендового обладнання для здійснення випробувань детонаційних ракетних двигунів. Для виявлення динамічних факторів, що можуть впливати на точність вимірювань параметрів роботи двигунів здійснено моделювання навантажень і визначення власних частот конструкції.

*Ключові слова:* детонаційний ракетний двигун, стенд, моделювання, частоти коливань.

**Вступ.** Стенд вогневих випробувань – один з найважливіших елементів при відпрацюванні ракетного двигуна. Для підтвердження проектних параметрів і ефективності робочого процесу в камері згорання обов'язковою умовою є проходження натурних випробувань. Окрім того, в багатьох випадках немає можливості провести математичні моделювання, які задовільнили б конструкторів повною інформацією. Для двигунних установок, що випускаються серійно, характерним є підтвердження їх надійності, шляхом проведення натурних випробувань. Наприклад двигун РД-120, що використовується на других ступенях ракет-носіїв серії «Зеніт», проходить стендові вогневі випробування, а після заміни окремих піротехнічних вузлів - готовий до роботи в польоті [1].

**Метою** роботи є виявити форму і власні частоти коливань конструкції силової рами випробувального стенду, що може впливати на точність вимірювань при випробуваннях. Для цих цілей використовуються прикладні програмні пакети.

Роботи над створенням ракетних двигунів, які використовують детонаційний процес згорання палива в камері, ведуться в різних країнах давно [2-4]. Основною ідеєю, що спонукає вчених до пошуків у цьому напрямку, є вищий термодинамічний коефіцієнт корисної дії детонації в порівнянні з дефлаграцією. Окрім того, детонаційний

процес може відбуватися при відносно низьких значеннях тисків компонентів палива, що дозволяє відмовитись від важкого і складного турбонасосного агрегату, використовуючи просту витискувальну систему подачі [2]. Незважаючи на вище перелічені переваги, серійних двигунних установок поки немає. Останнє десятиліття можна охарактеризувати підвищеною увагою до цієї проблеми. Особливістю роботи детонаційних двигунів є імпульсний режим, або (в двигунах із газифікацією в спіновій детонаційній хвилі) циклічний динамічний характер навантаження конструкції і змінний вектор прикладення сили тяги. В таких умовах дуже складно точно визначити зусилля і, відповідно, імпульсні характеристики двигуна, тому доцільно використовувати маятникові стенди, які дозволяють фіксувати сумарний імпульс тяги.

В 80-х роках минулого століття в Інституті технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України було створено експериментальну базу і зразки твердопаливних ракетних двигунів зі шнуровими подовженими зарядами. В рамках цієї роботи виявлено особливості функціонування таких установок, а також розроблено методикку проведення експериментів. Досліди проводилися на маятниковому і імпульсному стенді (див. рис 1) [5].



Рисунок 1 - Випробувальні стенди ІТМ НАНУ і ДКАУ

Для проведення досліджень процесів у камері згорання детонаційних ракетних двигунів на рідкопаливних і газоподібних компонентах, такі установки потребують доопрацювання в плані дооснащення ємностями з основними компонентами палива і газами для продувки. Це в свою чергу накладає особливості на процес вимірювання тяги, а також впливає на його точність. З метою здійснення експериментів, було розроблено силову раму (див. рис.2). Для можливості роботи на двох різних стендах, конструкція спроектована з уніфікацією вузлів кріплення.

