

РАКЕТНИ ДВИГАТЕЛИ, ПРЕДНАЗНАЧЕНИ ЗА ДИНАМИЧНИ ТЕСТОВЕ НА СТРОИТЕЛНИ КОНСТРУКЦИИ

Христофор Скандалиев^{1,2}, Весислава Тотева¹

¹Химикотехнологичен и металургичен университет – София

²Клуб за аерокосмически технологии “Зодиак” – Кюстендил
e-mail: fori2ivanov@yahoo.com

Ключови думи: Ракетни двигатели, аерокосмически технологии, динамични тестове, екология, „зелени“ твърди ракетни горива

Резюме: Изследването представя концептуален модел за употреба на твърдогоривни ракетни двигатели като средство за създаване на възбуждаща сила при динамични изпитания на масивни строителни конструкции. Посочени са примери за видовете конструкции, подходящи за приложение на метода - мостове, сгради, кули, комини и блокове на електроцентрали. Направено е описание на технологичния модел и конструктивните особености на разработените твърдогоривни двигатели. Приложени са резултати от проведените баллистични тестове на три различни типове двигатели и анализ на получените данни, които показват че всеки един от тях е реално приложим за конструкции със съответния размер и характеристики.

ROCKET MOTORS DESIGNED FOR DYNAMIC TESTS OF BUILDING STRUCTURES

Hristofor Skandaliev^{1,2}, Vesislava Toteva¹

²University of Chemical Technology and Metallurgy – Sofia

¹Club for aerospace technology “Zodiac” – Kyustendil
e-mail: fori2ivanov@yahoo.com

Keywords: Rocket engines, Aerospace technologies, Dynamic tests, Ecology, "Green" solid rocket propellants

Abstract: The study presents a conceptual model for the use of solid-fuel rocket motors as a means of creating an excitation force in the dynamic testing of massive building structures. Examples of the types of structures suitable for the application of the method are given - bridges, buildings, towers, chimneys and blocks of power plants. A description of the technological model and design features of the developed solid fuel motors is made. The results of the conducted ballistic tests on three different types of engines and an analysis of the obtained data are attached, which show that each of them is applicable for structures of the corresponding size and characteristics.

Въведение

При изпитанията на масивни строителни конструкции се провеждат специфични тестове за определяне на реакцията на конструкцията към дадени въздействия и отчитане на тяхното поведение при динамични натоварвания. Целта е да се установи напрегнато-деформационното състояние на структурата, както и да се оцени действителната схема на работа в режими на собствени, или принудителни вибрации. Регистрирането на параметри като честота и период на собствени колебания, коефициент на затихване, амплитуда, може да се извършва или в режим на нормално експлоатационно натоварване, или чрез принудително предизвикани динамични въздействия. На такива изпитания могат да бъдат подложени стомано-бетонни, стоманени, дървени и други видове строителни конструкции, като мостове, сгради, промишлени халета,

комини, кули и мачти, корпуси на реактори в електроцентрали, язовирни стени и други видове масивни структури [2, 3].

В практиката най-често използваният подход за провеждане на динамични изпитания е модалният анализ, при който обикновено се верифицират математически модели, получени чрез метода на крайните елементи [1, 2]. Целта на модалния анализ е да се намерят формите и честотите, при които структурата ще усилва ефекта от приложените натоварвания, които могат да предизвикат разрушителни резонансни честоти без затихване. Модалният анализ може да даде информация за естествените честоти на обекта, параметрите на затихване и вида на модалните форми за различни честоти и възбуждащи сили. Така получените данни позволяват на инженерите да дадат становище за състоянието на обекта, или да променят и оптимизират дизайна му, така че да бъде по-малко чувствителен към приложените сили [1].

Провеждането на мониторинг на строителните конструкции при нормално експлоатационно натоварване дава ценна информация за състоянието и поведението на структурата, но е продължителен във времето процес и от него не се получават достатъчно данни при евентуални екстремни натоварвания. За тази цел се налага да се правят допълнителни динамични тестове с нарочно предизвикани екстремни сили, приложени на точно определени за всяка конструкция точки на въздействие и отчитане на реакцията на обекта. За възбудително силово натоварване (excitation force) се използват няколко основни източници:

- ударно натоварване чрез падане на специално пригодени тежести с маса, която е приблизително 0,1% от масата на изпитваната конструкция;
- ексцентрични вибрационни машини, създаващи вибрации на различни работни честоти и сили в повече от едно направление;
- серво-хидравлични възбудители, работещи в широк спектър от честоти;
- използване на контролирани експлозии чрез взривни вещества (ВВ).

