

УДК 621.454.22.018

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ БОКОВЫХ УСИЛИЙ,
ДЕЙСТВУЮЩИХ НА КАМЕРУ ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЗАПУСКЕ В БАРОКАМЕРЕ**

©2009 В. Н. Шнякин, А. Н. Коваленко, В. Н. Коваленко, А. В. Родькин, А. П. Макотер

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное», г. Днепропетровск

Представлены результаты экспериментальных работ по определению боковых усилий, действующих на высотную камеру ЖРД при запуске в барокамере. Боковые усилия определились при помощи датчиков, установленных в стяжных креплениях камеры двигателя, полученные результаты пересчитывались в физические величины на основании статической и динамической калибровки датчиков.

Камера двигателя, жидкий ракетный двигатель, боковое усилие

При углубленных исследованиях динамических процессов, происходящих в ЖРД, возникают новые задачи, одной из которых является определение боковых усилий, действующих на камеру сгорания в процессе запуска двигателя.

Для оценки величин боковых усилий, возникающих на запуске и на режиме, была проведена специальная экспериментальная работа. Боковые силы определялись для ЖРД тягой 250кг, работающего на компонентах АТ+НДМГ, с геометрической степенью расширения сопла ~100. Испытания проводились в барокамере, оснащенной газэжекторной установкой с вертикальным расположением камеры двигателя.

Поток продуктов сгорания всегда имеет некоторую неравномерность поля давлений, обусловленную схемой организации рабочего процесса. На запуске степень неравномерности всегда выше, так как динамические процессы заполнения трактов, опережение одного из компонентов топлива оказывают существенное влияние на смесеобразование и горение. На запуске, как правило, присутствует турбулентное догорание компонентов топлива в закритической части сопла, которое также приводит к дополнительной неравномерности поля давлений. На неравномерность газового потока оказывают влияние и технологические особенности изготовления камер двигателя: отклонение от круглости критического сечения; искривление оси сверхзвуковой части сопла, обусловленное изготовлением сопла из нескольких блоков; отклонения от идеального контура, обусловленные погрешностями при механической обработке, термическими де-

формациями при пайке и влиянием сварочных усадок при соединении блоков между собой (так называемая «корсетность»).

Кроме того, запуск в барокамере имеет ряд особенностей, которые могут повлиять на оценку составляющих боковых усилий, обусловленных собственно внутрикамерными процессами. К ним относятся:

- наличие противодействия, что приводит при большой степени расширения сопла к появлению дополнительных динамических эффектов при движении скачка уплотнения по соплу;

- возвратные течения продуктов сгорания из ГДТ в барокамеру, возникающие в период запуска камеры и ГДТ;

- механические колебания двигателя, обусловленные жесткостью и массой тягоизмерительного устройства: их влияние можно будет устранить, используя отличие резонансных частот двигателя и оборудования.

Все эти факторы, как определяющие рабочие процессы, так и технологические особенности изготовления несут, как правило, случайный характер и зависят от каждого узла индивидуально.

Поэтому выход скачка уплотнения из сопла камеры двигателя при запуске всегда сопровождается появлением дополнительной боковой силы, обусловленной неравномерным, быстроменяющимся полем давления, действующего на боковую поверхность сопла. На практике выполнение расчетной оценки этого явления крайне затруднительно. Однако для камер ЖРД высотных ступеней, с большими соплами, возникновение на запуске боковых сил может приводить не

только к появлению возмущений на ступень, но и к разрушениям конструкции.

В основу метода определения боковых усилий были положены результаты измерений усилий в стяжках крепления двигателя датчиками силы (тип – ЛХ-144). Кроме того, их использование позволило определить прямыми измерениями усилия, действующие в интерфейсах электромеханического привода, а также передаваемые от камеры двигателя на плиту ступени.

Оценка пространственных колебаний конструкции при работе двигателя производилась с помощью тензорезисторов (4 тензомоста), установленных на поверхности этих стяжек, а также с помощью 16 виброакселерометров, установленных в местах крепления стяжек к камере ЖРД и на цилиндрическом участке камеры в двух плоскостях и в трех взаимноперпендикулярных направлениях. Для оценки влияния температуры на стяжки рядом с тензорезисторами были установлены температурные датчики.

Датчики ЛХ-144 тензометрического типа, поэтому, по аналогии связи между силой и перемещением в колебательной системе, связь между боковой силой и сигналом датчика принималась в виде

$$S(t) = \int_0^t F(\tau) \cdot K(t - \tau) d\tau, \text{ т.е. механическая}$$

система рассматривалась как линейный фильтр с импульсной переходной функцией $K(t - \tau)$, на входе которого – боковая сила $F(\tau)$, а на выходе – сигнал датчика $S(t)$.

Импульсные переходные функции системы определялись по экспериментальным данным, полученным в ходе динамической тарировки системы с применением реально-го, полностью обвязанного двигателя.

Датчик ЛХ-144 перед проведением испытаний был откалиброван на специальном стенде в частотном диапазоне от 0 до 300Гц, полученная тарировочная характеристика - по пересчету замеренных данных в физические величины.

Статическая калибровка выполнялась для двух случаев нагружения в плоскостях расположения стяжек. По первой схеме нагружения боковая нагрузка создавалась в горизонтальной плоскости перпендикулярно оси камеры. По второй схеме усилие при-

кладывалось под углом около 45° к оси камеры. Нагрузка составляла от 0 до 170 кгс с интервалом 20 кгс и выполнялась в прямом и обратном направлениях. При второй схеме нагружения кроме бокового усилия создавалось еще и осевое усилие, частично имитирующее тягу камеры двигателя.

