

УЧАСТИЕ ФЭСТ В РЕШЕНИИ ИНЖЕНЕРНЫХ И НАУЧНЫХ ЗАДАЧ КОСМОНАВТИКИ (К 60-летию ФАКУЛЬТЕТА ЭЛЕКТРОНИКИ И СИСТЕМОТЕХНИКИ МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ЛЕСА)

А.В. Корольков¹, Н.В. Ефремов¹, В.Б. Сапожников², Ю.М. Новиков³,
В.А. Большаков³, Л.Г. Александров⁴, С.Б. Константинов⁴, И.С. Партола⁵

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

²ООО НТВЦ «ЭДУКОН», 141090, Московская обл., г. Королев, ул. Пионерская, д. 1/4

³ЗАО «ЦВТМ» при МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

⁴ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина, 141400, Московская обл., г. Химки, ул. Ленинградская, д. 24

⁵ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», 125438, Москва, ул. Онежская, д. 8

korolkov@mgul.ac.ru

Представлены некоторые результаты совместной деятельности сотрудников факультета электроники и системотехники и работников других организаций и предприятий в области решения инженерных задач и научных проблем космической отрасли с момента открытия факультета (1959 г.) по настоящее время. Основные представленные результаты были получены в области изучения особенностей поведения жидкости в условиях, близких к невесомости, в исследовании остаточных ускорений на борту космического аппарата, в технических проблемах подачи жидкого топлива в двигательную установку, в изучении кипения в невесомости.

Ключевые слова: ФЭСТ, режимы функционирования космического аппарата, «Салют-7», «Мир», космический эксперимент

Ссылка для цитирования: Корольков А.В., Ефремов Н.В., Сапожников В.Б., Новиков Ю.М., Большаков В.А., Александров Л.Г., Константинов С.Б., Партола И.С. Участие ФЭСТ в решении инженерных и научных задач космонавтики (к 60-летию факультета электроники и системотехники Московского государственного университета леса) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 4. С. 14–22. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-14-22

Современная ракетно-космическая техника предъявляет особо жесткие требования к качеству решения инженерных задач. Факультет ФЭСТ, созданный 60 лет назад академиком С.П. Королевым готовит специалистов для предприятий ракетно-космической отрасли. Все эти годы работники предприятий и специалисты различных научно-технических направлений с привлечением сотрудников факультета проводят совместные научные и инженерные исследования по различным проблемам космической отрасли. Исследовательский коллектив в разное время включал в себя преподавателей, аспирантов и студентов ФЭСТ, сотрудников МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЦНИИмаш, РКК «Энергия» им. С.П. Королева», КБ «Салют» им. М.В. Хруничева, СКБ им. С.А. Лавочкина, НИИ-4, «ЭКА», ООО НТВЦ «ЭДУКОН», ГНЦ РФ ФЭИ им. А.И. Лейпунского, ИПМех, ИФЗ и многих других предприятий и учреждений. В результате выполнения этих работ был получен ряд важных и интересных результатов.

Первые технологические эксперименты по выращиванию кристаллов в условиях невесомости на орбитальной станции «Салют-6» дали неожиданные результаты: малые остаточные ускорения на борту космического аппарата, исследованные, например, авторами работы [1], могут вызывать

конвективные движения, интенсивность которых выше, чем в земных условиях.

Цель работы

Цель работы — подвести некоторый промежуточный итог многолетней совместной деятельности факультета с предприятиями и организациями космической отрасли. В статье затронута лишь одно из направлений научных работ, выполняемых на факультете — это работы, посвященные изучению поведения жидкости в условиях реального космического полета.

Технологические эксперименты в невесомости

С открытием кафедры прикладной математики в 1985 г. на ФЭСТ начались работы по вычислительной гидродинамике. Совместно с сотрудниками ФГУП «ЦНИИмаш» (г. Королев Московской обл.) на передовой (по тому времени) вычислительной технике проводились вычислительные эксперименты, на основании которых было дано объяснение явления увеличения интенсивности конвективного движения в условиях реального космического полета [2] (рис. 1). Установлено также, что увеличение интенсивности конвективного движения жидкости в сосуде вызывается непрерывным изменением направления вектора

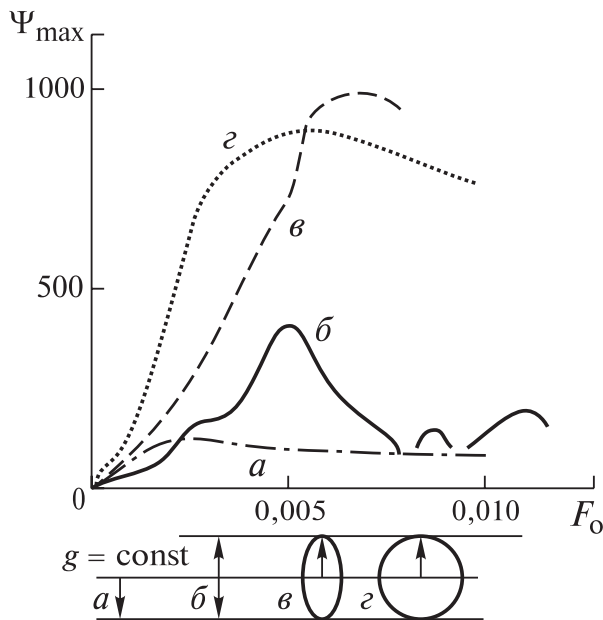


Рис. 1. Интенсивность конвективного течения (максимальное значение безразмерной функции тока) во времени в зависимости от закона изменения вектора ускорения: *a* — постоянное направление вектора ускорения, *b* — изменение только в вертикальном направлении, *v*, *z* — вращение вектора ускорения с переменной и постоянной длиной вектора), безразмерная угловая скорость вращения равна 1572

Fig. 1. The intensity of the convective flow (the maximum value of the dimensionless stream function) in time depending on the law of change of the acceleration vector: *a* — constant direction of the acceleration vector, *b* — change only in the vertical direction, *v*, *z* — rotation of the acceleration vector with a variable and constant vector length), the dimensionless angular velocity of rotation is 1572

остаточного ускорения. Режим движения жидкости определяется соотношением времени развития конвекции ($Pr \sqrt{Gr}$) [3], где число Грасгофа Gr определяется по значению модуля остаточного ускорения) и времени скорости изменения направления вектора ускорения (например, период обращения вектора ускорения).

