

УДК 629.7.036.5

В. Б. Сапожников, В. А. Меньшиков,  
И. С. Партола, А. В. Корольков

## **РАЗВИТИЕ ИДЕЙ ПРОФЕССОРА В.М. ПОЛЯЕВА ПО ПРИМЕНЕНИЮ ПОРИСТО-СЕТЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВНУТРИБАКОВЫХ УСТРОЙСТВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ МНОГОКРАТНЫЙ ЗАПУСК ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*Рассмотрена проблема обеспечения многократного запуска жидкостных ракетных двигателей космических аппаратов и разгонных блоков в условиях, близких к невесомости, большой вклад в решение которой внес профессор МВТУ им. Н.Э. Баумана В.М. Поляев.*

Проблема обеспечения многократного запуска жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) космических аппаратов (КА) и разгонных блоков (РБ) в условиях, близких к невесомости, появилась одновременно с началом практического освоения космического пространства в конце 50-х годов прошлого столетия. К настоящему времени разработаны многочисленные технические устройства и способы для решения этой проблемы, начиная от применения так называемой “предпусковой перегрузки” и заканчивая использованием акустических либо электромагнитных полей для управления положением поверхности раздела “жидкость–газ” при невесомости. Однако наибольшее распространение при объемах топливных баков (ТБ), превышающих тысячи литров, получили внутрибаковые устройства (ВБУ) на основе сетчатых разделителей (СР). Принцип работы этих устройств заключается в следующем: для предотвращения прорыва газа наддува в расходные магистрали ТБ при запуске ЖРД в невесомости используются силы поверхностного натяжения, величина которых тем больше, чем меньше характерный размер ячеек СР. Главным недостатком таких устройств является их значительное гидравлическое сопротивление и, как следствие, потребность в повышенных значениях давления наддува. Кроме того, если газ наддува все-таки проходит через СР, эти устройства перестают работать.

Профессор В.М. Поляев, долгое время изучавший перспективы применения пористых материалов в элементах конструкций двига-

тельных и энергетических установок летательных аппаратов, в середине 70-х годов начал исследования условий и режимов работы СР при их использовании в конструкции ВБУ. Результаты этих исследований наиболее полно представлены в книге [1]. В начале 80-х годов коллективом сотрудников кафедры Э-1 МВТУ им. Н.Э. Баумана во главе с профессором В.М. Поляевым был предложен новый вид СР на основе комбинированных пористо-сетчатых материалов (КПСМ), характеристики которых приведены в работе [2]. В настоящее время КПСМ широко применяются в качестве элементов ВБУ, так как их свойства заметно превосходят характеристики обычных СР.

Основным отличием СР, выполненных на основе КПСМ, от обычных СР является объемная (трехмерная) структура пор. Иначе говоря, такие СР имеют пористую структуру не только в нормальном, но и в тангенциальном (касательном) направлении к поверхности СР. Эта особенность КПСМ обуславливает физическое явление, отсутствующее у обычных двумерных СР. Суть этого явления, которое определено как саморегенерация, заключается в следующем.

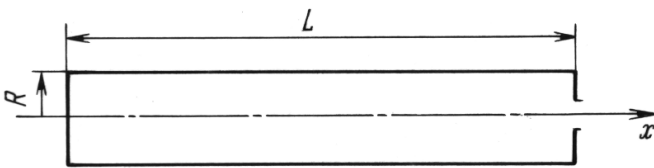
Для двумерных (условно будем называть их плоскими) СР работоспособность капиллярных заборных устройств (КЗУ) на их основе определяется условием

$$\Delta p_{\text{кап}} \geq \Delta p_m. \quad (1)$$

Здесь  $\Delta p_{\text{кап}} = \frac{4\sigma}{d_3}$  — капиллярная удерживающая способность (КУС) КЗУ,  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела “жидкость–газ”,  $d_3$  — эквивалентный диаметр ячейки СР,  $\Delta p_m = \zeta_m \frac{\rho u^2}{2}$  — потери давления при прохождении жидкости по нормали к поверхности СР,  $\zeta_m$  — коэффициент гидравлического сопротивления СР,  $\rho$  — плотность жидкости,  $u$  — скорость потока по нормали к поверхности СР. В общем случае величина  $\zeta_m = E + F \text{Re}^{-1}$ , где  $\text{Re} = \frac{u d_3}{\nu}$  — число Рейнольдса,  $\nu$  — кинематическая вязкость жидкости. Коэффициенты  $E$  и  $F$  определяются экспериментально, путем проливок образцов СР.