Для получения динамических свойств системы имитировалось ступенчатое изменение боковой силы с записью показаний датчиков, установленных в стяжках и в нагрузочном устройстве. Динамические усилия поочередно прикладывались к камере в плоскостях расположения датчиков, под углом 90° и 45° к оси, в диапазоне от 0 до 80 кгс с интервалом 20 кгс. Динамическое усилие создавалось путем резкого снятия предварительно приложенной статической нагрузки. Пример изменения калибровочных усилий показан на рис. 1, а графики изменения сигналов датчиков в стяжках – на рис. 2 и 3. На основании этих измерений получены импульсные переходные функции системы для датчиков ТС1 и ТС2 при различных величинах и направлениях приложения калибровочных сил (см. рис. 4 и 5).

Анализ полученных данных показал следующее:

- время изменения калибровочного усилия не превышало 1...1,5мс, что свидетельствует о достаточной крутизне фронта изменения усилия;
- импульсные переходные функции $K(t)$, полученные по показаниям датчиков в двух плоскостях, практически совпали;
- импульсные переходные функции $K(t)$, определенные при различных уровнях нагружения (при $F > 20$ кгс), мало отличаются, основная частота колебаний системы неизменна, что говорит о линейном поведении системы;
- импульсные переходные функции $K(t)$, полученные при различных углах (к оси камеры сгорания) приложения сил, практически не отличаются, что позволяет упростить постобработку, не учитывая изменения тяги. Это объясняется тем, что узел качания имеет осевую жесткость, которая на несколько порядков больше, чем жесткости стяжек;
- основная частота колебаний системы практически совпадает с результатом опре-

деления резонансных частот двигателя при виброиспытаниях.

В процессе проведения статической калибровки были проведены замеры радиального перемещения среза сопла под действием бокового усилия. Зависимость величины радиальных перемещений от боковой нагрузки имеет линейный характер. При усилении 170 кгс суммарные перемещения достигают 14...15 мм, что объясняется, в основном, деформациями силоизмерительного устройства.

Ввиду того, что сформулированная задача восстановления бокового усилия по результатам измерений усилий в тягах является

не корректно поставленной, в дальнейшем при обработке сигналов использовались алгоритм регуляризации А.Н. Тихонова [1] и программа, реализующая этот алгоритм. Ее настройка проведена на основе результатов динамической калибровки. На рис. 6 и 7 показаны результаты калибровки и импульсная переходная функция системы, а на рис. 8 – сравнение восстановленного по этим данным воздействия с записью калибровочного ступенчатого усилия.

На основе такого анализа был сделан вывод об удовлетворительном качестве восстановления калибровочной силы.