Таким образом, возникла необходимость изучения состояния, близкого к невесомости, для определения параметров остаточных ускорений в условиях реального космического полета.

Состояние, близкое к невесомости

Проведена серия научных работ по натурному (непосредственно на космических аппаратах — КА), экспериментальному (на Земле), аналитическому и численному изучению остаточных ускорений при различных режимах функционирования КА [4–6] (рис. 2).

Данные, представленные на рис. 2, указывают на эволюционный характер изменения вектора ускорения, т. е. плавное непрерывное изменение модуля и направления вектора ускорения.

Аналогичные результаты получены в ходе изучения остаточных ускорений на борту станций «Салют-7» и «Мир». В расчетах и при непосредственных измерениях выделены несколько диапазонов частот изменения направления вектора местного ускорения, обусловленного возмущающим воздействием различных факторов, сопровождающих космический полет. Причем характер поведения вектора ускорения зависел не только от режима функционирования КА, но и от места проведения измерений на борту.

Эти исследования дали возможность оценивать наиболее «опасные» с точки зрения воздействия на гидродинамическую систему режимы функционирования КА и планировать «безопасное» время и место проведения гравитационно-зависимых экспериментов.

В настоящее время работы по изучению поведения гидродинамических систем в условиях реального полета КА продолжают уточняться критерии возникновения различных режимов движения для более сложных гидродинамических систем (например, слоистых систем [7, 8], систем жидкость — газ [9] и т. д.) и определяются параметры микроускорений для КА различных конфигураций и различных режимов функционирования. Такие работы необходимы не только для космических технологических процессов, но и для экспериментов, поскольку гидродинамическими системами являются также пространства отсеков космических станций, компоненты системы жизнеобеспечения и компоненты различных технических устройств.

Подача жидкого топлива в двигательную установку

Важное значение имеют исследования поведения гидродинамической системы жидкость — газ. Топливные баки двигательной установки КА частично заполнены компонентами жидкого топлива. При запуске двигателя в условиях невесомости необходимо обеспечить бесперебойную подачу жидкого топлива в заборное устройство, связывающее бак с расходной магистралью, и не допустить попадания туда газа наддува. Эта задача становится особенно острой, когда в баке остается мало жидкости.

В соответствии с требованиями долгосрочной эксплуатации КА [10] система подачи жидкого топлива в двигательную установку должна гарантировать выработку практически всего его объема при выполнении операций в соответствии с циклограммой полета. Невырабатываемый остаток жидкого топлива не должен превышать 1 % начального объема. Для обеспечения этих требований создаются различные внутрибаковые конструкции. Общие подходы к их созданию

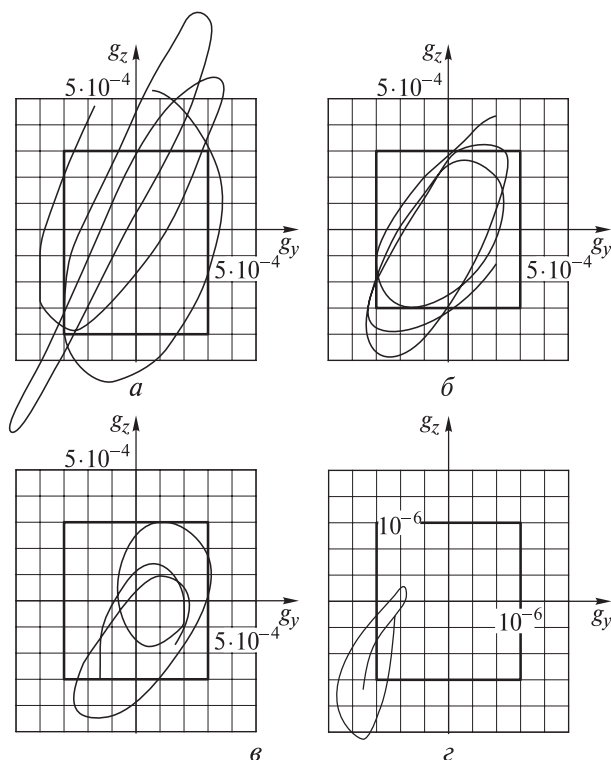


Рис. 2. Характерные эволюции вектора ускорения на станции «Салют-6» (а–в) и аппарате Space Shuttle (STS-40) (z); плавный останов оператора на дорожке комплексного тренажера физического (КТФ) после бега: а — 6–7 с, б — 12–13 с, в — 19–20 с, z — аэродинамическое сопротивление — спортивный снаряд на станции «Салют-6»)

Fig. 2. The characteristic evolution of the acceleration vector at the Salyut-6 station (a–v) and Space Shuttle (STS-40) (z); smooth stop of the operator on the track of the complex physical simulator (CTF) after running: a — 6–7 s, б — 12–13 s, в — 19–20 s, z — aerodynamic drag — sports equipment at the Salyut-6 station)

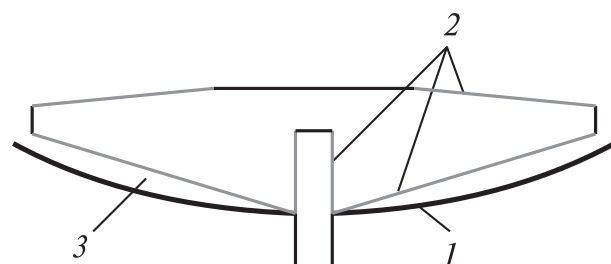


Рис. 3. Типичная форма фазоразделительного устройства для бака со сферическим дном: 1 — стенка бака; 2 — фазоразделительные экраны; 3 — капиллярный зазор

Fig. 3. A typical form of a phase separation device for a tank with a spherical bottom: 1 — tank wall; 2 — phase separation screens; 3 — capillary gap

сформулированы в работе [11]. Непосредственно на входе в расходную магистраль устанавливаются фазоразделительные устройства (ФЗУ), которые представляют собой систему фазоразделительных экранов, отделяющих жидкое топливо,

находящееся непосредственно около заборного устройства, от газовой фазы в основном объеме топливного бака. Конфигурация системы экранов может быть самой разнообразной, в зависимости от назначения двигателей, их мощностей, форм топливных баков, циклограмм полета и других факторов. Например, для торообразного топливного бака разгонного блока «Бриз-М» использовались ФЗУ тороидальной формы [12, 13], для топливных баков со сферическим дном — ФЗУ в различных формах, образующих капиллярный зазор с дном (рис. 3).