В том случае, если условие (1) не выполняется, газ наддува проникает через СР, а давление во внутренней полости КЗУ (в “заневоленном” объеме) и снаружи выравнивается. В результате жидкость, находящаяся во внутренней полости КЗУ, перестает удерживаться в “заневоленном” объеме, и КЗУ теряет работоспособность.

Для КЗУ, использующих СР на основе КПСМ, условие (1) также является условием, определяющим их работоспособность. Однако при нарушении условия (1) в СР на основе КПСМ жидкость, находящаяся в контакте с поверхностью КПСМ, в силу трехмерной структуры



**Рис. 1. Расчетная схема и обозначения:**

$L$  – длина трубы;  $R$  – радиус трубы

пор КПСМ и под действием сил поверхностного натяжения начинает перемещаться в тангенциальном направлении. В результате участок КПСМ, на котором произошел прорыв газа во внутреннюю полость КЗУ, вновь восстанавливает работоспособность, и отбор жидкости в расходную магистраль топливного бака продолжается.

Указанная особенность КЗУ на основе КПСМ делает их весьма перспективными для применения в качестве ВБУ, обеспечивающих многократный запуск ЖРД космических аппаратов и разгонных блоков в условиях свободного и возмущенного орбитального (суборбитального) полета.

Для оценки эффективности работы таких ВБУ разработана математическая модель процесса функционирования элемента КЗУ, представляющего собой полый цилиндр со стенками, выполненными из КПСМ (рис. 1).

Введем следующие допущения.

Жидкость несжимаемая, течение в трубе одномерное, вязкое с распределенным источником; на внешней поверхности сетки давление (давление наддува) задано; на срезе выходного отверстия давление равно 0.

Уравнение движения –

$$u \frac{du}{dx} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} - \lambda \frac{u^2}{4 \cdot R} \text{sign}(u). \quad (2)$$

Уравнение неразрывности –

$$\frac{du}{dx} = (1 - \alpha) \frac{2}{R} V_{\text{сет}}(p_{\text{изб}} - p(x)). \quad (3)$$

Здесь  $\alpha$  – “степень сухости” трубы в данном сечении;  $V_{\text{сет}}(p)$  – функция зависимости скорости протекания жидкости сквозь сетку от перепада давления:

$$V_{\text{сет}}(\Delta p) = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4a\Delta p}}{2 \cdot a},$$

где  $a = \frac{E\rho}{2}$ ,  $b = \frac{F\nu\rho}{2 \cdot d_3}$ ,  $E$ ,  $F$ ,  $d_3$  – характеристики сетки.

Условия однозначности выполняются при  $x = 0$ ,  $u = 0$  и при  $x = L$ ,  $p = 0$ .

Для учета сужения канала у выхода из трубы давление на выходе пересчитывается по формуле

$$p = \rho u_{x=L}^2 \left( \left( \frac{R}{r} \right)^2 - 1 \right).$$

Конечно-разностные аналоги уравнений решаются методом “пристрелки” до установления требуемого распределения давлений. Полученное установившееся распределение давлений и скоростей считается неизменным в заданный период времени  $dt$ . Текущее состояние (объем отобранной жидкости и уровень заполнения емкости) определяется из начального (заданного) состояния численным интегрированием по времени полного расхода жидкости через заборное устройство методом прямоугольников с фиксированным шагом  $dt$ .

Вычислительный эксперимент проводился в условиях точного выполнения балансных соотношений и полной повторяемости. Для подтверждения адекватности разработанной математической модели реальному процессу проведена серия физических экспериментов на модельной экспериментальной установке. Можно отметить хорошее совпадение результатов расчета практически для всех вариантов, реализованных в физических экспериментах, до момента “прорыва” газа. Отбор жидкости в вычислительном и физическом экспериментах осуществлялся до момента исчезновения контакта сетчатого устройства с жидкостью. В таблице приведены исходные данные и результаты физических экспериментов, а также результаты расчетов. На графиках (рис. 2, а . . . к) показаны зависимости объема отобранной жидкости  $v_{\text{отобр.}}$  от времени  $t$ . Точками указаны объемы отобранной жидкости в момент прорыва ( $M_{\text{прор.}}$ ) газа в эксперименте (рис. 3).