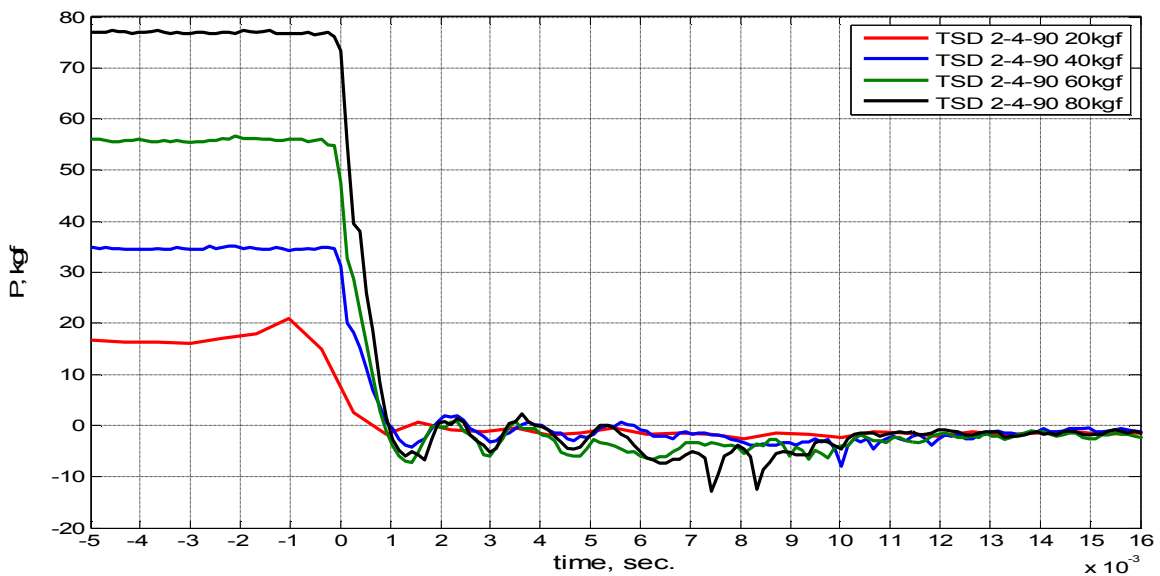


Рис. 1. Динамическая калибровка датчиков ЛХ-144. угол 90°

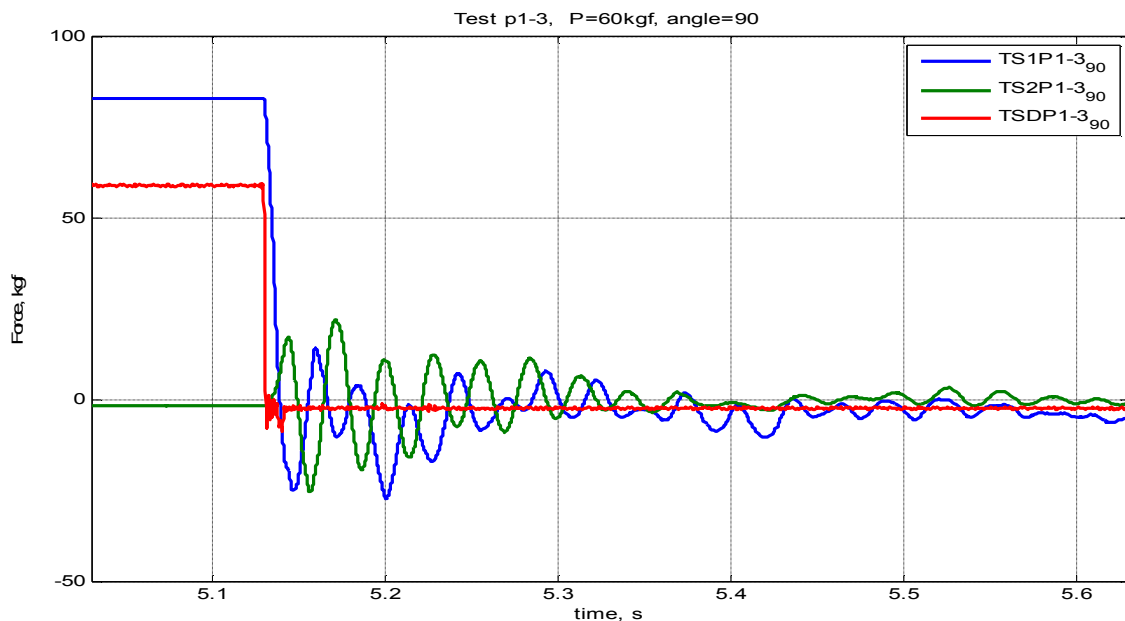


Рис. 2. Показания датчиков, установленных на стержнях, при нагружении силой 60кг под углом 90°

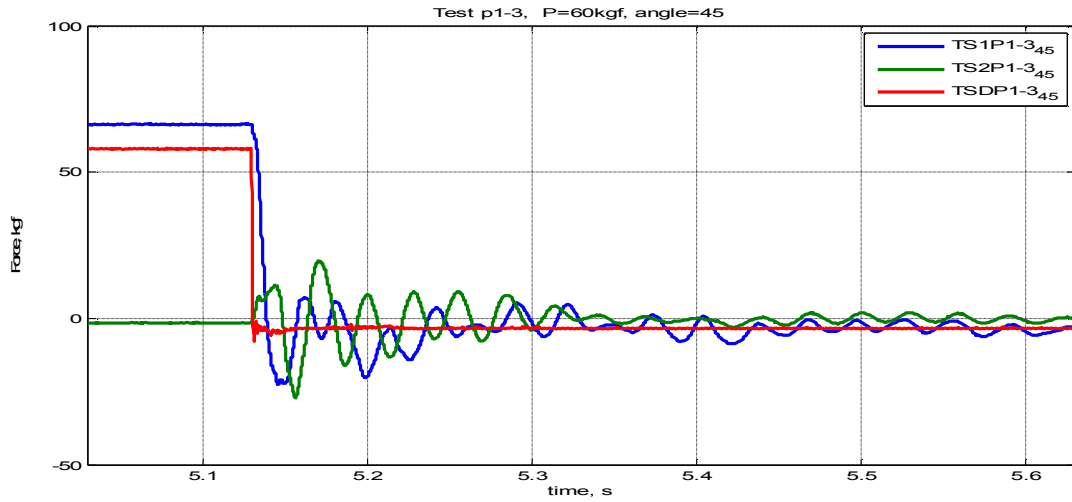


Рис. 3. Показания датчиков установленных на стяжках, при нагружении силой 60кг под углом 45°

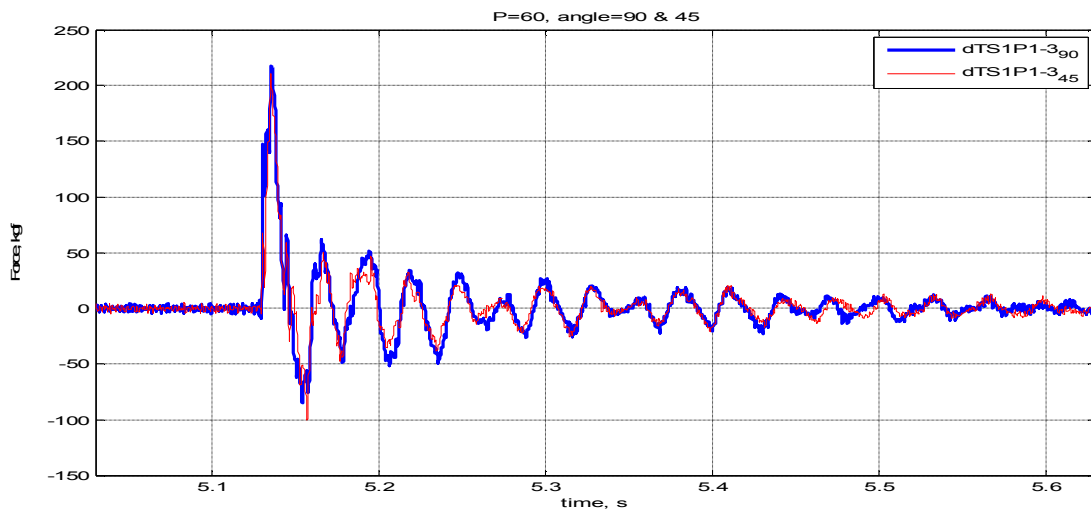


Рис. 4. Импульсная функция для случая нагружения силой 60кг под углом 45° и 90°, определенная по датчикам, установленным на стяжках, лежащих в плоскости действия силы