Най-често изследваният честотен интервал е 0-15Hz, но е установено, че посочените типове възбудители не дават достатъчно точни данни за динамичен отговор на изследваните конструкции при честоти под 1Hz, които са характерни за много от големите структури. Също така, проблемно е осигуряването от тези източници на възбуждаща сила в хоризонтална равнина, особено при високи и масивни обекти. Едно удобно решение е използването на ракетни двигатели, създаващи възбуждаща сила в необходимата посока, с подходяща продължителност и големина. За средно големи обекти като мостове, комини, кули и сгради са приложими двигатели, създаващи тягова сила 5-20kN и време на работа 0,5-3s. Използват се химически твърдогоривни ракетни двигатели, поради своята опростеност и лесно обслужване. Възможно е също приложението и на парни или газови цилиндри под налягане, които обаче изискват по-сложно оборудване и системи за монтаж [1, 4–9].

Същност и обхват на метода с ракетна възбуждаща сила

Използването на твърдогоривни ракетни двигатели като възбудители на трептения и модални изследвания на конструкции е метод, който е бил прилаган в някои държави след средата на XX век. Още през 1957г. в Тедингтън, Великобритания са правени подобни тестове на железобетонен комин на електроцентрала, описани от С. Scruton, D.A. Harding в [12].

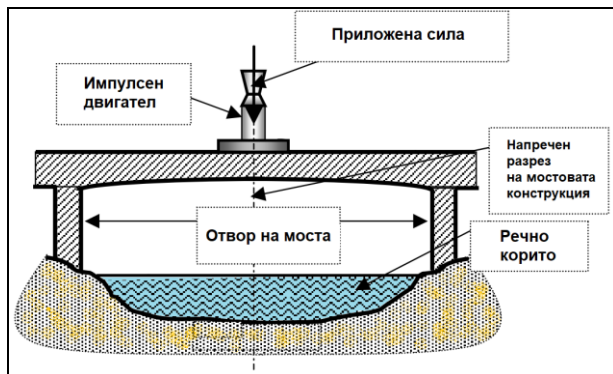
В Канада и Чехословакия през 70-те и 80-те години са използвани ракетни двигатели за изследване на „флатер“ ефект на крилата на самолети, както и динамични изследвания на мостове и сгради [10, 11]. В лабораториите L. L. L., Livermore, California са провеждани изпитания на структурите на блокове и сгради на атомни електроцентрали за противоземетръсна устойчивост с помощта на няколко вида ракетни възбудители на сила. Едните от тях предизвикват импулсна тяга чрез изпускане на студен газ или пара през сопло, а другите са типични химически ракетни двигатели, работещи с едноосновно или композитно твърдо ракетно гориво [4–6].

За изследване на структури с много ниски собствени честоти са провеждани динамични тестове с употреба на много на брой ракетни двигатели, работещи в паралел. В [10] е описано изпитание на 120 метров комин с помощта на 18 броя ракетни двигатели, приложени на върха на съоръжението и работещи едновременно. Всеки един от тях е създавал възбуждаща сила от 5kN, а реакцията на коминното тяло е била с амплитуда от около 5 см в неговия връх. С помощта на акселерометри са измерени натоварванията и е изчислен фактор на затихване (отношение на измерената към критичната стойност) = 0,01.

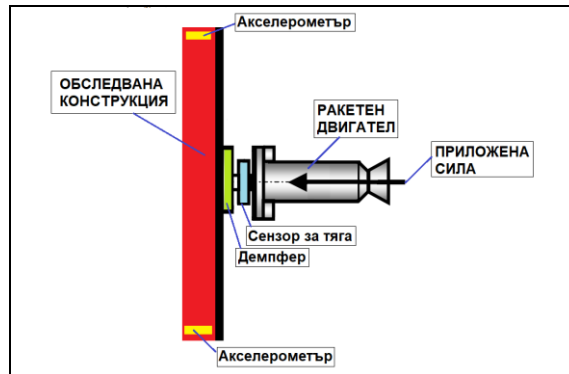
Динамичните изпитания на конструкции чрез принудителна възбуждаща сила изискват определяне на правилното място/места за прилагането и. Това става или чрез използване на модел, създаден по метода на крайните елементи, или получен опитно за дадената структура. Реакцията на съоръжението се измерва с помощта на преобразуватели на сила, или

