

УДК 629.7.085; 629.764.7

И. В. Бармин, В. А. Зверев,  
А. Ю. Украинский, А. В. Языков

## РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ОТВОДА КОНСТРУКЦИЙ СТАРТОВОЙ СИСТЕМЫ, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СТРУЙ ДВИГАТЕЛЕЙ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ “СОЮЗ”

*Представлены методологические основы расчетного анализа динамики и прочности отводимых конструкций агрегатов стартовой системы, находящихся под воздействием газодинамической струи двигательной установки ракеты-носителя. Рассмотрены вопросы физического моделирования отводимых конструкций и действующих на них нагрузок, а также вопросы математического моделирования процессов, происходящих в агрегатах при старте ракеты-носителя. Приведены примеры физического моделирования и результаты расчетного анализа отводимых конструкций агрегатов стартовой системы для ракет-носителей семейства “Союз”.*

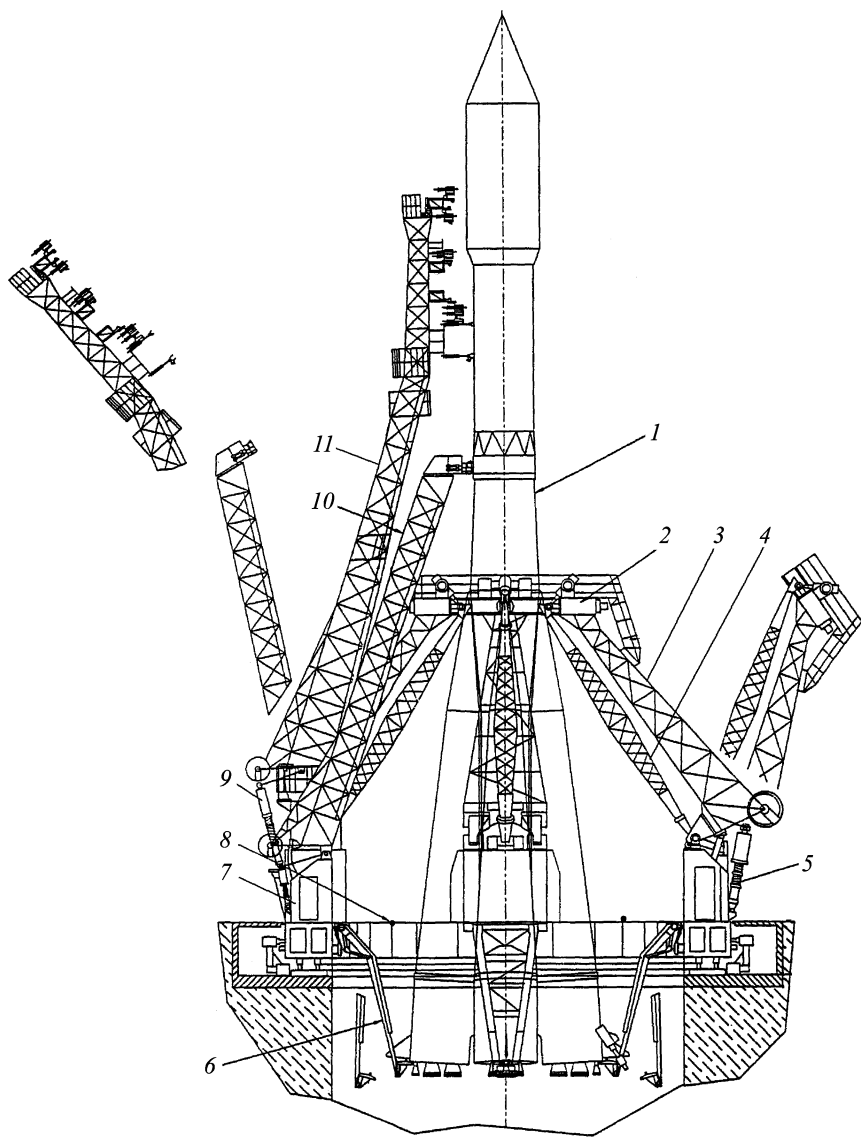
**E-mail:** sm8@sm8.bmstu.ru

**Ключевые слова:** ракета-носитель, стартовая система, газодинамика старта, конструкция, динамика, прочность, физическое моделирование, расчетный анализ.

Ракеты-носители (РН) серии “Союз” уже почти 50 лет являются одним из самых надежных и эффективных средств выведения на околоземную орбиту автоматических космических аппаратов социально-экономического, научно-исследовательского, специального назначения, а также пилотируемых и грузовых космических кораблей. В последнее время в соответствии с программами по развитию средств выведения РН серии “Союз” претерпевают различные модернизации. Среди разработанных и планируемых модификаций можно выделить “Союз СТ” и “Союз 2-1в”, которые позволят по-прежнему обеспечить востребованность данной РН в российских космических программах, а также программах международного сотрудничества в области освоения и использования космического пространства.