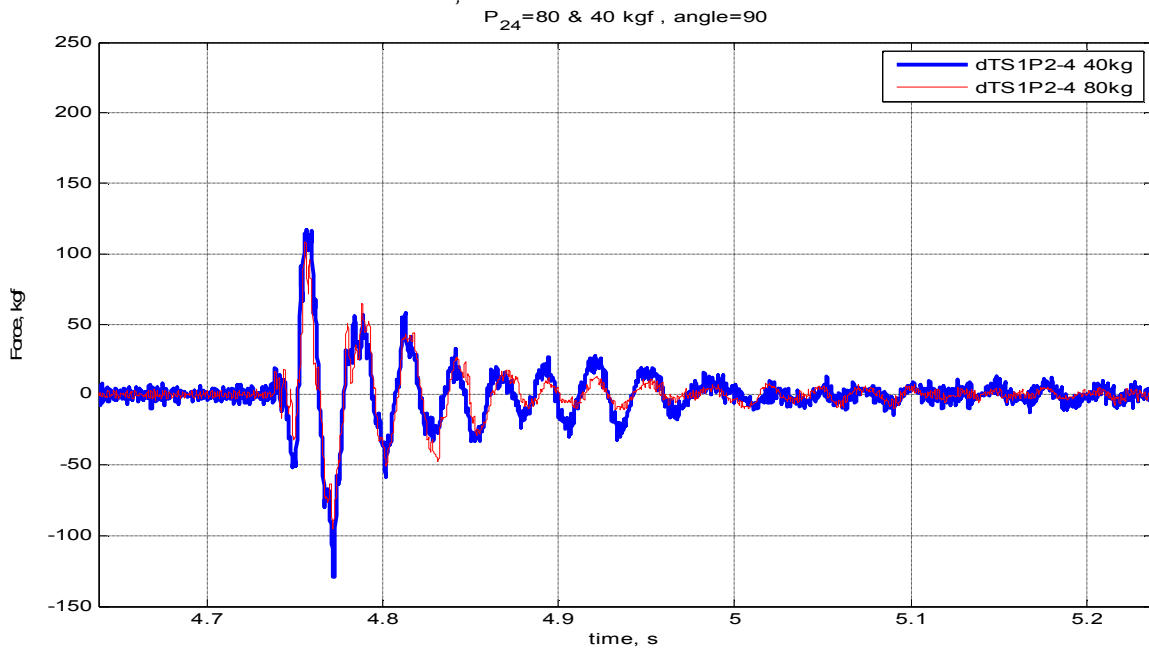


Рис. 5. Импульсная функция для случая нагружения силой 40кг и 80кг под углом 90°, определенная по датчикам, установленным на стяжках, лежащих перпендикулярно плоскости действия силы

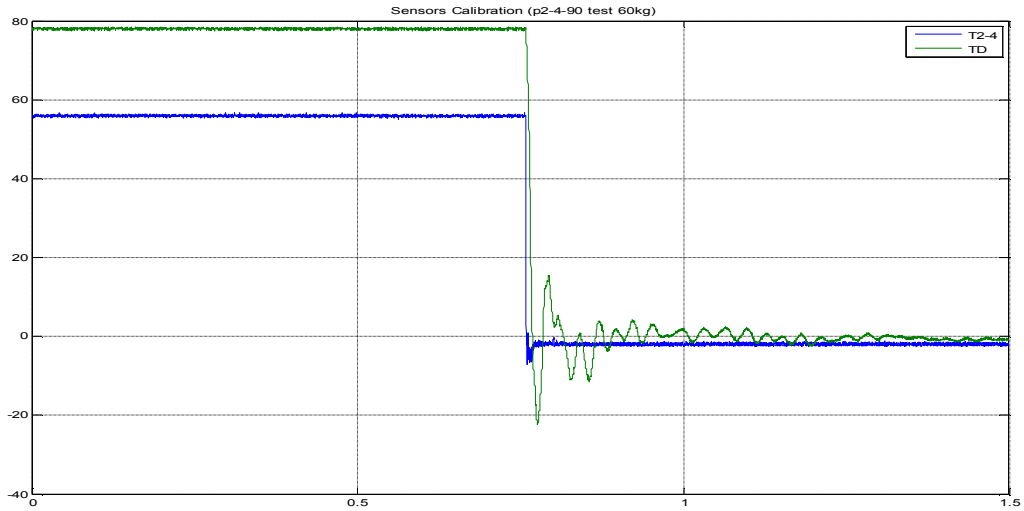


Рис. 6. Нагружение силой 60кг под углом 90°. Показания датчика установленного на стяжке в плоскости действия силы