Фазоразделительные экраны изготавливаются из комбинированных пористо-сетчатых материалов (КПСМ), обладающих объемными капиллярными свойствами и характеризующих капиллярной удерживающей способностью (КУС), т. е. максимальным перепадом давления, при котором газовая фаза не проходит через фазоразделитель, и потерей давления Δp при прохождении жидкости сквозь фазоразделитель:

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho \cdot u^2}{2},$$

где ζ — коэффициент гидродинамического сопротивления; ρ — плотность жидкости; u — скорость газожидкостного потока по нормали к поверхности фазоразделителя [14]. Капиллярная удерживающая способность и коэффициент гидродинамического сопротивления определяются экспериментально.

В целях удержания жидкости около ФЗУ используют внутрибаковые устройства капиллярного типа (ВБУ КТ), например, устройство топливного бака и ВБУ КТ космического аппарата «Интергелиозонд» (рис. 4).

Факультет работает в кооперации с разработчиками топливных баков и ВБУ (КБ «Салют» им. М.В. Хруничева, НПО им. С.А. Лавочкина), разработчиками и изготовителями КПСМ («ЦВТМ»), организацией, проводящей лабораторные испытания моделей баков и ВБУ («ЭДУКОН»). В задачи сотрудников ФЭСТ входит математическое моделирование гидродинамических процессов, происходящих в топливном баке при различных режимах функционирования КА [15–21]. Цель этих работ заключается в оценке работоспособности и эффективности разрабатываемого технического устройства и выработке рекомендаций по коррекции его параметров и режимов эксплуатации.

Кипение в невесомости

В решении еще одной важной проблемы участвуют сотрудники ФЭСТ: возможен ли пузырьковый режим кипения в условиях невесомости?

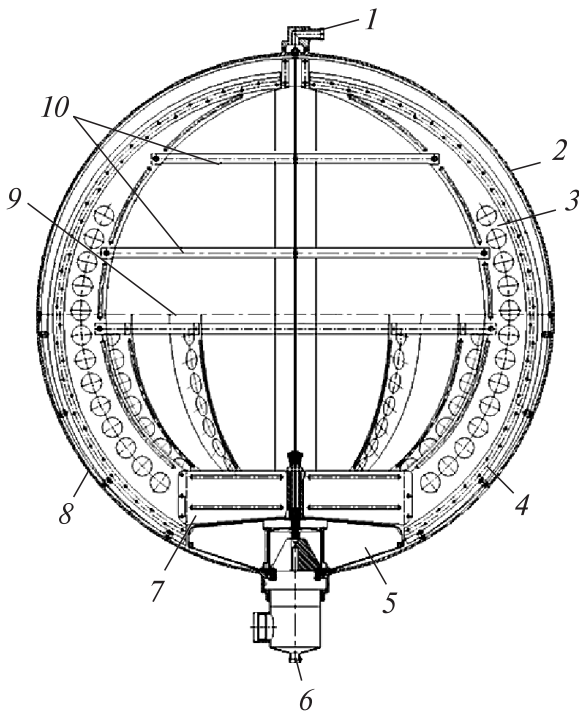


Рис. 4. Топливный бак с внутрибаковым устройством капиллярного типа: 1 — корпус бака; 2 — заправочно-сливной штуцер; 3 — наддувный штуцер; 4 — фазоразделительное устройство; 5 — перегородки верхние; 6 — транспортные желоба; 7 — плоские удерживающие перегородки; 8 — конструктивные рамы; 9 — перегородки нижние; 10 — секторные капиллярные элементы

Fig. 4. A fuel tank with an internal tank capillary type device: 1 — tank body; 2 — filling and drain fitting; 3 — pressurized fitting; 4 — phase separation device; 5 — upper partitions; 6 — shoots; 7 — flat retaining partitions; 8 — structural frames; 9 — lower partitions; 10 — sector capillary elements

Для работы различных технических систем используют теплообменные аппараты. Наиболее эффективные из них работают по принципу фазового перехода (кипения) теплоносителя. В соответствии с классической формулой Кутателадзе, в условиях, близких к невесомости, кипение должно протекать в пленочном режиме.

Ученые АО ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского (г. Обнинск), моделируя кипение в жидкости на горизонтальном проволочном нагревателе, установили, что иногда паровые пузыри «отстреливали» от нагревателя не вверх, в соответствии с действием сил плавучести, а в сторону или даже вниз [22]. Это свидетельствовало о том, что существует иной, отличный от сил плавучести, но заложенный в основу формулы Кутателадзе, механизм отрыва парового пузыря от нагревателя. По инициативе ученых ФЭИ была организована рабочая группа, в состав которой вошли сотрудники ФЭСТ и НИИ ПММ при МГТУ им. Н.Э. Баумана, для изучения этого механизма.