Разрабатываемые варианты РН “Союз” характеризуются изменением габаритных размеров, стартовой массы и тяги ракетных двигателей, что требует проведения модернизации несущих конструкций агрегатов существующих и вновь создаваемых стартовых систем (СС). В связи с этим требуется проведение расчетов для обоснования принятых решений по модернизации агрегатов СС или определения резервов использования существующих СС для обеспечения пуска модернизированной РН. Конструктивная схема агрегатов СС для РН “Союз 2” приведена на рис. 1.

Одной из задач при модернизации агрегатов СС является необходимость обеспечения необходимой прочности и надежного безударного отвода ее подвижных элементов (опорных ферм, кабельных и кабель-заправочных мачт, направляющих устройств), отводимых либо в момент старта ракеты, либо за небольшое время до него. Отводимые конструкции в процессе функционирования испытывают различные нагрузки и воздействия, а именно: собственный вес, газодинамическое воздействие (силовое и тепловое), а также



**Рис. 1. Агрегаты стартового комплекса для РН “Союз 2”:**

1 – РН; 2 – сектор силового пояса; 3 – опорная ферма; 4 – несущая стрела; 5 – гидробуфер торможения опорной фермы; 6 – направляющее устройство; 7 – основание опорной фермы; 8 – опорное кольцо; 9 – гидробуфер торможения кабель-заправочной мачты (11); 10 – верхняя кабель-мачта

инерционные нагрузки, вызванные действием приводов и устройств торможения.

В рамках расчетного анализа отвода конструкций агрегатов СС необходимо решить ряд задач:

- физическое моделирование агрегатов СС;
- определение и моделирование нагрузок, действующих на отводимые агрегаты;
- определение кинематических параметров отвода;
- расчет прочности конструкций отводимых агрегатов СС.

В течение ряда лет на кафедре “Стартовые ракетные комплексы” МГТУ им. Н.Э. Баумана проводились работы по исследованию несущей способности агрегатов СС при их отводе. Физическое моделирование конструкций отводимых агрегатов осуществлялось с использованием метода конечных элементов и метода суперэлементов. Основные геометрические характеристики агрегатов, их жесткостные и массовые свойства учитывались в моделях путем задания соответствующих характеристик конечным элементам (КЭ) и их ориентации в пространстве (введением в узлы модели дополнительных сосредоточенных масс). Учет кинематики осуществлялся наложением на узлы моделей соответствующих внешних и внутренних связей. Для учета особенностей взаимодействия отдельных элементов в моделях агрегатов СС использовались упругие нелинейные связи. В качестве примера физического моделирования на рис. 2 приведены конструктивная и расчетная схемы системы опорная ферма – сектор силового пояса – несущая стрела – основание опорной фермы СС для РН “Союз 2”, а на рис. 3 – конструктивная и расчетная схемы направляющего устройства СС для РН “Союз 2-1В”.

Весовые узловые нагрузки модели агрегата СС формировались из весовых узловых нагрузок всех конечных элементов модели и весов дополнительных сосредоточенных масс. Воздействие струй двигательной установки (ДУ) РН на конструкции агрегатов проявляется в виде динамического давления и нагрева. Нагрузки, вызванные скоростным напором струй ДУ РН, рассматривались как воздействие скоростного напора ветра и определялись согласно работе [1]. Полная газодинамическая нагрузка, действующая на КЭ модели, представлялась в виде произведения статической составляющей газодинамической нагрузки и коэффициента динамичности.

Для расчета изменения температур конструкций агрегатов СС комплекса, напряжений и деформаций, вызванных нагревом, была предложена методика [2], позволяющая проводить прогнозирование температур и температурных напряжений в различных элементах конструкций стартового оборудования при газодинамическом воздействии струй ДУ РН.

Методика базируется на решении двух задач: задачи моделирования процессов теплообмена в конструкциях СС при воздействии на них струй ДУ РН и задачи математического моделирования тепловых деформаций.

Методика моделирования процессов теплообмена позволяет, исходя из параметров струй ДУ РН, получить распределение температур в элементах конструкции СС для различных моментов времени и задать это распределение в ее конечно-элементной модели.

Моделирование тепловых деформаций осуществляется путем ввода в модель фиктивных сил, влияние которых на конструкцию эквивалентно тепловой нагрузке.

Узловые инерционные нагрузки определяли, исходя из расчетного анализа кинематики отвода подвижных элементов агрегатов СС. Кинематические параметры отвода элемента агрегата в зависимости от его жесткости можно найти, рассматривая движение агрегата как жесткого целого, так и как упруго-массовой системы. Суть методик, описывающих данные подходы, приведена соответственно в работах [3 и 4]. С помощью данных методик можно не только определить параметры движения отводимой конструкции (следовательно, и инерционные силы), но и выбрать тип тормозящего устройства и характер его работы.