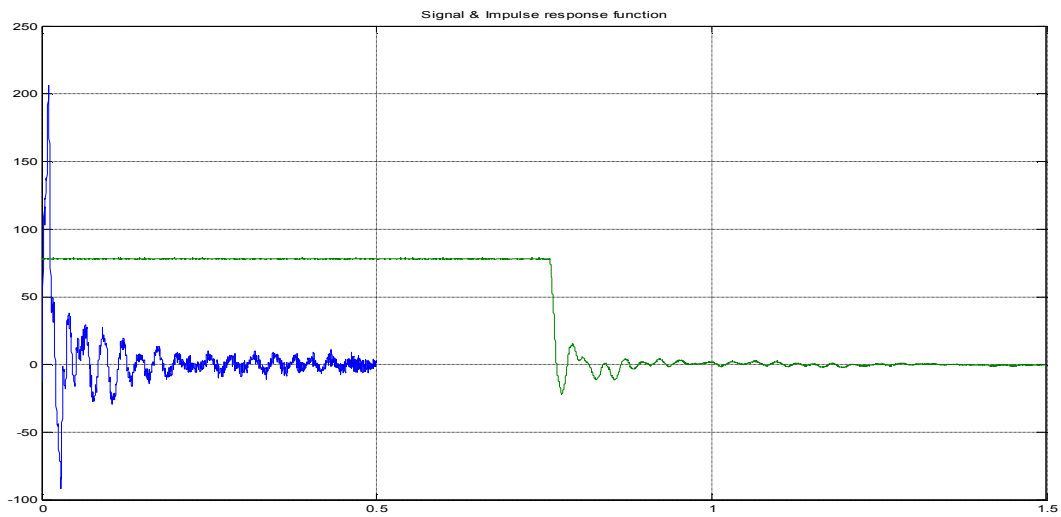


Рис. 7. Калибровочный сигнал и его импульсная функция

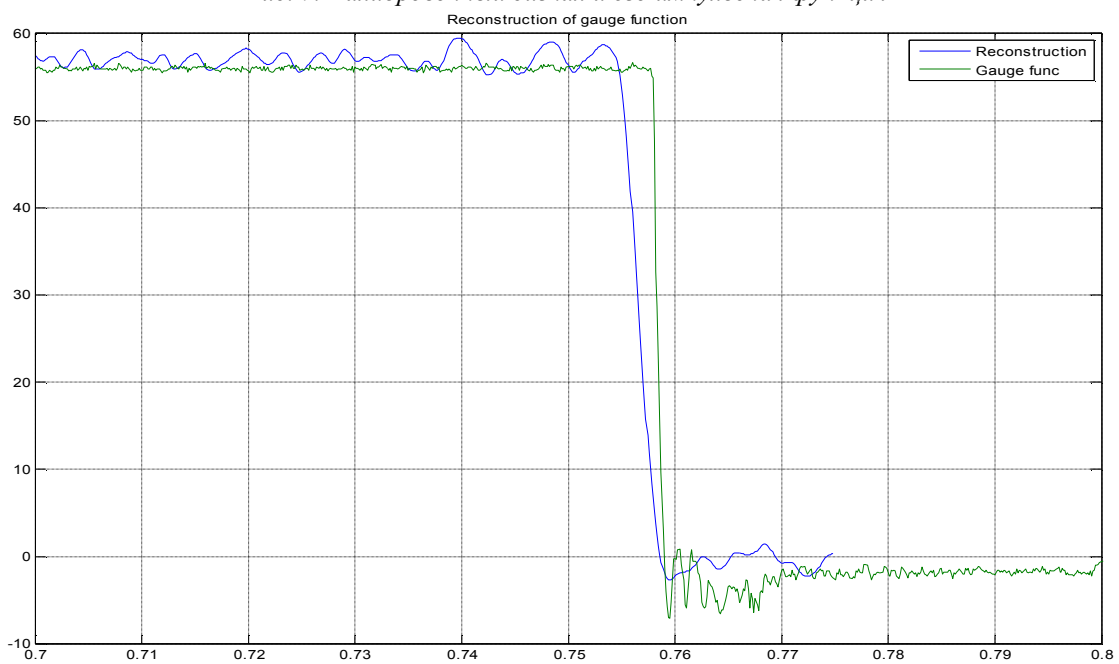


Рис. 8. Восстановленный по результатам динамической тарировки сигнал