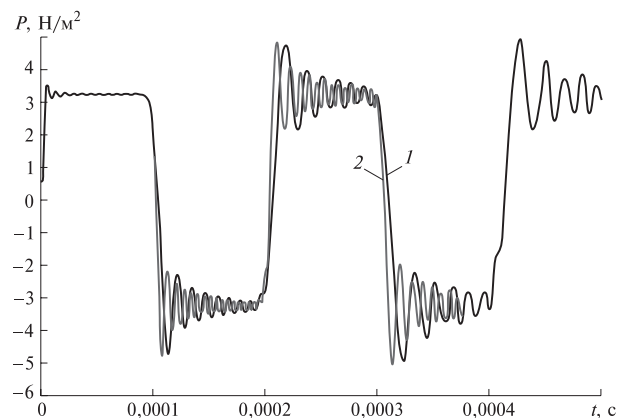


Рис. 5. Волны сжатия и разрежения, возникающие при нагреве жидкости на поверхности нагревателя для воды с начальной температурой 20 °С (плотность теплового потока $q = 10^4$ Вт/м², глубина заполнения (высота столба) $L = 0,05$ м)

Fig. 5. Compression and rarefaction waves that occur when liquid is heated on the surface of a water heater with an initial temperature of 20 °С (heat flux density $q = 10^4$ W/m², filling depth (column height) $L = 0,05$ m)

В работах [23, 24] изложены результаты физического обоснования негравитационного механизма отрыва парового пузыря от нагревателя и численного моделирования этого процесса. Сжимаемый паровый пузырь можно рассматривать как пружину, а массу окружающей жидкости — как груз. Такая механическая модель не только позволила объяснить физический смысл явления, но и получить при проведении вычислительного эксперимента количественные критерии возможности возникновения пузырькового режима кипения в невесомости.

Параллельно с изучением физики такого сложного явления, как кипение была решена задача о шуме, возникающем при нагреве воды. В классической книге Несиса [25] его связывают с недогретым кипением и объясняют схлопыванием паровых пузырьков в недогретой жидкости. Простой бытовой эксперимент опровергает это. Если налить холодную воду в электрический чайник до отметки min и включить его, через некоторое время будет слышно характерное шипение. С течением некоторого времени интенсивность шипения стабилизируется, тогда следует долить холодную воду до отметки max. Через несколько секунд шипение снова возобновится, но тон его будет более низким, не высоким, как это могло следовать из предположения о том, что звук исходит от схлопывающихся пузырьков пара, поскольку в более холодной воде размеры пузырьков должны быть меньше.

Простое экспериментальное вычисление [26] показывает, что звук появляется от температурного расширения нагреваемой жидкости.

Волна сжатия доходит от нагревателя до свободной поверхности, от которой отражается волна разрежения, останавливающая движение жидкости в сторону свободной поверхности (рис. 5). Учитывая значение скорости звука в воде, легко подсчитать частоту колебаний давления, которая хорошо согласуется с данными эксперимента. Эта модель источника звука объясняет, почему при добавлении воды в чайник тон шума понижается — увеличивается расстояние от нагревателя до свободной поверхности.

В 2000 г. была подана заявка от ФЭСТ и НИИ ПММ МГТУ им. Н.Э. Баумана на проведение космического эксперимента на МКС под названием «Кипение». Заявка прошла конкурсный отбор, и проведение космического эксперимента было принято к выполнению на российском сегменте Международной космической станции (МКС) секцией № 1 координационного научно-технического совета (КНТС) Роскосмоса и ФИК РАН НИЦ «Космическое материаловедение» 28.12.2000 г. В 2014 г. к постановщикам эксперимента присоединился коллектив НТВЦ «ЭДУКОН». В настоящее время эксперимент не реализован, однако теоретические исследования и изучение этого явления продолжаются.

Выводы

Есть основание полагать [27], что пузырьковый режим кипения в невесомости можно реализовать, а также можно создать эффективные теплообменные устройства, работающие в условиях невесомости.