Поведение физической модели отводимого агрегата СС при статическом нагружении можно описать системой линейных алгебраических уравнений, которая в матричной форме имеет вид [5]

$$\{V\} = [L*] \cdot \{v\}, \quad (1)$$

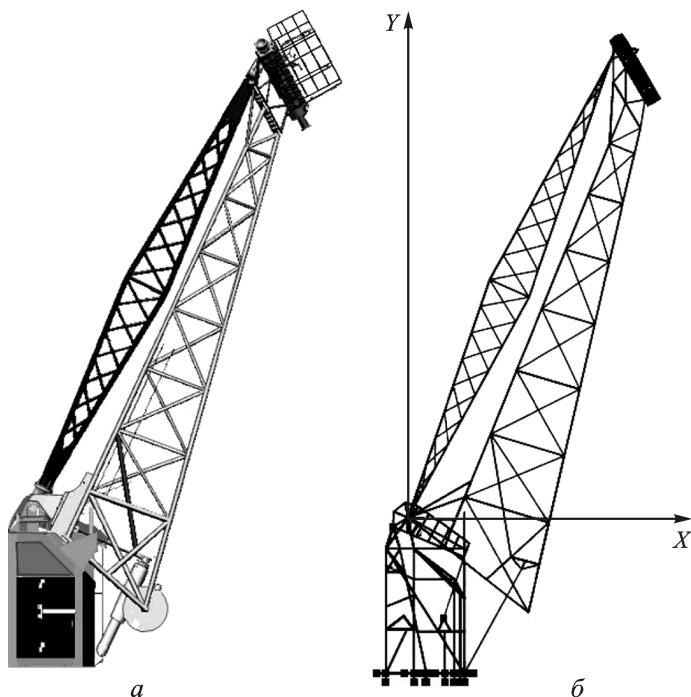


Рис. 2. Конструктивная (а) и расчетная (б) схемы системы опорная ферма – сектор силового пояса – несущая стрела – основание опорной фермы для РН “Союз”

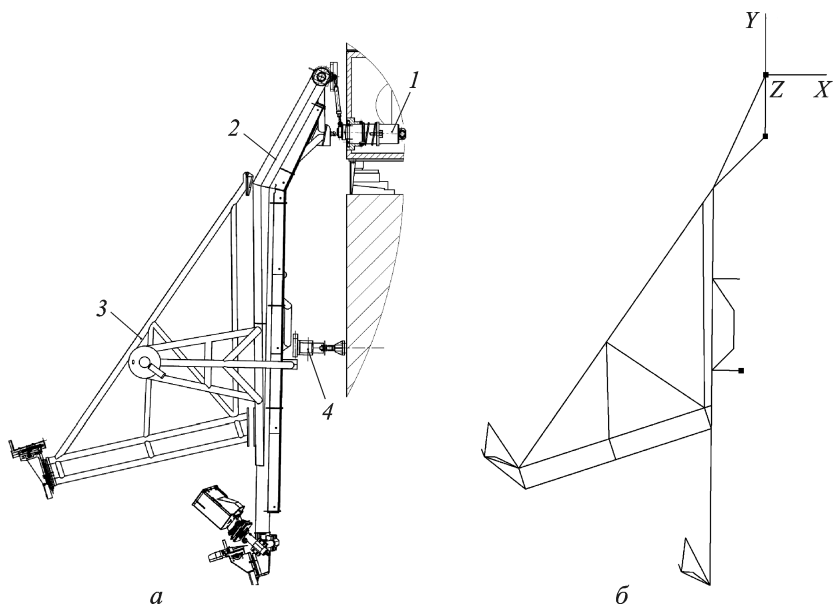


Рис. 3. Конструктивная (а) и расчетная (б) схемы направляющего устройства СС для РН “Союз 2-1в”:

1 – гидродомкрат-тормоз; 2 – штатное направляющее устройство для “Союз 2”; 3 – кронштейн направляющего устройства СС для РН “Союз 2-1в”; 4 – упор

где  $\{v\}$  — полный вектор обобщенных координат, учитывающий все перемещения всех узлов модели;  $\{V\}$  — полный вектор сил, действующих вдоль компонент  $\{v\}$ ;  $[L*]$  — матрица жесткости физической модели, соответствующая полному вектору обобщенных координат  $\{v\}$ .

Матрица  $[L*]$  формируется из матриц жесткости КЭ:

$$[L*] = \sum_n ([T]^T \cdot [K] \cdot [T]), \quad (2)$$

где  $n$  — число КЭ модели;  $[K]$  — матрица жесткости КЭ в собственной, локальной системе координат;  $[T]$  — матрица преобразования обобщенных координат КЭ в локальной системе координат в глобальную (в систему обобщенных координат модели).

