

Е. Н. Петрова, А. Ф. Сальников

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ПРОДОЛЬНОЮ АКУСТИЧЕСКУЮ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

*Проведены экспериментальные исследования проблемы возникновения продольной акустической неустойчивости в камере сгорания ракетного двигателя на твердом топливе. Приведены описание экспериментальной установки “Эхо” и моделирование процессов формирования газового потока холодным газом в камере сгорания модельного двигателя.*

**E-mail:** pen77@mail.ru

**Ключевые слова:** *твердотопливный ракетный двигатель, высокочастотные колебания, акустическая неустойчивость.*

Изучению проблемы влияния высокочастотных колебаний на продольную акустическую неустойчивость ракетного двигателя на твердом топливе уделяется пристальное внимание как в России, так и за рубежом. Изначально акустическую неустойчивость связывали только с взаимодействием с поверхностью горения, разделив при этом неустойчивость работы на акустическую и  $L$ -неустойчивость применительно к продольным колебаниям. Следующим шагом явились исследования, связанные с выявлением источников и стоков акустической энергии в диапазоне частот I–V мод собственных колебаний камеры сгорания (КС) [1–4].

В процессе исследовательских работ по оценке продольной акустической неустойчивости ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ) сформировались основные направления, связанные с изучением причин возникновения акустических колебаний в КС: горение; газодинамика; механика (КС с конструктивными элементами, как колебательный контур).

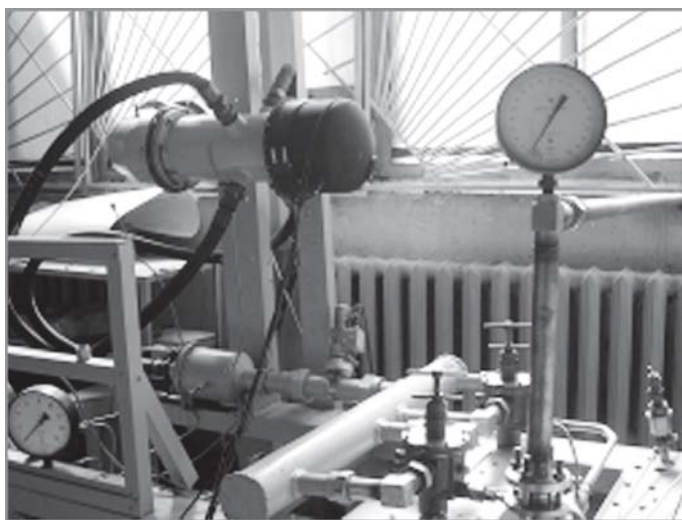
Рассматриваемые направления тесно взаимосвязаны, но раздельное изучение этих явлений позволяет упростить процесс исследования. В настоящей работе проведена оценка причин возникновения колебания давления в КС за счет неустойчивого течения газа по ее проточной части и взаимодействия с поверхностью горения.

Примером таких исследований по выявлению дополнительных акустических источников являются работы по моделированию течений продуктов сгорания в КС РДТТ. Продувки многосекционного топливного заряда в КС РДТТ Titan и ускорителя Space Shuttle (SRM) показали, что вихреобразование в газовом потоке при обтекании негоревшей бронировки приводит к увеличению в 1,5–3 раза амплитуды колебания давления газа [5, 6].

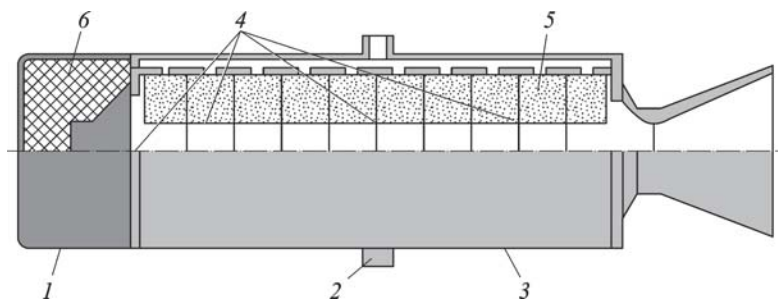
При изучении акустической энергии используются различные подходы, в том числе моделирование с помощью холодного газа. Несмотря на то, что такое моделирование является частичным, продувки проточной части позволили решить проблему поиска источников притока акустической энергии в КС при обтекании газом ее конструктивных элементов и в процессе формирования газового потока [2, 7, 8].