Список литературы

- [1] Гришин С.Д., Дубовской В.Б., Обьедников С.С., Савичев В.В. Исследование малых ускорений на борту орбитальной научной станции «Салют-6» // Технологические эксперименты в невесомости / под ред. В.А. Брискмана. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. С. 6–14.
- [2] Авдеевский В.С., Корольков А.В., Купцова В.С., Савичев В.В. Исследование тепловой гравитационной конвекции в переменном поле вектора малых ускорений // ПМТФ, 1987. № 1. С. 54–59.
- [3] Темам Р. Уравнения Навье-Стокса. Теория и численный анализ. М.: Мир, 1981. 408 с.
- [4] Беляев М.Ю., Зыков С.Г., Рябуха С.Б., Сазонов В.В., Сарычев В.А., Стажков В.М. Математическое моделирование и измерение микроускорений на орбитальной станции «Мир» // Известия РАН. Механика жидкости и газа, 1994. № 5. С. 5–14.
- [5] Авдеевский В.С., Лиходед А.И., Савичев В.В. Пространственная эволюция вектора остаточных ускорений на борту космических аппаратов // Космические исследования, 1988. Т. 26. № 4. С. 621–625.
- [6] Ветошкин А.М., Домашев В.Ф., Корольков А.В., Рябуха С.Б., Савичев В.В. Анализ малых ускорений на борту орбитальных научных станций с точки зрения воздействия на гидродинамические системы // Космические исследования, 1998. Т. 36. № 2. С. 221–224.
- [7] Savitchev V.V., Korolkov A.V., Vetoshkin A.M. Computer Simulation of Initial Phase of Immiscible Liquid System Thermocapillary Motion // Space Forum, 1999, v. 4, pp. 307–319.
- [8] Ветошкин А.М., Корольков А.В., Сапожников В.Б. Взаимодействие системы жидкость — газ с фазоразделительными сетками // Обзорение прикладной и промышленной математики, 2017. Т. 24. № 4. С. 315–320.
- [9] Сапожников В.Б., Корольков А.В. Отделение газа от жидкости в потоке газожидкостной смеси в условиях невесомости с помощью комбинированных пористо-сетчатых материалов // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии, 2014. № 1 (14). С. 60–65.
- [10] Александров А.А., Хартов В.В., Новиков Ю.М., Крылов В.И., Ягодников Д.А. Современное состояние и перспективы разработки капиллярных топливозаборных устройств из комбинированных пористо-сетчатых материалов для космических аппаратов с длительным сроком активного существования // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2015. № 6(105). С. 130–142.
- [11] Корольков А.В., Меньшиков В.А., Партола И.С., Сапожников В.Б. Развитие идей профессора В.М. Поляева по применению пористо-сетчатых материалов для внутрибаковых устройств, обеспечивающих многократный запуск ЖРД космических аппаратов и разгонных блоков в условиях свободного и возмущенного орбитального и суборбитального полета // Тр. Всерос. науч.-техн. конф. «Ракетно-космические двигательные установки», посвященной 80-летию со дня рождения заслуженных деятелей науки и техники РФ лауреатов Государственной премии СССР профессоров В.М. Кудрявцева и В.М. Поляева, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 18–19 октября 2018 г. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. С. 17–18.
- [12] Сапожников В.Б., Корольков А.В., Авраамов Н.И. Влияние времени выхода на режим маршевого ЖРД на процесс опорожнения топливного бака летательного аппарата в условиях свободного орбитального полета // Наука и образование, 2015. № 11. С. 603–617
- [13] Корольков А.В., Партола И.С., Сапожников В.Б. Теоретические основы разработки и экспериментальной отработки капиллярных заборных устройств с минимальными остатками топлива. Научно-технические разработки ОКБ-23 – КБ «Салют». М.: Воздушный транспорт, 2006. С. 313–320.
- [14] Сапожников В.Б., Корольков А.В. Отделение газа от жидкости в потоке газожидкостной смеси в условиях невесомости с помощью комбинированных пористо-сетчатых материалов // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии, 2014, № 1 (14). С. 60–65.
- [15] Сапожников В.Б., Меньшиков В.А., Партола И.С., Корольков А.В. Развитие идей профессора В.М. Поляева по применению пористо-сетчатых материалов для внутрибаковых устройств, обеспечивающих многократный запуск жидкостных ракетных двигателей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2006, № 2 (63). С. 78–83.
- [16] Корольков А.В., Сапожников В.Б. Некоторые задачи прикладной промышленной математики в инженерном обеспечении космических полетов // Обзорение прикладной и промышленной математики, 2016. Т. 23. № 4. С. 363–366.
- [17] Сапожников В.Б., Гришко Я.П., Корольков А.В., Большаков В.А., Новиков Ю.М., Константинов С.Б., Мартынов М.Б. Применение комбинированных пори-

- сто-сетчатых материалов в конструкции внутрибаковых устройств двигательных установок космических аппаратов, верхних ступеней ракет-носителей и разгонных блоков // *Материалы XIV Междунар. науч. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева*, 10–12 ноября 2010, г. Красноярск. В 2-х ч. Ч. 1. Красноярск: СибГАУ им. акад. М.Ф. Решетнева, 2010. С. 126.
- [18] Сапожников В.Б., Гришко Я.П., Корольков А.В., Большаков В.А., Новиков Ю.М., Константинов С.Б., Мартынов М.Б. Применение комбинированных пористо-сетчатых материалов в конструкции внутрибаковых устройств двигательных установок космических аппаратов, верхних ступеней ракет-носителей и разгонных блоков // *Вестник СибГАУ им. акад. М.Ф. Решетнева*, 2011. Вып. 3 (36). С. 122–126.
- [19] Корольков А.В., Сапожников В.Б. Расчетно-теоретическая и экспериментальная оценка работоспособности комбинированных пористо-сетчатых материалов в качестве капиллярных заборных устройств топливных баков жидкостных ракетных двигательных установок // *Тез. докл. 11-й Междунар. конф. «Авиация и космонавтика–2012»*. Москва, МАИ (НИУ), 13–15 ноября 2012 г. СПб.: Мастерская печати, 2012. 412 с. С. 220–221.
- [20] Корольков А.В., Королькова Л.В., Сапожников В.Б., Маслов В.А. Оценка объема жидкости в телесных углах транспортных желобов топливного бака космического аппарата // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2018. Т. 22. № 2. С. 120–124.
DOI: 10.18698/2542-1468-2018-2-120-124
- [21] Корольков А.В., Сапожников В.Б., Ефремов Н.В. Динамика жидкости в фазоразделительном устройстве в период опорожнения топливного бака космического аппарата // *Обзорные прикладной и промышленной математики*, 2018. Т. 25. Вып. 3. С. 255–258.
- [22] Исследование динамики паровых пузырьков при кипении воды на тонких проволоках в условиях естественной конвекции / В.И. Субботин, С.П. Казановский, С.К. Коротаев, В.Е. Свириденко, Ю.Ф. Селиванов // *Атомная энергия*, 1970. Т. 28, Вып. 1. С. 9–13.
- [23] Савичев В.В., Корольков А.В., Ветошкин А.М. О гидродинамике пузырькового кипения в невесомости // *Тр. 2-й Рос. нац. конф. по теплообмену*. В 8 т. Т. 4. Кипение, кризисы кипения, закризисный теплообмен. Испарение, конденсация. М.: МЭИ, 1998. С. 206–209.
- [24] Корольков А.В., Коротаев С.К., Савичев В.В., Свириденко И.П. Исследование механизма отрыва паровой фазы при поверхностном кипении жидкости // *Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2001. № 9. С. 90–95.
- [25] Несис Е.И. Кипение жидкостей. М.: Наука, 1973. 280 с.
- [26] Сапожников В.Б., Авраамов Н.И. Условия разрушения газовых полостей в жидкости при переходе от невесомости к кратковременному воздействию // *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017. Вып. 2 (62). С. 1.
- [27] Сапожников В.Б., Корольков А.В. Математическое моделирование процессов кипения в невесомости // *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*, 2015. Вып. 1 (16). С. 61–66.