импедансни глави, разположени в точно определени възли на преместване. Импедансните глави включват в себе си акселерометър, освен преобразувателя на сила. Получените данни от сензорите се обработват софтуерно и по този начин се получават триизмерни модели на поведение при различни честоти и натоварвания (моди).

Когато за възбудители на сили се използват ракетни двигатели, посочената схема на работа е същата. Те могат да бъдат приложени в желани точки от конструкцията в хоризонтално, вертикално, или друго необходимо за теста направление (Фиг. 1 и Фиг. 2).



Фиг. 1. Силово въздействие по вертикална ос



Фиг. 2. Възбудителна сила по хоризонтална ос

Употребата на ракетни двигатели при динамичните изпитания има своите предимства, както и някои слаби страни. Преимствата пред другите методи на силово възбуждане включват: простота на конструкцията, получаване на много ниски честоти, възможност за бързо провеждане на тестовете, удобство при прилагане на сили в хоризонтални и наклонени направления, малки габарити и собствена маса на възбудителите, лесно обслужване, сравнително ниска цена и икономическа изгода.

През годините, обаче методът с ракетно възбуждане е намалил своя дял в избора на съоръжения за принудителни сили, поради няколко причини: осъществява се по-строг контрол върху общоопасните средства, каквито са твърдите ракетни горива; силно ограничен е достъпът до съвременни ракетни технологии поради икономически и глобални политически интереси; по-строги са изискванията по отношение на екологичното въздействие; има липса на достатъчно практически опит; съществуват опасности от детонация на зарядите, пожари и замърсяване с токсични вещества; има трайна тенденция към покачване на цените на специалните конструктивни материали и компонентите за ракетни горива.

От направения анализ може да се направи извода, че повечето от посочените слабости на ракетните възбудители на сили са напълно преодолими. Ето защо целта на настоящата експериментално-изследователска работа е да се усъвършенства метода за използване на ракетни двигатели като възбудители на динамични натоварвания при тестове на строителни конструкции.

Експериментална дейност

Дейностите по разработване на иновативни модели ракетни двигатели за създаване на възбуждаща сила при динамични тестове на строителни конструкции са провеждани в две основни направления:

- разработване на нови състави твърди ракетни горива, които са нетоксични, не детонират, достъпни и евтини са и не отделят вредни емисии при своето изгаряне
- използване на конструктивни елементи, базирани на природни суровини, разградими биокompозити и геокompозити за цялостната структура на двигателните корпуси

Създадените горивни рецептури са базирани на окислителни нитрати и перйодати, в замяна на утвърдените в практиката перхлоратни състави. За разлика от тях се избягва риска от детониране, замърсяване с хлорни съединения и риска от пожари. За горивен елемент се използват природни и синтетични захари и естествени полимери. Цената и достъпността за използваните вещества и реактиви е в пъти по-ниска от тези използвани в стандартните перхлоратни горивни състави [14, 16].

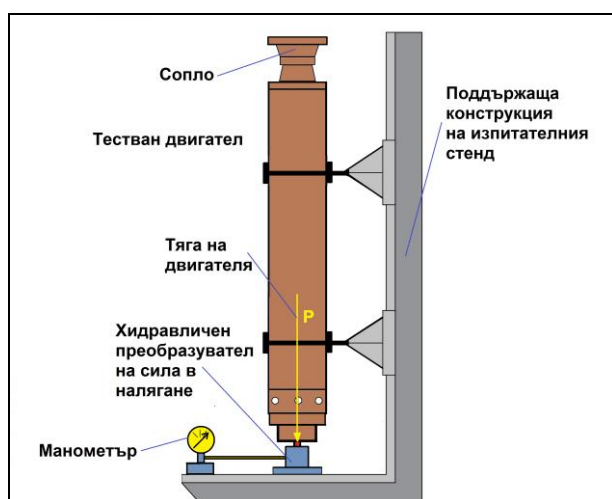
Корпусите на разработваните ракетни двигатели са изградени от метални сплави и от разградими композити на базата на природни влакна и естествени полимери. Термично