Для учета перехода модельного элемента КЗУ в режим саморегенерации в процессе счета проверяли максимальный перепад давления на стенках. Как только перепад достигал критического значения  $\Delta p_{\text{крит}} = \frac{4\sigma}{d_3}$ , алгоритм переводился в режим “подсоса” газа с последующим восстановлением работоспособности КЗУ. В режиме “подсоса” на выходе из трубы фиксировали давление и объем откачиваемой смеси. Количество отобранной жидкости определяли из геометрических соотношений по текущему положению поверхности внутри трубы.

На рис. 4 показано, как меняются объемы жидкости и газа, отбираемые с помощью модельного элемента КЗУ при его работе в режиме саморегенерации для одного из рассмотренных вариантов. Из рис. 4 видно, что даже после того, как газ наддува прорывается во внутреннюю полость модельного КЗУ, процесс отбора жидкости не прекращается.

Таблица

Варианты №	Жидкость	Давление наддува, атм	$d_h$ , мм	$M_{прор}$ , с	Объем жидкости, л	Объем газа, л	$V_{остат}$ , л		$h$ , мм	$V_{огорб}$ , л	$V_{остат}$ , л	$h$ , мм
							эксперимент	расчет				
1	Фр113	0,3	0	2,5	0,9	0,2	1,49	30	Нет данных	Нет данных	Нет данных	24
2		0,5	0	2,5	0,92	Нет данных	1,47	29				
3	Фр114	0,3	0	3,5	0,6	Нет данных	1,79	38	Нет данных	Нет данных	Нет данных	24
4		0,3	0	3,2	0,85		1,54	31				
5	Вода	0,3	0	1,8	1	0,2	1,39	27	Нет данных	Нет данных	Нет данных	24
6		0,3	0	2,8	0,9	0,2	1,49	30				
7	Вода	0,5	0	2,5	0,95	1	1,44	28	Нет данных	Нет данных	Нет данных	24
8		0,5	0	2,4	0,85	0,2	1,54	31				
9	Вода	0,5	0	2,2	0,8	0,2	1,59	32	Нет данных	Нет данных	Нет данных	24
10		0,1	13	1,2	0,68	-	2,15	47				
11	Спирт 40 %	0,2	13	1,8	0,45	0	2,38	52	Нет данных	Нет данных	Нет данных	24
12		0,3	16,4	1,2	0,42	-	2,47	53				

Варианты №	Жидкость	Давление наддува, атм	$d_h$ , мм	$M_{прор}$ , с	Объем жидкости, л	Объем газа, л	$V_{остат}$ , л		$h_b$ , мм	$h_s$ , мм
							эксперимент	расчет		
13	Спирт 96 %	0,1	17	1	0,27	-	2,48	1,8046	1,2554	24
14		0,3	17	1	0,37	-	2,32	1,7449	1,2551	24
15		0,1	-5,4	2,5	0,66	-	2,53	2,245	1,255	24
16		0,2	-8,9	3,5	1,67	-	1,26	1,9851	1,2549	24
17		0,3	-7,5	1,2	0,84	-	2,09	1,9857	1,2543	24
18		0,1	-5,4	5	1,2	-	1,77	2,0251	1,2549	24
19		0,2	-4,7	4,4	1,28	-	1,56	1,8955	1,2545	24
20		0,3	-4	2,5	0,98	-	1,64	1,6764	1,2536	24
21		0,1	-4,3	3	0,56	0,1	2,08	1,6946	1,2554	24
22		0,2	-4,7	4	1,1	-	1,54	1,6951	1,2549	24
23	Спирт 40 %	0,3	-5,6	2,8	1	-	1,62	1,6757	1,2543	24
24		0,1	-5,4	5,4	0,96	-	1,62	1,6349	1,2551	24
25		0,2	-5,5	3,4	0,94	-	1,57	1,5657	1,2543	24
26		0,3	-4,2	2,4	0,76	-	1,67	1,4847	1,2553	24