При экспериментальном моделировании условий газодинамического взаимодействия у поверхности горения исследуется влияние распределения параметров вдува газа, определяющих картину течения в камере и условия формирования продольной стоячей волны при возникновении продольной акустической неустойчивости. В исследованиях [9] применен резонансный метод, суть которого заключается в определении собственных частот газового столба при изменении конструктивных параметров проточной части камеры сгорания модельного двигателя. Проведены исследования по обеспечению равномерного вдува по длине цилиндрического канала с учетом движения газа по нему с вдувом через пористый материал стенки [2], но в реально существующих двигателях газоприход с горячей поверхности не является равномерным не только по образующей поверхности канала, но и по длине КС ракетного двигателя. Анализ существующих модельных двигателей, использующих в качестве рабочего тела холодный газ, показал, что данные виды работ не позволяют в полной мере решить вопрос о влиянии формы проточной части КС на характер проявления продольной акустической неустойчивости.

Для экспериментальных исследований условий перекачки энергии с высокочастотных колебаний в продольные колебания КС была создана экспериментальная установка “Эхо” на холодном газе (рис. 1),



**Рис. 1. Экспериментальная установка**

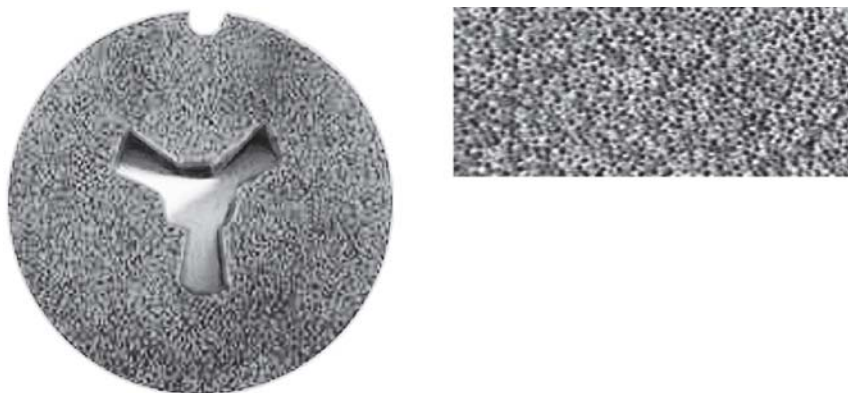


**Рис. 2. Модельный двигатель:**

1 — динамическая головка внешнего источника; 2 — подвод рабочего тела; 3 — корпус двигателя; 4 — датчики акустического давления; 5 — пористый материал; 6 — звукоизоляционный материал

обеспечивающая: формирование газового потока в КС различного класса РДТТ на модельном двигателе (рис. 2); варьирование расхода рабочего тела (холодный газ)  $G = 0 \dots 0,68$  кг/с в процессе продувки КС модельного двигателя (диапазон рабочего давления в КС  $P_k = 0,2 \dots 0,4$  МПа, диаметр критического сечения сопла  $d_{кр} = 8 \dots 44$  мм; формирование газовой поток в КС в соответствии с газоприходом конкретного двигателя; получение достоверной информации о процессах, протекающих в газовом потоке при его формировании и истечении из КС; возможность мобильного изменения геометрических параметров проточной части в процессе проведения исследований (рис. 3). Для формирования проточной части КС использовали пористый материал, полученный путем спекания порошков Al, Si по размерным группам: 5... 40 мкм, 40... 100 мкм, 100... 150 мкм, 150... 200 мкм [8].

Система измерений включала в себя измерительные динамические микрофоны разгруженного типа (I класс) с амплитудной регистрацией  $P = 40 \dots 200$  дБ, частотным диапазоном  $f = 15 \dots 5000$  Гц. Динамические датчики давления ДХС-517 (I класс) с диапазоном изменения давления  $P = 0 \dots 1$  МПа и частоты  $f = 15 \dots 5000$  Гц. Для экспери-



**Рис. 3. Проточная часть модельного двигателя (пористый материал)**

мента использовали восьмиканальную систему регистрации параметров с визуальным контролем давления по магистрали подачи рабочего тела.

Методика исследования, основанная на резонансном взаимодействии газодинамического источника в потоке с внешним акустическим полем, разбита на три этапа.

1. Акустические исследования проточной части КС с помощью внешнего источника возмущений без продувки для определения собственных резонансных частот полости камеры сгорания.