натоварените компоненти са от графитни и геокомпозити, способни да издържат температури над 2000°C. Важна особеност, обусловена от сферата на приложение на тези двигатели, е че за разлика от аерокосмическата им употреба, тук масовото съвършенство не е водещ фактор за конструкцията им. Масовото съвършенство изразява отношението на масата на използваното гориво към масата на корпуса на двигателя. Тъй като те не са предназначени за ракетни полети и се използват в урбанизирани територии, то е напълно допустимо конструктивно да бъдат направени с по-висок коефициент за сигурност и по-голяма маса на корпусите, респективно по-ниско масово съвършенство с основна цел повишаване на надеждността и безопасността при експлоатация.

Създадени са 3 групи двигатели за възбуждане на вибрации (Exciting Rocket Motor), съответно със стойности на произвежданата от тях полезна тяга: ERM-5 (тяга до 5kN), ERM-10 (до 10kN) и ERM-25 (до 25kN). Провеждани са експерименти и с по-малки двигатели, създаващи полезна тяга от 0,5kN до 2kN. Времето на работа на всеки конкретен двигател се задава в целевия интервал от 0,5s до 3s, според желаната зависимост „тяга-време на работа“. За целта се прави подбор на химическия състав, гранулометрията на използваните окислители, формата и количеството на твърдгоривните заряди и геометричните размери на камерата и соплото на съответния двигател. Използвани са 5 различни горивни формули, които имат различни: скорост на горене, специфичен импулс и начин на приготвяне. Това са екологични твърди ракетни горива, охарактеризирани при предишни изследвания с добре познати параметри на работа и минимални въздействия върху околната среда.

Два от съставите са от така наречения карамелен тип, защото се приготвят чрез стопяване на хетерогенна смес от окислител калиев нитрат и гориво, което е подсладител Изомалт, или обикновена кристална захар. Последната осигурява високи скорости на горене на съответните горивни състави. Другите три химични формули са с горивосвързващо вещество епоксидна смола, окислители нитрати и перiodати и енергетични добавки от прахообразен алуминий с микронен размер на фракцията (25-50 μm) и катализатори. Времето на работа на съответния двигател е в пряка зависимост от формата и разположението на горивните заряди в двигателя, чрез които се осигурява откритата площ на горене и масовия разход на продуктите от горенето, респективно и получаваната от двигателя полезна тягова сила [13–15].

При изпитанията е измервана създаваната тяга $F(N)$ чрез хидравличен преобразувател на сила в налягане и видеозапис, регистриращ показанията на свързания манометър. (Фиг. 3 и Фиг. 4) След обработка на резултатите се получават дискретни стойности на получената тяга, от които се изчертава графична зависимост, показваща действителния режим на работа на двигателя и времето му на работа $t(s)$. Това позволява да се направи сравнителен анализ с предварителните софтуерни симулации, на базата на които е проектиран съответния двигател, и да се верифицира използвания модел като цяло.



Фиг. 3. Конструкция на изпитателния стенд



Фиг. 4. Хидравличен преобразувател

При проведените три серии тестови изпитания чрез наземни изпитателни стендове, поотделно за трите групи ракетни двигатели, е получена база данни, обобщени в Таблица 1.

Таблица 1. Данни за получената тяга и време на работа на тестовите двигатели

Тип на рак. двигател	№ на теста	Вид гориво	Време на работа, s	Създадена тяга, kN
ERM-5	5Т1	I-8, Периодатно	3,02	1,18
ERM-5	5Т2	"Плазма"	1,42	3,1
ERM-5	5Т3	"Дракон-22"	1,15	4,6
ERM-10	10Т1	КН-Изомалт	2,83	2,2
ERM-10	10Т2	КН-Изомалт	1,55	5,4
ERM-10	10Т3	КН-Захар	0,83	10,25
ERM-25	25Т1	КН-Изомалт	2,03	12,1
ERM-25	25Т2	КН-Изомалт	1,3	14,6
ERM-25	25Т3	КН-Захар	1,04	25,1

Общ изглед на трите разновидности експериментални твърдогоривни двигатели е представен на Фиг. 5, а кадри от проведените тестови изпитания на Фиг. 6, Фиг.7 и Фиг. 8.