Варианты №	Жидкость	Давление наддува, атм	$dh$ , мм	$M_{\text{прор}}$ , с	Объем жидкости, л	Объем газа, л	$V_{\text{остат}}$ , л		$h$ , мм	$h$ , мм	
							эксперимент	расчет			
27	Спирт 96 %	0,1	-5,4	3	0,6	-	1,90	1,555	40	1,255	24
28		0,2	-7,3	3	0,8	0,2	1,72	1,5753	36	1,2547	24
29		0,3	-5	4	1	0,4	1,39	1,4452	27	1,2548	24
30	Спирт 40 %	0,1	-5,2	5	1	-	1,57	1,6246	32	1,2554	24
31		0,2	-3,9	3,4	1,1	-	1,59	1,7449	32	1,2551	24
32		0,3	-4,1	1,8	0,75	-	1,78	1,5857	37	1,2543	24
33	Спирт 96 %	0,1	-4,8	4,6	1,1	-	1,54	1,6948	31	1,2552	24
34		0,2	-5,2	3	0,92	-	1,69	1,6653	35	1,2547	24
35		0,3	-3,7	1,8	0,6	-	1,93	1,5864	41	1,2536	24

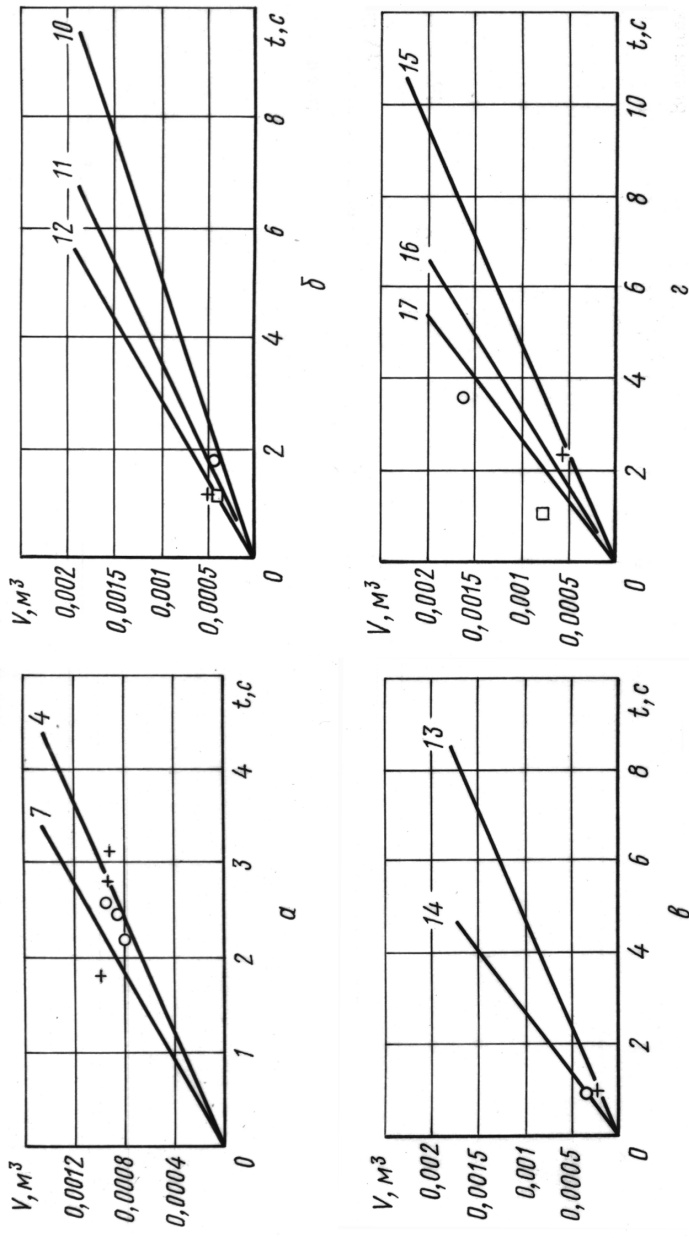


Рис. 2 (начало). Результаты теоретических (сплошные кривые) и экспериментальных (точки) исследований процесса отбора жидкости из кюветы с помощью элемента КЗУ на основе КПСМ: наддув — 0,1; 0,2 и 0,3 (б; г; д; е; ж; з; и; к — варианты компоновки 10...12; 15...17; 18...20; 21...23; 24...26; 27...29; 30...32; 33...35 соответственно); наддув — 0,3 и 0,5 (а — варианты 4 и 7); — 0,1 и 0,3 (в — варианты 13 и 14); жидкость — вода (а); спирт 40% (б; г; е; ж; и); спирт 96% (в; г; з; к)