2. Продувка модельной КС со спектральным анализом результатов измерения акустического поля, возникающего при формировании потока по проточной части канала.

3. Продувка модельной КС с наложением на поток внешнего акустического поля определенной частоты и мощности, предположительно совпадающего с собственными частотами исследуемого газодинамического источника.

На экспериментальной установке проводили частичное моделирование при следующих значениях критериев подобия:

$$\text{динамические} - k_{Re} = \frac{Re_n}{Re_m} = 3,31;$$

$$\text{термодинамические} - k_{Pr} = \frac{Pr_n}{Pr_m} = 0,846; \quad k_G = \frac{G_n}{G_m} = 1,08.$$

Моделирование условий вихреобразования при формировании потока в КС осуществляется с помощью пористой поверхности, через которую осуществляется вдув холодного газа в модельную КС. Для формирования вихревого перемежающегося течения (типа дорожки Кармана), возникающего в полужамкнутых каналах числа Струхала и Маха должны находиться в диапазонах:  $Sh = 0,1, \dots, 1$ ,  $M = 0,6, \dots, 0,7$  [10].

В процессе экспериментальных исследований было подтверждено, что при  $Sh = 0,4$  и  $Sh = 1$  возникает вихреобразование в пограничном слое. Частотный спектр акустических колебаний такого движения лежит в области одной или нескольких первых мод собственных частот КС. Проведены исследования влияния диаметра пор и расхода газа через горящую поверхность в целях моделирования высокочастотного воздействия.

Показано, что при изменении диаметра пор можно управлять только частотным диапазоном источника акустических колебаний, а изменение скорости вдува холодного газа в полость КС позволяет управлять амплитудно-частотной характеристикой процесса (рис. 4).

Сущность исследования сводится к построению амплитудно-частотных характеристик процесса формирования газового потока по коэффициентам  $k_n$  и  $k_p$ , а также к анализу изменения амплитуд

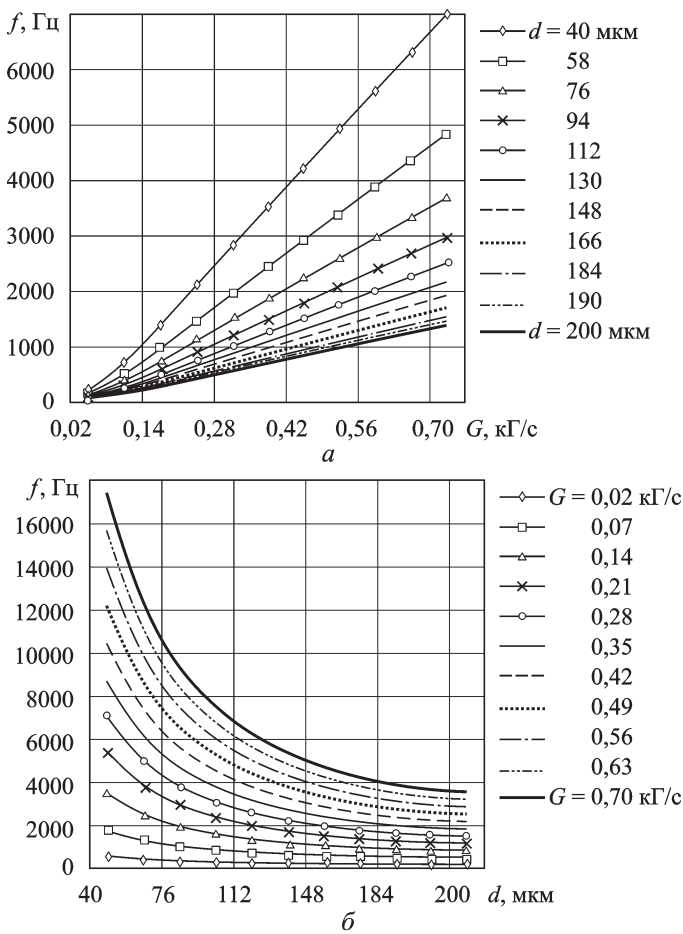


Рис. 4. Частотные зависимости диаметра пор от изменения расхода холодного газа при  $Sh=0,4$  (а) и расхода холодного газа от изменения диаметра пор при  $Sh=1$  (б)

акустических колебаний и колебаний давления в измеряемых точках камеры (Д1 — переднее днище, Д2 — середина канала, Д3 — заднее днище) с выявлением источников акустических колебаний в колебательном процессе КС с наибольшим энерговкладом

$$k_{и} = \frac{A_2 - A_1}{A_1}; \quad k_{п} = \frac{A_2 - A_1}{A_3 - A_1},$$

где  $k_{и}$  — коэффициент усиления колебания самого источника;  $k_{п}$  — коэффициент усиления колебания от воздействия на него внешнего акустического поля;  $A$  — амплитуда колебаний на исследуемой частоте; 1, 2, 3 — индексы, обозначающие этапы исследований при продувке модельного двигателя.