Фиг. 5. Експерименталните двигатели след тестовете



Фиг. 6. Стенд за ERM-25



Фиг. 7. Двигател ERM-10 на изпитателен стенд



Фиг. 8. Кадръ от теста

Обсъждане на резултатите

В резултат на проведената научноизследователска и конструкторска работа са създадени прототипи на твърдогоривни ракетни двигатели с цел използването им като

възбудители на сили при динамични изпитания на строителни конструкции. Получените експериментални резултати показват, че заложените в предварителните задания параметри „тяга“ и „време на работа“ са достижими чрез използване на няколко вида екологични твърди ракетни горива. Подборът на техния химически състав и технологичните условия на работа осигуряват получаването на широк спектър ракетни двигатели, способни да предизвикат необходимите динамични усилия за провеждане на такъв вид изпитания.

Предимствата на тези двигатели са високата надеждност и безопасност при експлоатация, липса на токсични продукти от изгарянето на горивата, опростена конструкция, достъпност на материалите, икономическа ефективност.

Литература:

1. Herman Van der Auweraer, Structural Dynamics Modeling using Modal Analysis: Applications, Trends and Challenges., Leuven, Belgium, 2001
2. Павлова, Ю, Банков Б., Изчисляване на строителни конструкции по метода на крайните елементи, Техника, 1989
3. Марков, Т., Изпитване и моделиране на строителни конструкции и съоръжения., Техника, 1973
4. Agbabian Associates. Verifying seismic design of nuclear reactors by testing., Report R-7931, 4908 (July 1979), prepared for Lawrence Livermore Laboratory
5. H. J. Weaver, Dynamic testing of nuclear power plant structures - the evaluation., Lawrence Livermore Laboratory, 1980
6. P. Ibáñez and al. Methods and benefits of experimental structural dynamic evaluation of nuclear power plants., Nuclear Engineering and Design, Volume 64, Issue 1, 1981, Pages 1–32
7. Charles, R. Farrar, Thomas A. Duffey, Phillip J. Cornwell, Scott W. Doebling, Excitation Methods For Bridge Structures., 17th International Modal Analysis Conference Kissimmee, FL, Feb 1999
8. S. Pietrzko, R. Cantieni, "Modal Testing of Steel/Concrete Composite Bridge with Servo-Hydraulic Shaker., EMPA, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research CH-8600, Dübendorf, 1996
9. Y. Deger, R. Cantieni, S. Pietrzko, "Modal Analysis of an Arch Bridge: Experiment, Finite Element Analysis and Link", Proc. of 12th International Modal Analysis Conference, Honolulu, USA, Jan. 31 -Feb. 3, 1994
10. C. E. Tammadge, Excitation by rockets., Canadair Limited, Montreal, Canada, 1975
11. František LUDVÍK, Application of energetic materials in civilian sphere., Advances in MT, 2/2006
12. C. Scruton, D.A. Harding. (14th ed.), Measurement of the Structural Damping of a Reinforced Concrete Chimney Stack at Ferry Bridge " B " Power Station, Report NPL/Aero 1323, National Physical Laboratory, Teddington (1957)
13. Сивева, Н., Скандалиев Х. и колектив, *Екологично чисти ракетни двигатели за граждански цели.*, Шеста международна конференция с Младежка научна сесия „ЕКОЛОГИЧНО ИНЖЕНЕРСТВО И ОПАЗВАНЕ НА ОКОЛНАТА СРЕДА“ (ЕИООС'2019) 5-7 юни 2019 г., Бургас
14. Крумов, К., Скандалиев Х., и колектив, *„Зелени“ твърди ракетни горива – възможни и невъзможни решения.*, X Международна Научна Конференция ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИИ. ОБРАЗОВАНИЕ. СИГУРНОСТ, Боровец, 07- 10 юни, 2019
15. Сивева, Н., Крумов К. и колектив, *Изследване на калориметрични свойства и параметри на нови екологични ракетни горива.*, XVII Научна постерна сесия за млади учени, докторанти и студенти, ХТМУ, 2020
16. Niklas Wingborg, *Development of Green Rocket propellants: An overview*, Swedish Defence Research Agency, FOI, 2018