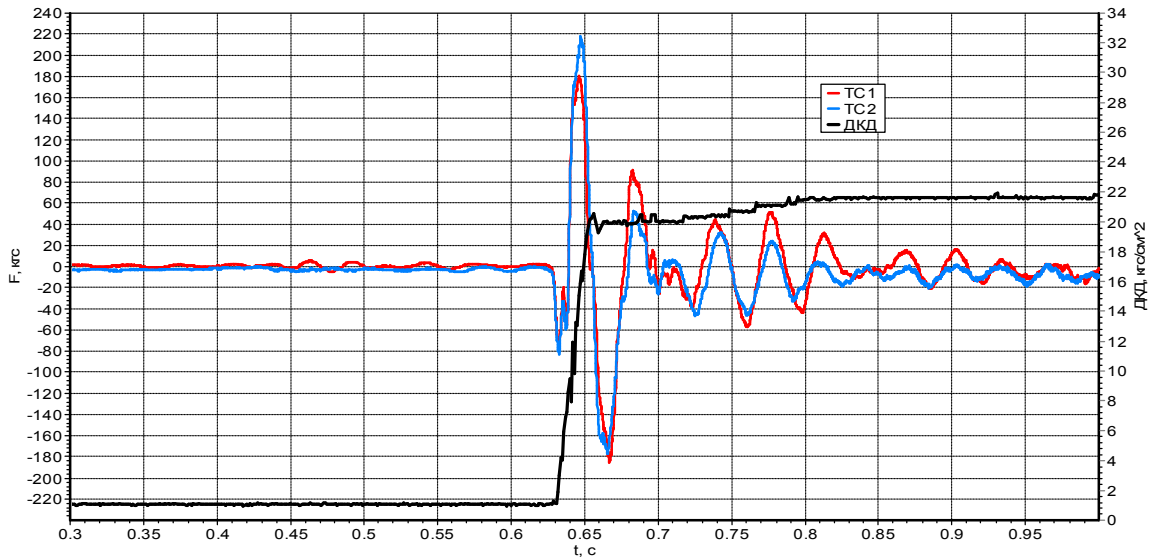


Рис. 9. Зарегистрированные усилия в период "холодного" запуска двигателя

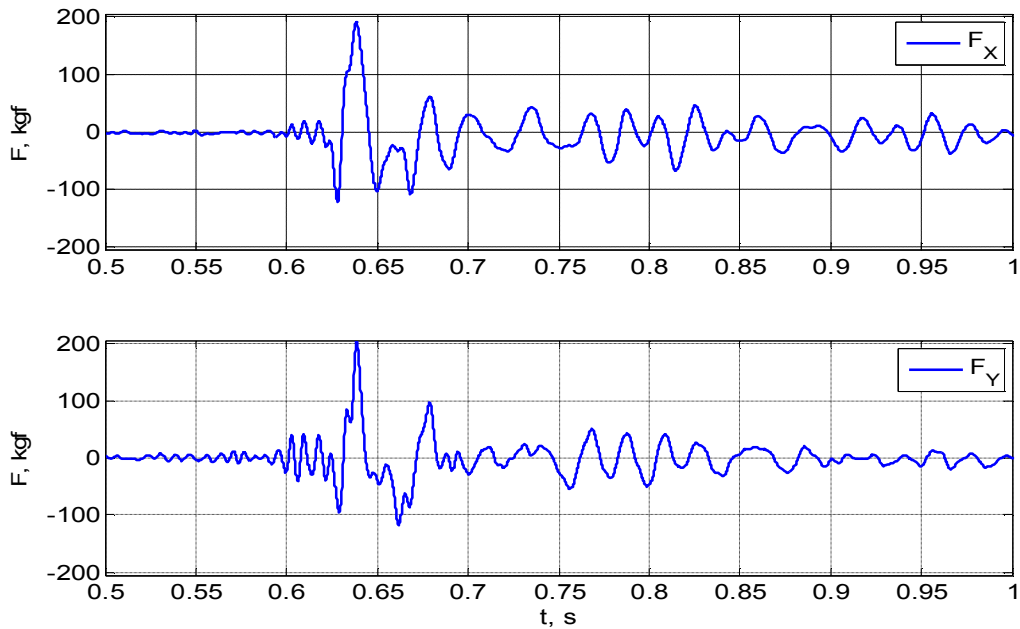


Рис. 10. Проекция бокового усилия на оси координат в период "холодного" запуска двигателя