Экспериментальные исследования условий вдува от поверхности горения в КС позволили определить условия возникновения продольной стоячей волны  $u/v = (0,2 \dots 0,45)$ . Необходимо было выделить

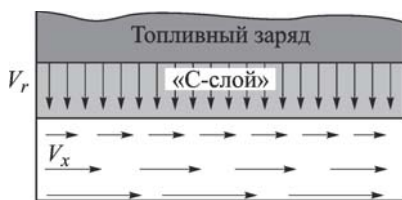


Рис. 5. Схема «С-слоя»

зону, в которой возникает продольная стоячая волна и определить ее толщину. Данная зона получила название «С-слой» (слой скольжения потока); она схематично представлена на рис. 5 [11].

Частотный анализ подтвердил, что вблизи зоны горения твердого топлива в КС РДТТ при взаимодействии продуктов сгорания от боковой поверхности и основного потока устанавливается продольная стоячая акустическая волна.

Основное исследование проводилось на модельном двигателе с цилиндрическим гладким каналом. Частотный анализ спектрограмм модельного двигателя показал, что на границе топливо-газ возникает колебательный процесс в диапазоне частот 1...16 кГц (рис. 6).

Экспериментально подтверждено (табл. 1), что при кратности частот  $2n$  наблюдается переход энергии высокочастотных радиальных колебаний в энергию низкочастотных продольных колебаний в «С-слое».

Данный эффект был подтвержден при экспериментальных исследованиях процесса горения твердого топлива в Т-камере профессором Н.М. Пивкиным [4].

Проведен анализ результатов влияния различных конструктивных факторов на амплитуду колебаний давления в КС, в результате

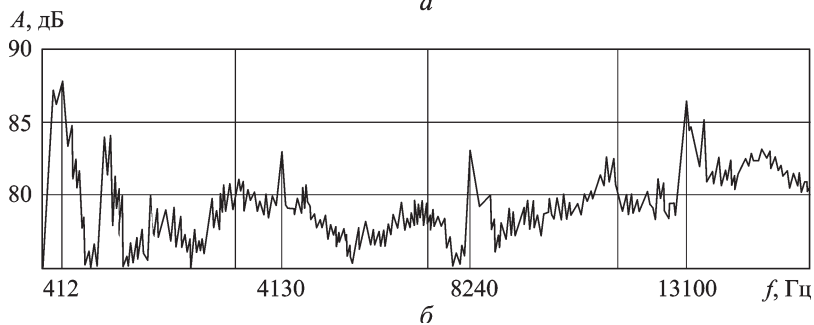
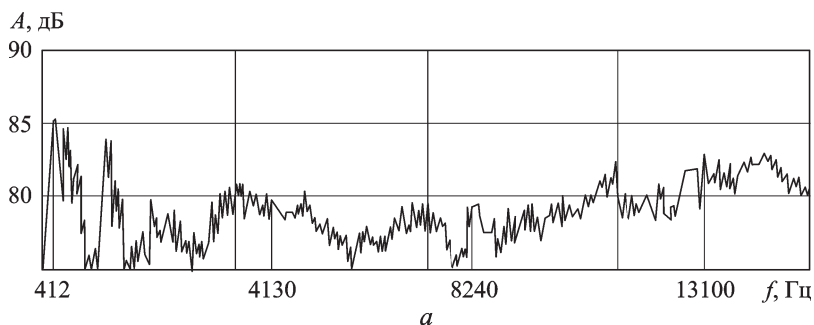


Рис. 6. Спектрограмма исследования акустических колебаний в камере сгорания модельного двигателя с цилиндрическим каналом без наложения внешнего акустического поля (а) и с его наложением (б)