Сведения об авторах

Корольков Анатолий Владимирович — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Прикладная математика, информатика и вычислительная техника», МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), korolkov@mgul.ac.ru

Ефремов Николай Владимирович — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), efremov@mgul.ac.ru

Сапожников Владимир Борисович — д-р техн. наук, генеральный директор ООО НТВЦ «ЭДУКОН», edukon@yandex.ru

Новиков Юрий Михайлович — канд. техн. наук, нач. отдела ЗАО «ЦВТМ» при МГТУ им. Н.Э. Баумана, nolab@power.bmstu.ru

Большаков Владимир Андреевич — инженер ЗАО «ЦВТМ» при МГТУ им. Н.Э. Баумана, nolab@power.bmstu.ru

Александров Лев Григорьевич — начальник сектора ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина, nrol@laspace.ru

Константинов Сергей Борисович — канд. техн. наук, ведущий конструктор ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина, nrol@laspace.ru

Партола Игорь Станиславович — зам. начальника отдела ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», kerc@elnet.msk.ru

Поступила в редакцию 19.04.2019.

Принята к публикации 15.07.2019.

PARTICIPATION OF FACULTY OF ELECTRONICS AND SYSTEMS ENGINEERING IN SOLVING ENGINEERING AND SCIENTIFIC ISSUES OF COSMONAUTICS (TO THE 60th ANNIVERSARY OF THE FACULTY OF ELECTRONICS AND SYSTEMS ENGINEERING OF THE MOSCOW STATE FOREST UNIVERSITY)

A.V. Korol'kov¹, N.V. Efremov¹, V.B. Sapozhnikov², Yu.M. Novikov³, V.A. Bol'shakov³, L.G. Aleksandrov⁴, S.B. Konstantinov⁴, I.S. Partola⁵

¹BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institut'skaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

²EDUKON, 1/4, Pioneer st., 141090, Korolev, Moscow reg., Russia

³TSVTM at BMSTU, 5, 2nd Baumanskaya st., 105005, Moscow, Russia

⁴NPO them. S.A. Lavochkina, 24, Leningradskaya st., Khimki, 141400, Moscow reg., Russia

⁵State Research Center FSUE «Keldysh Center», 8, Onezhskaya st., 125438, Moscow, Russia

korolkov@mgul.ac.ru

Some results of joint activity of employees of FESE and employees from other organizations and enterprises in the field of the solution of engineering tasks and scientific issues of the space industry are presented from the moment of the faculty opening (1959) till present. The main results were received in the field of studying of features of behavior of liquid in the conditions close to zero gravity, in a research of residual accelerations onboard of spacecraft, in technical problems of supply of liquid fuel in the propulsion system, in studying of boiling in zero gravity.

Keywords: FEST, spacecraft operation modes, Salyut-7, Mir, space experiment

Suggested citation: Korol'kov A.V., Efremov N.V., Sapozhnikov V.B., Novikov Yu.M., Bol'shakov V.A., Aleksandrov L.G., Konstantinov S.B., Partola I.S. *Uchastie FEST v reshenii inzhenernykh i nauchnykh zadach kosmonavtiki (k 60-letiyu fakul'teta elektroniki i sistemotekhniki Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa)* [Participation of Faculty of Electronics and Systems Engineering in solving engineering and scientific issues of cosmonautics (to the 60th anniversary of the Faculty of Electronics and Systems Engineering of the Moscow State Forest University)]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 14–22. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-14-22

References

- [1] Grishin S.D., Dubovskoy V.B., Obydenikov S.S., Savichev V.V. *Issledovanie malykh uskoreniy na bortu orbital'noy nauchnoy stantsii «Salyut-6»* [Study of small accelerations onboard the Salyut-6 orbital scientific station] *Tekhnologicheskie eksperimenty v nevesomosti* [Technological experiments in zero gravity]. Ed. V.A. Briskman. Sverdlovsk: UC USSR Academy of Sciences, 1983, pp. 6–14.
- [2] Avduevskiy V.S., Korol'kov A.V., Kuptsova V.S., Savichev V.V. *Issledovanie teplovy gravitatsionnoy konveksii v peremennom pole vektora malykh uskoreniy* [Study of thermal gravitational convection in a variable field of a vector of small accelerations]. *PMTF*, 1987, no. 1, pp. 54–59.
- [3] Temam R. *Upravneniya Nav'e-Stoksa. Teoriya i chislennyy analiz* [Equations Navier-Stokes. Theory and numerical analysis]. Moscow: Mir, 1981, 408 p.
- [4] Belyaev M.Yu., Zыkov S.G., Ryabukha S.B., Sazonov V.V., Sarychev V.A., Stazhkov V.M. *Matematicheskoe modelirovanie i izmerenie mikrouskoreniy na orbital'noy stantsii «Mir»* [Mathematical modeling and measurement of micro-accelerations at the Mir orbital station] *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza* [Izvestia RAN. Fluid and gas mechanics], 1994, no. 5, pp. 5–14.
- [5] Avduevskiy V.S., Likhoded A.I., Savichev V.V. *Prostranstvennaya evolyutsiya vektora ostatochnykh uskoreniy na bortu kosmicheskikh apparatov* [Spatial evolution of the vector of residual accelerations onboard spacecraft] *Kosmicheskie issledovaniya* [Space research], 1988, v. 26, no. 4, pp. 621–625.
- [6] Vetoshkin A.M., Domashev V.F., Korol'kov A.V., Ryabukha S.B., Savichev V.V. *Analiz malykh uskoreniy na bortu orbital'nykh nauchnykh stantsiy s tochki zreniya vozdeystviya na gidrodinamicheskie sistemy* [Analysis of small accelerations onboard orbital research stations in terms of their impact on hydrodynamic systems] *Kosmicheskie issledovaniya* [Space Research], 1998, v. 36, no. 2, pp. 221–224.
- [7] Savichev V.V., Korolkov A.V., Vetoshkin A.M. *Computer Simulation of Initial Phase of Immiscible Liquid System Thermo-capillary Motion*. *Space Forum*, 1999, v. 4, pp. 307–319.
- [8] Vetoshkin A.M., Korol'kov A.V., Sapozhnikov V.B. *Vzaimodeystvie sistemy zhidkost' — gaz s fazorazdelitel'nymi setkami* [Sapozhnikov Interaction of a liquid-gas system with phase separation grids] *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki* [Review of Applied and Industrial Mathematics], 2017, v. 24, no. 4, pp. 315–320.
- [9] Sapozhnikov V.B., Korol'kov A.V. *Otdelenie gaza ot zhidkosti v potoke gazozhidkostnoy smesi v usloviyakh nevesomosti s pomoshch'yu kombinirovannykh poristo-setchatykh materialov* [Separation of gas from liquid in a gas-liquid mixture flow in zero gravity using combined porous-mesh materials] *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii* [Modern Science: Research, Ideas, Results, Technology], 2014, no. 1 (14), pp. 60–65.
- [10] Aleksandrov A.A., Khartov V.V., Novikov Yu.M., Krylov V.I., Yagodnikov D.A. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razrabotki kapillyarnykh toplivozabornykh ustroystv iz kombinirovannykh poristo-setchatykh materialov dlya kosmicheskikh apparatov s dlitel'nym srokom aktivnogo sushchestvovaniya* [The current state and prospects for the development of capillary fuel-intake devices from combined porous-mesh materials for spacecraft with a long active life period] *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya «Mashinostroeniye»* [Vestnik of Moscow State Technical University. N.E. Bauman. Series «Engineering»], 2015, no. 6 (105), pp. 130–142.