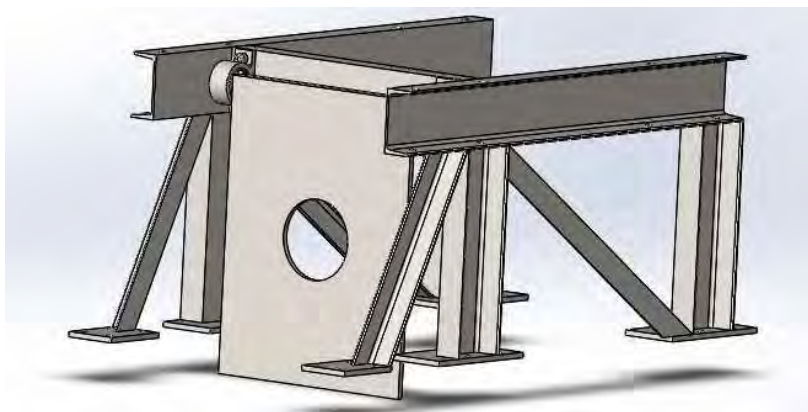


Рисунок 2 - Силова рама

Перший варіант стенду - стаціонарний. Силова рама кріпиться на бетонній основі, розміщеній в металічній бронекамері. На столі розміщується модель детонаційного ракетного двигуна з газифікацією палива в спіновій детонаційній хвилі (див рис.3).

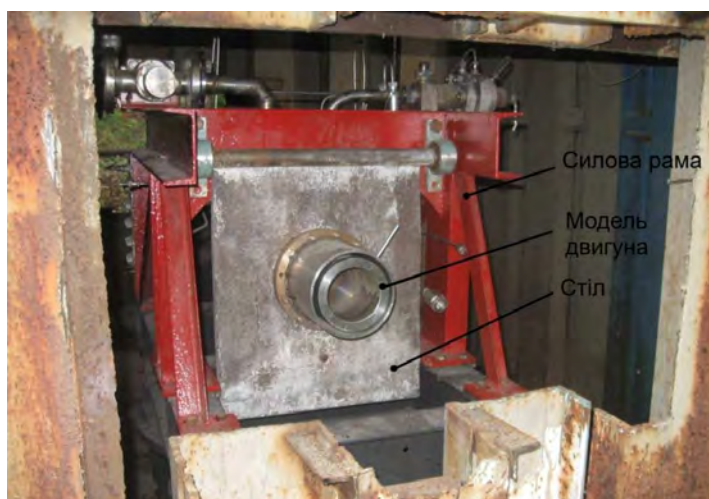


Рисунок 3 - Силовая рама з розміщеною на столі моделлю детонаційного ракетного двигуна з газифікацією палива в спіновій детонаційній хвилі

Другий варіант передбачає закріплення рами на тросах маятнкового стенду. При цьому стіл фіксується нерухомо, а до нижніх вузлів рами прикріплюються ложементи з балонами, наповненими газами. Така конструкція дозволяє досліджувати роботу імпульсних детонаційних двигунів. Комп'ютерна 3-D модель зображена на рис.3 з моделлю двигуна.