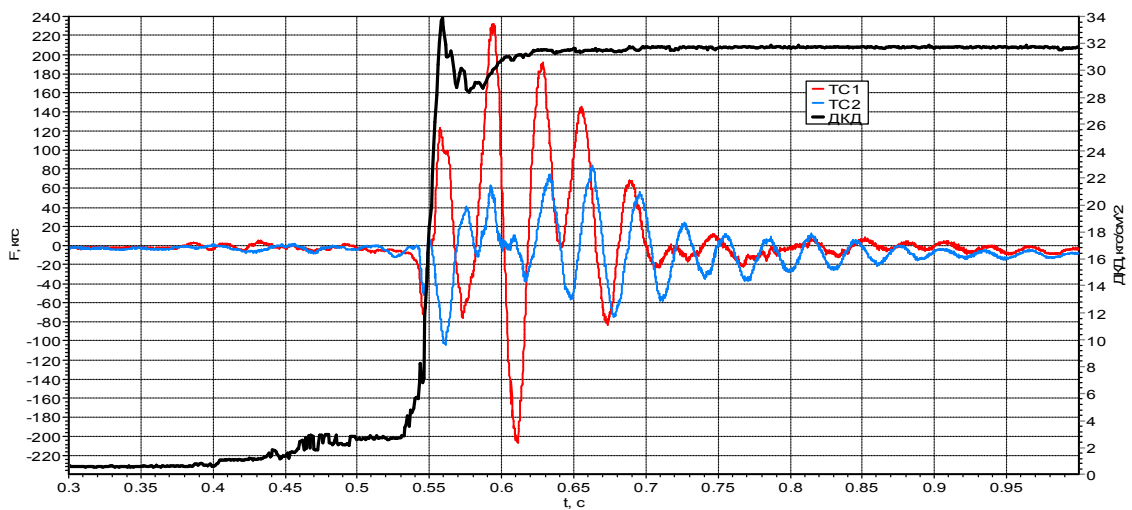


Рис. 11. Зарегистрированные усилия в момент запуска двигателя на предступень

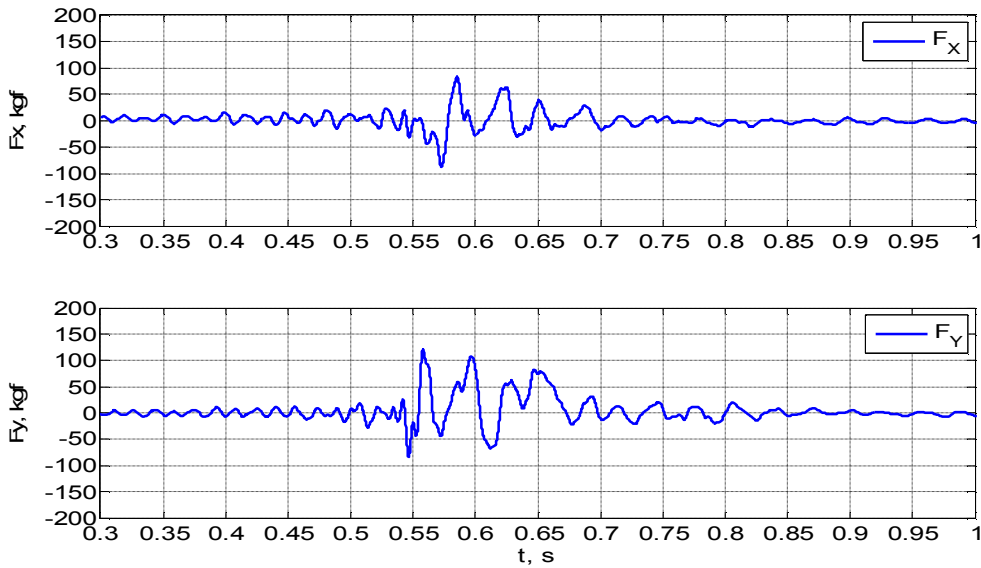


Рис. 12. Проекция бокового усилия на оси координат в период запуска двигателя на предступень

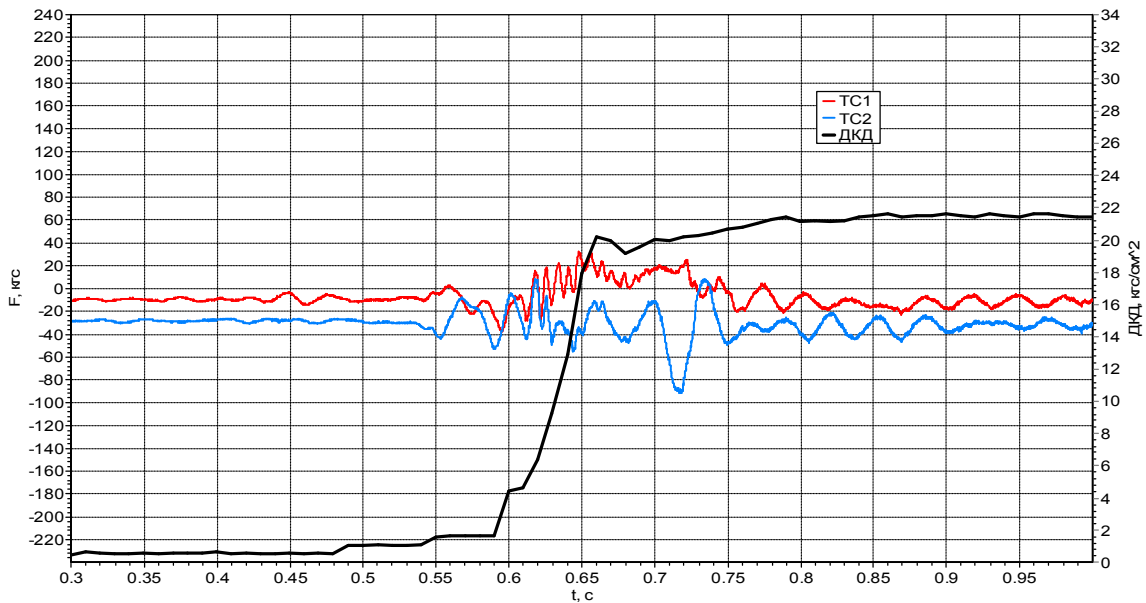


Рис. 13. Зарегистрированные усилия в момент "горячего" запуска двигателя

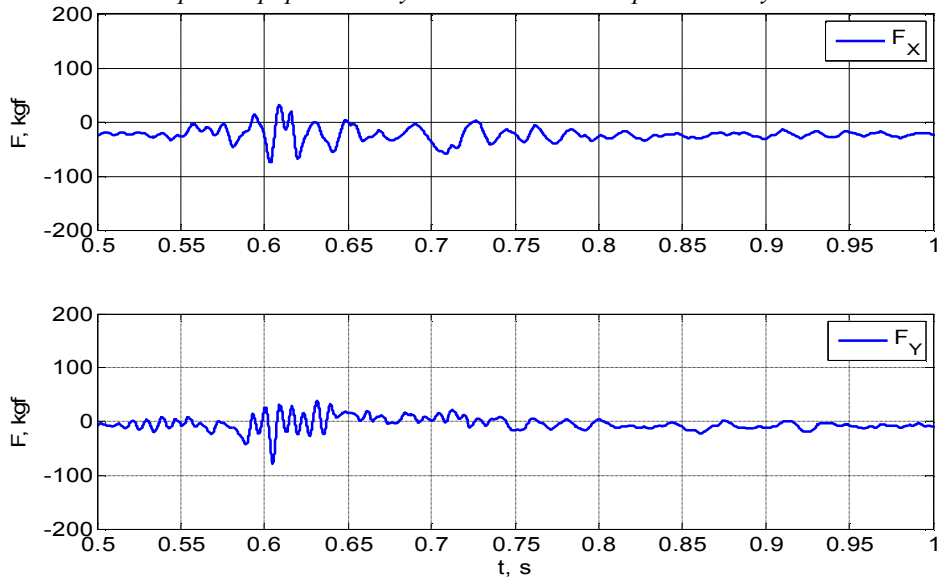


Рис. 14. Проекция бокового усилия на оси координат в период "горячего" запуска двигателя

Измеренные усилия в стяжках и восстановленные по ним составляющие боковых усилий, возникающих при запуске двигателя, представлены на рис. 9-14.