- [11] Korol'kov A.V., Men'shikov V.A., Partola I.S., Sapozhnikov V.B. *Razvitie idey professora V.M. Polyayeva po primeneniyu poristo-setchatykh materialov dlya vnutribakovykh ustroystv, obespechivayushchikh mnogokratnyy zapusk ZhRD kosmicheskikh apparatov i razgonnykh blokov v usloviyakh svobodnogo i vozmushchennogo orbital'nogo i suborbital'nogo poleta*. [The development of ideas of Professor V.M. Polyayev on the use of porous-mesh materials for in-tank devices ensuring multiple launching of rocket engines of spacecraft and accelerating units in a free and disturbed orbital and suborbital flight] Trudy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Raketno-kosmicheskie dvigatel'nye ustanovki», posvyashchennoy 80-letiyu so dnya rozhdeniya Zasluzhennykh deyatel'nykh nauki i tekhniki RF, laureatov Gosudarstvennoy premii SSSR, professorov V.M. Kudryavtseva i V.M. Polyayeva [The birthday of Honored Workers of Science and Technology of the Russian Federation, laureates of the USSR State Prize, professors V.M. Kudryavtseva and V.M. Polyayeva]. Moscow, BMSTU. October 18–19, 2018. Moscow: BMSTU, 2005, pp. 17–18.
- [12] Sapozhnikov V.B., Korol'kov A.V., Avraamov N.I. *Vliyanie vremeni vykhoda na rezhim marshevogo ZhRD na protsess oporozhneniya toplivnogo baka letatel'nogo apparata v usloviyakh svobodnogo orbital'nogo poleta* [Influence of the time to enter the marching LRE mode on the process of emptying the fuel tank of an aircraft in a free orbital flight] Nauka i obrazovanie [Science and Education], 2015, no. 11, pp. 603–617.
- [13] Korol'kov A.V., Partola I.S., Sapozhnikov V.B. *Teoreticheskie osnovy razrabotki i eksperimental'noy otrabotki kapillyarnykh zabornykh ustroystv s minimal'nymi ostatkami topliva. Nauchno-tekhnicheskie razrabotki OKB-23 – KB «Salyut»* [Theoretical basis for the development and experimental testing of capillary intake devices with minimal fuel residues. Scientific and technical development of OKB-23 – Salyut]. Moscow: Vozdushnyy transport [Air transport], 2006, pp. 313–320.
- [14] Sapozhnikov V.B., Korol'kov A.V. *Otdelenie gaza ot zhidkosti v potoke gazozhidkostnoy smesi v usloviyakh nevesomosti s pomoshch'yu kombinirovannykh poristo-setchatykh materialov* [Separation of gas from a liquid in a gas-liquid mixture flow in zero gravity using combined porous-mesh materials] Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii [Modern Science: Research, Ideas, Results, Technology], 2014, no. 1 (14), pp. 60–65.
- [15] Sapozhnikov V.B., Men'shikov V.A., Partola I.S., Korol'kov A.V. *Razvitie idey professora V.M. Polyayeva po primeneniyu poristo-setchatykh materialov dlya vnutribakovykh ustroystv, obespechivayushchikh mnogokratnyy zapusk zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [The development of ideas of Professor V.M. Polyayev on the use of porous-mesh materials for in-tank devices that provide multiple launch of liquid-propellant rocket engines]. Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Seriya «Mashinostroeniye» [Bulletin of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. Series «Machinostroeniye»], 2006, no. 2 (63), pp. 78–83.
- [16] Korol'kov A.V., Sapozhnikov V.B. *Nekotorye zadachi prikladnoy promyshlennoy matematiki v inzhenernom obespechenii kosmicheskikh poletov* [Some Problems of Applied Industrial Mathematics in the Engineering Support of Space Flight] Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki [Review of Applied and Industrial Mathematics], 2016, v. 23, no. 4, pp. 363–366.
- [17] Sapozhnikov V.B., Grishko Ya.P., Korol'kov A.V., Bol'shakov V.A., Novikov Yu.M., Konstantinov S.B., Martynov M.B. *Primenenie kombinirovannykh poristo-setchatykh materialov v konstruktsii vnutribakovykh ustroystv dvigateley i razgonnykh blokov* [The use of combined porous-mesh materials in the design of internal equipment for propulsion systems of spacecraft, upper stages of launch vehicles and booster blocks] Materialy XIV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M.F. Reshetneva [Proceedings of the XIV International Scientific Conference dedicated to the memory of the general designer of space-rocket systems Academician M.F. Reshetneva], November 10–12, 2010, Krasnoyarsk. In 2 hours. Part 1. Krasnoyarsk: Siberian State Aerospace University, 2010, p. 126.
- [18] Sapozhnikov V.B., Grishko Ya.P., Korol'kov A.V., Bol'shakov V.A., Novikov Yu.M., Konstantinov S.B., Martynov M.B. *Primenenie kombinirovannykh poristo-setchatykh materialov v konstruktsii vnutribakovykh ustroystv dvigateley i razgonnykh blokov* [The use of combined porous-mesh materials in the design of internal storage devices of the propulsion systems of spacecraft, upper stages of launch vehicles and upper stages] Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. M.F. Reshetneva [Bulletin of the Siberian State Aerospace University M.F. Reshetneva], 2011, v. 3 (36), pp. 122–126.
- [19] Korol'kov A.V., Sapozhnikov V.B. *Raschetno-teoreticheskaya i eksperimental'naya otsenka rabotosposobnosti kombinirovannykh poristo-setchatykh materialov v kachestve kapillyarnykh zabornykh ustroystv toplivnykh bakov zhidkostnykh raketnykh dvigateley i ustanovok* [Theoretical and experimental evaluation of the performance of combined porous-mesh materials as capillary intakes for liquid-propellant rocket propulsion systems] Tezisy dokladov: 11-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya «Aviatsiya i kosmonavtika–2012» [Abstracts: 11th International Conference «Aviation and Cosmonautics–2012»]. Moscow, MAI (NRU) November 13–15, 2012. Saint Petersburg: Masterskaya pechati [Workshop Press], 2012, 412 p, pp. 220–221.
- [20] Korol'kov A.V., Korol'kova L.V., Sapozhnikov V.B., Maslov V.A. *Otsenka ob'ema zhidkosti v telesnykh uglakh transportnykh zhelobov toplivnogo baka kosmicheskogo apparata* [Estimation of the volume of fluid in the solid corners of the transport chutes of the fuel tank of a spacecraft] Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2018, v. 22, no. 2, pp. 120–124. DOI: 10.18698 / 2542-1468-2018-2-120-124
- [21] Korol'kov A.V., Sapozhnikov V.B., Efremov N.V. *Dinamika zhidkosti v fazorazdelitel'nom ustroystve v period oporozhneniya toplivnogo baka kosmicheskogo apparata* [Fluid dynamics in a phase-separation device during the period of emptying the fuel tank of a spacecraft] Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki [Review of Applied and Industrial Mathematics], 2018, t. 25, iss. 3, pp. 255–258.
- [22] Subbotin V.I., Kazanovskiy S.P., Korotaev S.K., Sviridenko V.E., Selivanov Yu.F. *Issledovanie dinamiki parovykh puzyr'kov pri kipenii vody na tonkikh provolokakh v usloviyakh estestvennoy konveksii* [Investigation of the dynamics of vapor bubbles in boiling water on thin wires under conditions of natural convection] Atomnaya energiya [Atomic Energy], 1970, no. 28, v. 1, pp. 9–13.
- [23] Savichev V.V., Korol'kov A.V., Vetoshkin A.M. *O gidrodinamike puzyr'kovogo kipeniya v nevesomosti* [On hydrodynamics of bubble boiling in zero gravity] Tr. Vtoraya Rossiyskaya natsional'naya konferentsiya po teploobmenu, v 8 t. T. 4. Kipenie, krizisy kipeniya, zakrizisnyy teploobmen. Isparenie, kondensatsiya [Second Russian National Heat Transfer Conference. In 8 v., v. 4. Boiling, boiling crises, supercritical heat exchange. Evaporation, condensation]. Moscow: MEI, 1998, pp. 206–209.