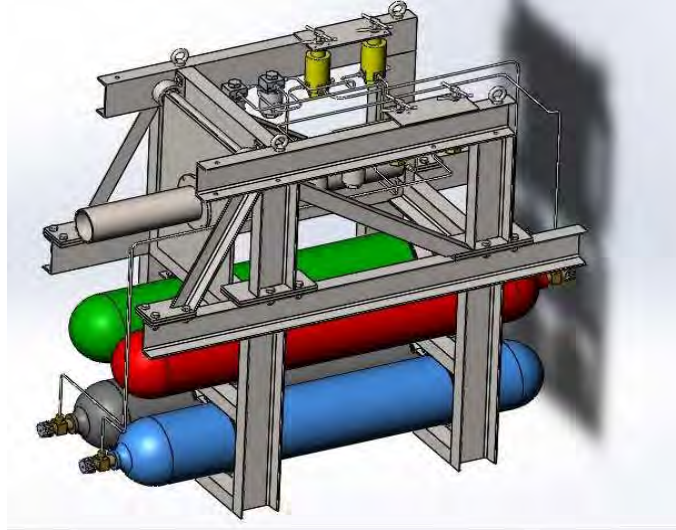


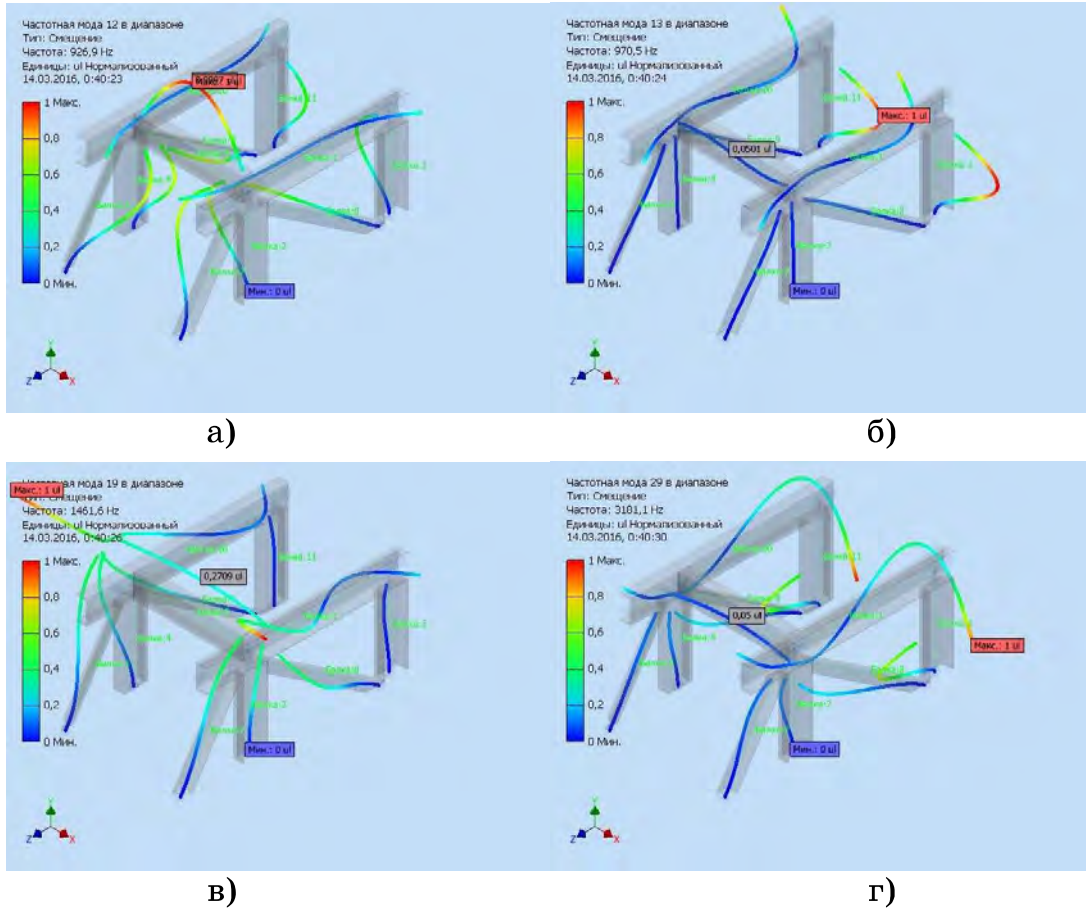
Рисунок 4 - Комп'ютерна 3-D модель силової рами з ложементами і двигуном

Важливою умовою в процесі вогневих випробувань є демпфірування коливань стенду, а також відсутність резонансу з частотами робочих процесів в камері згорання, чи з елементами випробовуваного двигуна [6]. Моделювання рами проводилося з метою апріорної компоновки вузлів пневмо-гідросхеми, а також для виявлення спектру частот власних коливань конструкції при максимальному навантаженні. Вихідними даними був діапазон вимірювань сили тяги 0-20000Н. Оскільки критерієм міцності є втрата жорсткості, то перевірочний розрахунок вівся по досягненню в елементах конструкції напружень, рівних межі текучості матеріалу профілів. Коефіцієнт запасу міцності при цьому ставить 10. Отримані форми втрати стійкості проаналізовані на предмет відповідності фізичній картині процесу і приближення частоти власних коливань до резонансної (див. рис. 5).