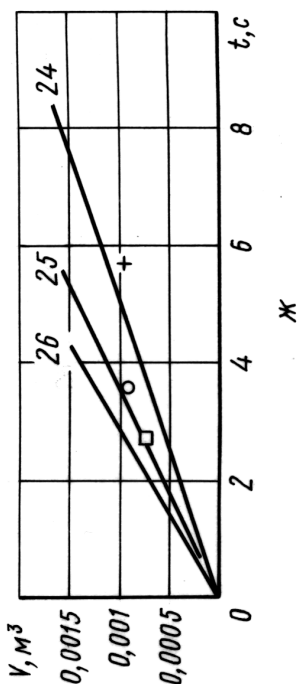
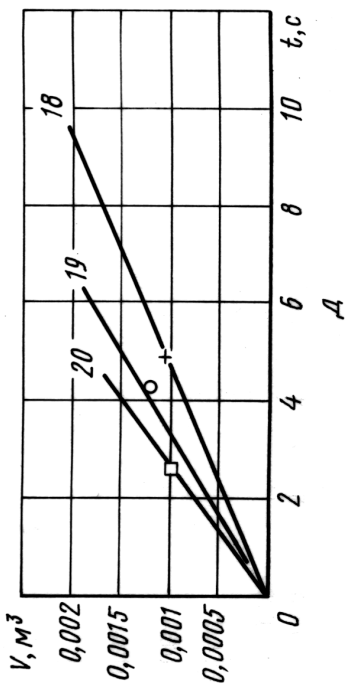
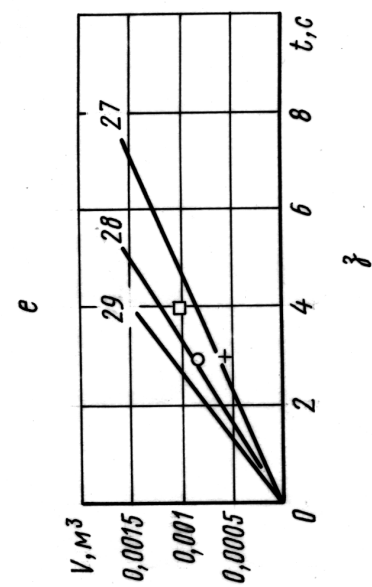
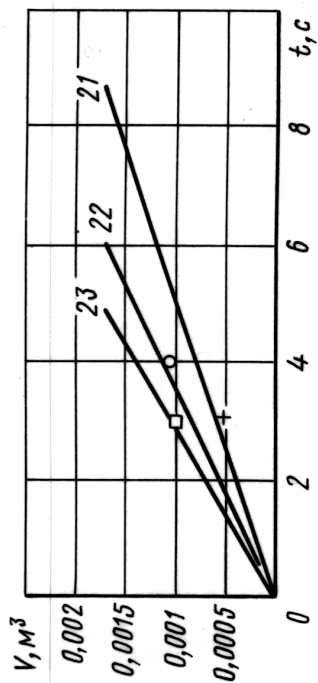


Рис.2 (продолжение)

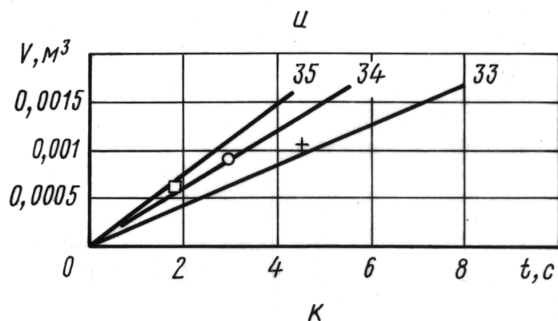
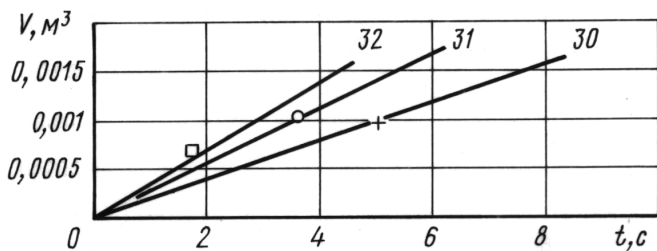