**Коэффициенты усиления акустических колебаний двигателя с цилиндрическим каналом**

| $f$ , кГц | $k_{и}$ |      |      | $k_{п}$ |     |      |
|-----------|---------|------|------|---------|-----|------|
|           | Д 1     | Д 2  | Д 3  | Д 1     | Д 2 | Д 3  |
| 412       | 0,13    | 0,10 | 0,12 | 1,15    | 1,8 | 1,90 |
| 4130      | 0,08    | 0,06 | 0,08 | 1,02    | 0,6 | 0,75 |
| 8240      | 0,09    | 0,08 | 0,09 | 1,06    | 1,3 | 1,0  |
| 13100     | 0,12    | 0,10 | 0,10 | 1,13    | 1,7 | 1,72 |

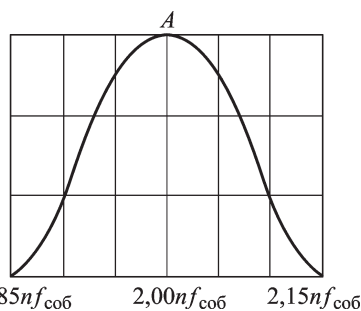
которого определен частотный диапазон перехода энергии высокочастотных радиальных колебаний в энергию низкочастотных продольных колебаний в “С-слое” (рис. 7).

В процессе исследований выявлено, что конструктивное решение проточной части КС может приводить к изменению структуры акустических колебаний (т.е. настраивать колебания давления в КС на частоту более мощного источника, если эта частота близка к частоте первой или второй мод собственных колебаний газа в КС); к усилению или ослаблению акустических продольных колебаний в КС за счет взаимодействия газодинамических источников, имеющих собственные частоты; к изменению направления скорости газового потока или взаимодействию с конструктивными элементами проточной части КС.

Приведена сравнительная оценка спектральных и частотных анализов возникновения продольной акустической неустойчивости и условий влияния различных конструктивных особенностей на амплитуду акустических колебаний в КС (табл. 2–4). Сравнительная характеристика коэффициентов усиления источников по частотным характеристикам совпадает со спектральным анализом.

Условия перекачки энергии с высокочастотных колебаний на частоты собственных продольных колебаний газового столба в “С-слое” позволяют объяснить условия перестройки колебательных процессов, имеющиеся в реальных РДТТ, при стендовых испытаниях.

**Выводы. 1.** На основе результатов исследований на экспериментальной установке “Эхо” была разработана гипотеза, в основу которой заложена физическая модель перекачки энергии с высокочастотных колебаний процессов горения на частоты собственных продольных коле-



**Рис. 7. Частотный диапазон перехода энергии высокочастотных радиальных колебаний в энергию низкочастотных продольных колебаний в “С-слое”**

**Коэффициенты усиления источника в газовом потоке**

| Элементы модельных двигателей | Д1       |         | Д2       |         | Д3       |         |
|-------------------------------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
|                               | $f$ , Гц | $k_{и}$ | $f$ , Гц | $k_{и}$ | $f$ , Гц | $k_{и}$ |
| Передний компенсатор          | 200      | 0,11    | 412      | 0,05    | 200      | 0,12    |
| Задний компенсатор            | 200      | 0,10    | 1200     | 0,07    | 200      | 0,09    |
| Утопленное сопло              | 820      | 0,36    | 1200     | 0,31    | 1200     | 0,17    |
| Цилиндрический канал          | 412      | 0,12    | 1200     | 0,11    | 200      | 0,11    |
| Конусный канал                | 820      | 0,05    | 412      | 0,08    | 1200     | 0,05    |

Таблица 3

**Результаты спектральной оценки модельных двигателей**

| Элементы модельных двигателей | $k_u$ | $k_n$ |
|-------------------------------|-------|-------|
| Передний компенсатор          | 0,12  | 1,8   |
| Задний компенсатор            | 0,10  | 1,2   |
| Утопленное сопло              | 0,38  | 32    |
| Конусный канал                | 0,06  | 1,09  |

Таблица 4

**Коэффициенты усиления акустических колебаний в потоке**

| Элементы модельных двигателей | Д1       |         | Д2       |         | Д3       |         |
|-------------------------------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
|                               | $f$ , Гц | $k_{п}$ | $f$ , Гц | $k_{п}$ | $f$ , Гц | $k_{п}$ |
| Передний компенсатор          | 200      | 0,81    | 820      | 0,10    | 412      | 2,0     |
| Задний компенсатор            | 412      | 1,26    | 412      | 0,09    | 1200     | 0,90    |
| Утопленное сопло              | 820      | 30      | 820      | 13,5    | 412      | 9,11    |
| Цилиндрический канал          | 412      | 1,17    | 1200     | 2       | 412      | 1,83    |
| Конусный канал                | 1200     | 0,77    | 1200     | 1,09    | 820      | 0,78    |

баний газового столба в “С-слое”; определен скоростной диапазон возникновения продольной стоячей волны в КС РДТТ  $u/v = 0,2 \dots 0,45$ .