Для випадку випробувань імпульсного двигуна, що працює на газоподібних компонентах палива було проведено розрахунок кута відхилення маятника, у складі якого є силова рама з ложементами і балонами з газами, та власне модель. Очікуване (проектне) значення



сили тяги в цьому експерименті рівне 1500 Н. Для розрахунку було використано 3-D модель, що описана вище. Маса конструкції маятника склала 491,6 кг. Диференційне рівняння розв'язувалося при умові плоско- паралельного руху. Результат приведений на рис. 6.



Рисинок 5 - Візуалізована форма і величина амплітуди власних коливань при дії максимального навантаження

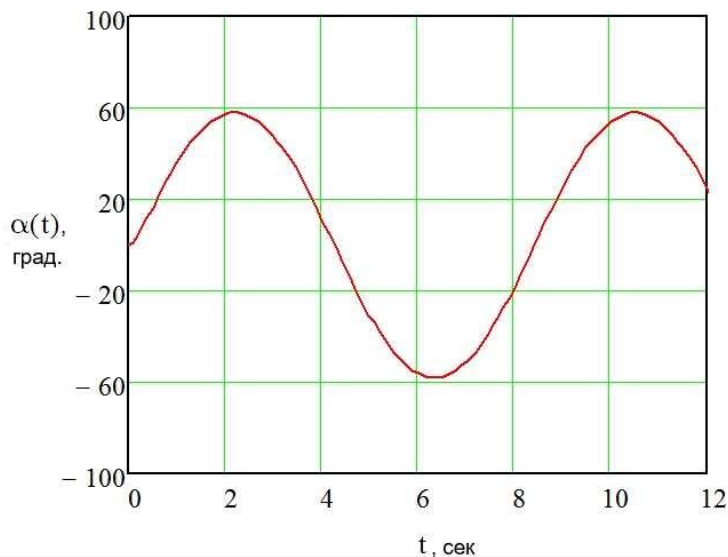


Рисунок 6 - Графік зміни кута нахилу тросів маятника від часу

**Висновок.** В роботі викладено проектні матеріали розробки елементів випробувального комплексу. Приведено результати комп'ютерного моделювання конструкції силової рами. Розраховано її частоти коливань для випадку максимального навантаження конструкції під час випробувань. Приведено графік зміни кута нахилу тросів маятника стенду при роботі моделі імпульсного детонаційного ракетного двигуна.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Галеев А.Г. Основы устройства испытательных стендов для отработки жидкостных ракетных двигателей и двигательных установок. / А.Г. Галеев, –руководство для инженеров-испытателей, Изд-во ФКП «НИЦ РКП», 2010. – 180 с.
2. Импульсные детонационные двигатели / под ред. д.ф.-м.н. С.М. Фролова – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2006. – 592 с.
3. Shank Jason C. Development and testing of a rotating detonation engine run on hydrogen and air: thesis, presented to the Faculty Department of Aeronautics and Astronautics Graduate School of Engineering and Management Air Force Institute of Technology Air University Air Education and Training Command In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Aeronautical Engineering / Jason C. Shank. – USAF, 2012. – 70 p.
4. Быковский Ф.А. Непрерывная спиновая детонация / Ф.А. Быковский., С.А. Ждан – Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013 – 423с.
5. Василів С.С. Розробка моделі для дослідження газифікації палива в спіновій детонаційній хвилі / Журнал «Вісник Дніпропетровського університету» серія «Ракетно-космічна техніка», Т22 №4 Вип. 17 том 1 ISSN 2409-4056 Дніпропетровськ, «Видавництво ДНУ», 2014 – 99 ст.
6. Персов Б.З. Расчет и проектирование экспериментальных установок. / Б.З. Персов, – Изд. 2-е, исправленное, – Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2006. – 348с.