- [24] Korol'kov A.V., Korotaev S.K., Savichev V.V., Sviridenko I.P. *Issledovanie mekhanizma otrывa parovoy fazy pri poverkhnostnom kipenii zhidkosti* [Investigation of the vapor phase separation mechanism during surface boiling of a liquid] *Poverkhnost', rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya* [Surface, X-ray, synchrotron and neutron studies], 2001, no. 9, pp. 90–95.
- [25] Nesis E.I. *Kipenie zhidkostey* [Boiling liquids]. Moscow: Nauka [Science], 1973, 280 p.
- [26] Sapozhnikov V.B., Avraamov N.I. *Usloviya razrusheniya gazovykh polostey v zhidkosti pri perekhode ot nevesomosti k kratkovremennomu vozdeystviyu* [Conditions for the destruction of gas cavities in a liquid during the transition from weightlessness to short-term effects] *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering magazine: science and innovations], 2017, no. 2 (62), p. 1.
- [27] Sapozhnikov V.B., Korol'kov A.V. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov kipeniya v nevesomosti* [Mathematical modeling of boiling processes in zero gravity] *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii* [Modern science: research, ideas, results, technologies], 2015, no. 1 (16), pp. 61–66.

Authors' information

Korol'kov Anatoliy Vladimirovich — Dr. Sci. (Phys.-Mat.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), korol'kov@mgul.ac.ru

Efremov Nikolay Vladimirovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), efremov@mgul.ac.ru

Sapozhnikov Vladimir Borisovich — Dr. Sci. (Tech.), General Director of LLC NTVTS «EDUCON», edukon@yandex.ru

Novikov Yuriy Mikhaylovich — BMSTU, Head of Department CJSC TSVTM at BMSTU, nolab@power.bmstu.ru

Bol'shakov Vladimir Andreevich — Engineer CJSC TSVTM at BMSTU, nolab@power.bmstu.ru

Aleksandrov Lev Grigor'evich — Head of the Sector of FSUE NPO S.A. Lavochkina, npol@laspace.ru

Konstantinov Sergey Borisovich — Cand. Sci. (Tech.), Leading Designer FSUE NPO them. S.A. Lavochkina, npol@laspace.ru

Partola Igor' Stanislavovich — Deputy Head of the Department of the State Research Center FSUE «Center of Keldysh», kerc@elnet.msk.ru

Received 19.04.2019.

Accepted for publication 15.07.2019.