Рис. 2 (окончание)

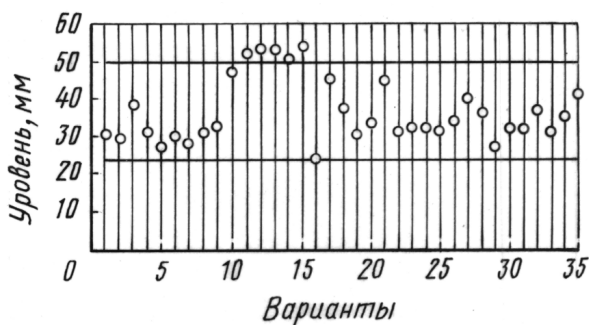


Рис. 3. Уровень жидкости в кювете в момент прорыва газа (по вариантам компоновки)

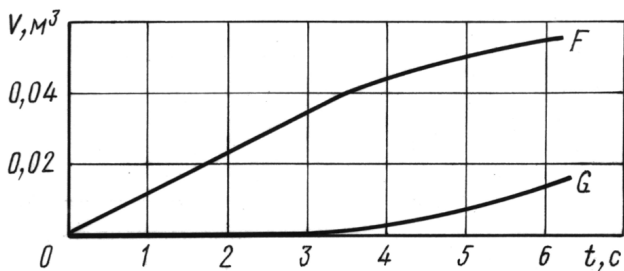


Рис. 4. Изменение количества отобранных жидкостей ( $F$ ) и газа ( $G$ ) во времени при работе модельного элемента КЗУ в режиме саморегенерации (вариант б)

Таким образом, выполненные расчетно-экспериментальные исследования подтверждают высокую эффективность работы КЗУ с применением СР на основе КПСМ и перспективность их использования

для внутрибаковых устройств, обеспечивающих многократный запуск ЖРД космических аппаратов и разгонных блоков в условиях свободного и возмущенного орбитального (суборбитального) полета.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов / Багров В.В., Курпаченков А.В., Поляев В.М. и др. Под ред. В.М. Поляева. – М.: УНПЦ “Энергомаш”, 1997. – 328 с.
2. Пористые сетчатые материалы / Синельников Ю.И. и др. – М.: Metallurgiya, 1983. – 64 с.

Статья поступила в редакцию 18.11.2005

Владимир Борисович Сапожников родился в 1947 г., окончил в 1971 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Директор АНОО “Учебный центр “Остров”. Автор более 120 научных работ в области испытаний ЖРД и внутрибаковых гидродинамических процессов в ЖРД.

V.V. Sapozhnikov (b. 1947) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1971. Director of Educational Center “Island”. Author of more than 120 publications in the field of tests of liquid-propellant rocket engines and hydrodynamical processes inside tanks of liquid-propellant rocket engines.

Валерий Александрович Меньшиков родился в 1945 г., окончил в 1980 г. Военную академию им. Ф.Э. Дзержинского. Директор НИИ КС ГКНПЦ им. М.В. Хруничева. Автор более 350 научных работ в области проектирования и испытаний ракетно-космической техники.

V.A. Menshikov (b. 1945) graduated from the Military Academy n. a. F.E. Dzerzhinsky in 1980. Director of “НИИ КС ГKNPТs” n.a. Khrunichev. Author of more than 350 publications in the field of design and tests of rocket and space technology.

Игорь Станиславович Партола родился в 1965 г., окончил в 1987 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Начальник отдела ГКНПЦ им. М.В. Хруничева. Автор 14 научных работ в области расчета, проектирования и испытаний топливных систем ЖРДУ ракет-носителей, разгонных блоков и космических аппаратов.

I.S. Partola (b. 1965) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1987. Head of department of “GKNPТs” n.a. Khrunichev. Author of 14 publications in the field of design and tests of fuel systems of liquid-propellant rocket engines for boosters, space tugs and spacecrafts.

Анатолий Владимирович Корольков родился в 1951 г., окончил в 1974 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Зав. кафедрой МГУЛ. Автор более 150 научных работ в области вычислительной математики и гидромеханики.

A.V. Korolkov (b. 1951) graduated from the Lomonosov Moscow State University in 1974. Head of department of the Moscow State University for Forestry. Author of more than 150 publications in the field of computational mathematics and hydromechanics.