Двигатель испытывался в барокамере, давление среды в ней на момент запуска равнялось $\approx 0,08$ кгс/см². Запуски двигателя осуществлялись многократно, при различной продолжительности пауз между включениями. Стенки барокамеры неохлаждаемые, поэтому температуры конструкции перед каждым последующим запуском повышались, что приводило к заметному изменению динамических характеристик запуска. Поэтому результаты определения боковых сил разбиты на три группы:

–«холодный» запуск;

–«горячий» запуск;

–запуск на повышенную предступень – этот тип запуска обусловлен необходимостью обеспечения гарантированного безотрывного истечения газов из сопла при длительной работе двигателя.

Анализ полученных данных показал следующее: в процессе запуска зарегистрированы боковые усилия продолжительностью $0,1 \div 0,15$ с, с пиковыми значениями составляющих до 220 кгс. Усилия зарегистрированы в процессе роста давления в камере сгорания от 8 до 14 кгс/см².

Наибольшие значения сил возникают при «холодных» запусках и запусках на предступень. Малые значения усилий, зарегистрированные при «горячих» запусках, связаны, по-видимому, с тем, что в началь-

ной фазе «горячего» запуска происходит более интенсивное кипение окислителя в трактах двигателя, что существенно снижает массу окислителя, накопленную в камере к моменту воспламенения, и приводит к более «вялому» набору давления в камере.

Время начала динамических процессов и их продолжительность подтверждаются записями датчиков вибраций и тензорезисторов. Тензорезисторы реагируют на заполнение магистралей двигателя и на рост давления в камере. Показания датчиков указывают на пространственные колебания конструкции, включающие вращение сборки вокруг оси камеры.

Дальнейшие работы будут направлены на улучшение оценок боковых сил за счет учета этих особенностей и дополнительной информации, полученной с помощью акселерометров.

Библиографический список

1. Тихонов, А.Н. Численные методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, А.В. Гончарский, В.В. Степанов, А.Г. Ягола. - М.: Наука, 1990.

References

1. Tihonov, A.N. Numerical methods of the decision of incorrect problems / A.N. Tihonov, A.V. Goncharskiy, V.V. Stepanov, A.G. Yagola. – Moskow, Nauka, 1990.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE SIDE FORCES ACTING ON THE COMBUSTION CHAMBER IN THE ALTITUDE CHAMBER AT STARTUP

© 2009 V. N. Shnyakin, A. N. Kovalenko, V. N. Kovalenko, A. V. Rod'kin, A. P. Makoter

Yuzhnoye State Design Office, Dnepropetrovsk, Ukraine

Results of experimental development are presented on determination of lateral loads, acting onto a high-altitude chamber during startup in the vacuum cell. The lateral loads were determined by sensors installed in CC fastenings; the obtained results were re-accounted into physical values on the basis of static and dynamic calibration of sensors.

Combustion chamber, liquid rocket engine, lateral load

Информация об авторах

Шнякин Владимир Николаевич, академик МАА, начальник конструкторского бюро двигательных установок Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное», Украина. Тел. (+380562) 38-47-28. E-mail: info@yuzhnoye.com. Область научных интересов: разработка ЖРД.

Коваленко Андрей Николаевич, начальник отдела Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное», Украина. Тел. (+380562) 38-47-28. E-mail: info@yuzhnoye.com. Область научных интересов: разработка ЖРД.

Коваленко Виктор Николаевич, начальник отдела Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное», Украина. Тел. (+380562) 38-47-28. E-mail: info@yuzhnoye.com. Область научных интересов: разработка ЖРД.

Родькин Андрей Владимирович, ведущий инженер Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное», Украина. Тел. (+380562) 38-47-28. E-mail: info@yuzhnoye.com. Область научных интересов: разработка ЖРД.

Макотер Александр Петрович, ведущий инженер Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное», Украина. Тел. (+380562) 38-47-28. E-mail: info@yuzhnoye.com. Область научных интересов: разработка ЖРД.

Shnyakin Vladimir Nikolaevich, IAA academician, Head of Propulsion System Designer of Spacecraft, Yuzhnoye State Design Office, Ukraine. Phone: (+380562) 38-47-28. E-mail: info@yuzhnoye.com. Area of research: LRE development.

Kovalenko Andrey Nikolaevich, Head of Department, Yuzhnoye State Design Office, Ukraine. Phone: (+380562) 38-47-28. E-mail: info@yuzhnoye.com. Area of research: LRE development.

Kovalenko Viktor Nikolaevich, Head of Department, Yuzhnoye State Design Office, Ukraine. Phone: (+380562) 38-47-28. E-mail: info@yuzhnoye.com. Area of research: LRE development.

Rod'kin Andrey Vladimirovich, leading engineer, Yuzhnoye State Design Office, Ukraine. Phone: (+380562) 38-47-28. E-mail: info@yuzhnoye.com. Area of research: LRE development.

Makoter Aleksandr Petrovich, leading engineer, Yuzhnoye State Design Office, Ukraine. Phone: (+380562) 38-47-28. E-mail: info@yuzhnoye.com. Area of research: LRE development.