2. Выявлены условия перекачки акустической энергии в КС в продольные колебания газового потока.

3. Определены причины, приводящие к формированию в газовом потоке КС РДТТ слоя с продольной стоячей волной и диапазон перехода энергии высокочастотных радиальных колебаний в энергию низкочастотных продольных колебаний в “С-слое”:  $1,85n f_{\text{соб}} < 2n f_{\text{соб}} < < 2,15n f_{\text{соб}}$ .

4. Разработаны рекомендации по учету условий перехода энергии с высокочастотных процессов колебаний на частоты собственных продольных колебаний газа в КС.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баффан Ф. Г., Деорити Г. Л., Слей Т. С., Прайс Е. В. Исследование акустических затуханий при холодной продувке малогабаритных ракетных двигателей // Ракетная техника и космонавтика. – 1967. – Т. 5. № 5. – С. 100–110.
2. Бендерский Б. Я., Тенеев В. А. Экспериментально-численное исследование течений в осесимметричных каналах сложной формы со вдувом // Изв. РАН. – МЖГ. – 2001. – № 2. – С. 184–188.
3. Новожилов Б. В. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. – М.: Наука, 1973. – 176 с.
4. Пивкин Н. М., Пелых Н. М., Пивкин А. Н. Управляемое вибрационное горение ТРТ. Новые технологии и устройства для народного хозяйства // Тр. III Междунар. шк.-семинара “Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем”. СПб., 2000. – С. 71–72.
5. A w a d E., C u l i c k F.-E. C. Influence of the phase on triccering of pressure oscillations in combustion chambers // AIAA Paper. – 1874. – № 1492. – P. 1–7.
6. B r o w n R. S., D u n l a p R., Y o u n g S. W., W a n g h R. C. Vortex shedding as a source of acoustic energy in segmented solid rockets // J. Spacecraft. – 1982. – Vol. 18. No. 4. – P. 310–319.
7. Никитин Н. В. Турбулентное течение в канале с искусственным двумерным пристеночным слоем // Изв. РАН. МЖГ. – 2003. – № 6. – С. 33–40.
8. Сальников А. Ф. Анализ численного моделирования течения в осесимметричном канале со вдувом с боковой поверхности. – М.: ВИМИ, 1987. – С. 114–120.
9. Сальников А. Ф. Методика исследования газодинамических источников акустических колебаний на их моделях резонансным способом // Аэрокосмическая техника и высокие технологии–98. – Пермь: ПГТУ, 1998. – С. 76–85.
10. С у и н т е н б е к Ж., С о м м е р Г. Образование вихрей в ракетном двигателе на твердом топливе // Ракетная техника и космонавтика. – 1964. – Т. 2. No. 7. – С. 173–179.
11. Петрова Е. Н., Сальников А. Ф. Исследования условий возбуждения продольных колебаний газа в камере сгорания твердотопливного ракетного двигателя // Химическая физика и мезоскопия. – 2006. – Т. 8. № 2. – С. 169–176.

Статья поступила в редакцию 25.02.2009

Алексей Федорович Сальников родился в 1951 г., окончил Пермский государственный технический университет (ПГТУ) в 1976 г. Д-р техн. наук, профессор ПГТУ. Автор 63 научных работ в области нестационарных процессов в ракетных двигателях.

A.F. Sal'nikov (b. 1951) graduated from the Perm' State Technical University in 1976. D. Sc. (Eng.), professor of the Perm' State Technical University. Author of 61 publications in the field of nonstationary processes in rocket engines.



Елена Николаевна Петрова родилась в 1981 г., окончила Пермский государственный технический университет (ПГТУ) в 2004 г. Старший преподаватель ПГТУ, аспирант ПГТУ. Автор 19 научных работ в области нестационарных процессов в ракетных двигателях.

Ye.N. Petrova (b. 1981) graduated from the Perm' State Technical University in 2004. Post-graduate of the Perm' State Technical University. Author of 19 publications in the field of nonstationary processes in rocket engines.