Для описания динамических процессов, протекающих в агрегатах СС, использовалась система дифференциальных уравнений, представляющая собой уравнение динамического равновесия модели агрегата стартового комплекса:

$$[M] \cdot \{q''\} + \alpha \cdot [L] \cdot \{q'\} + [L] \cdot \{q\} = -g \cdot [M] \cdot \{\varepsilon\} + \Sigma\{P\} \cdot u(t) + \Sigma\{\Phi_R\} \cdot R(x, x'), \quad (3)$$

где  $\{q\}$ ,  $\{q'\}$ ,  $\{q''\}$  — векторы перемещений, скоростей и ускорений узлов модели в направлении обобщенных координат;  $[M]$  и  $[L]$  — приведенные матрицы масс и жесткости модели;  $\alpha$  — коэффициент, учитывающий рассеяние энергии за счет внутреннего демпфирования;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\{\varepsilon\}$  — вектор направления гравитационных сил;  $\{P\}$  — вектор распределения внешних сил;  $u(t)$  — функция изменения вектора внешних сил во времени;  $\{\Phi_R\}$  — вектор, определяющий положение нелинейной связи в пространстве;  $R(x')$  — характеристика нелинейных связей;  $x$  — удлинение связи, зависящее от  $\{q\}$ ;  $x'$  — скорость удлинения связи, зависящая от  $\{q'\}$ .

После решения уравнений (1) и (3) были определены перемещения, скорости и ускорения характерных точек модели. На основе полученных данных с помощью методики, приведенной в работе [6], были определены внутренние силовые факторы и напряжения в КЭ моделей агрегатов СС и определены коэффициенты запаса по прочности.

Физическое моделирование и расчетный анализ отводимых агрегатов СС проводился с помощью программного комплекса SADAS, созданного на кафедре “Стартовые ракетные комплексы” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

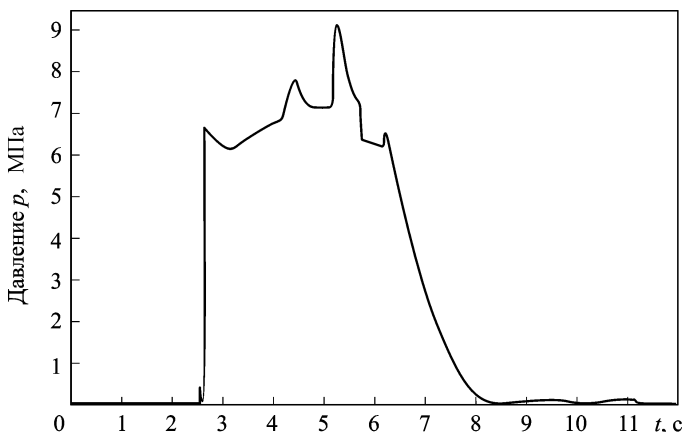
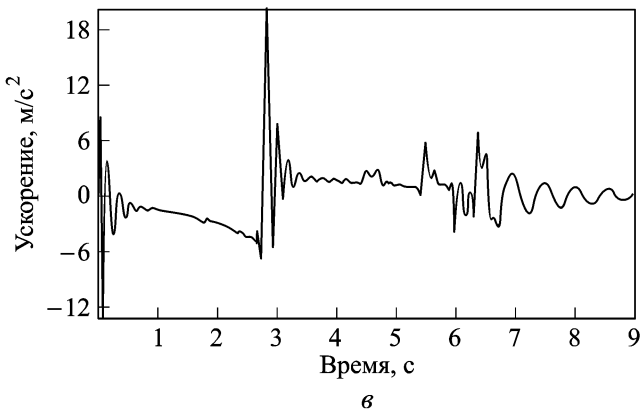
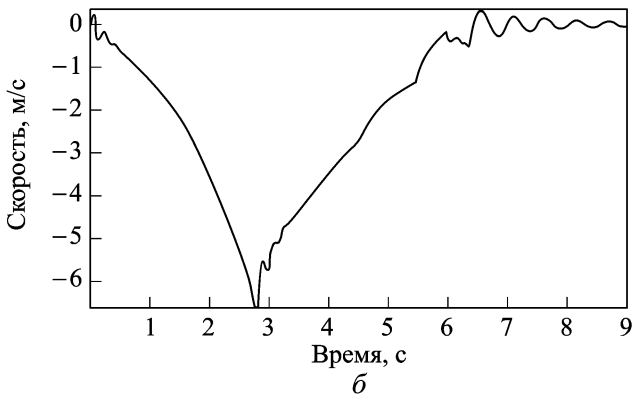
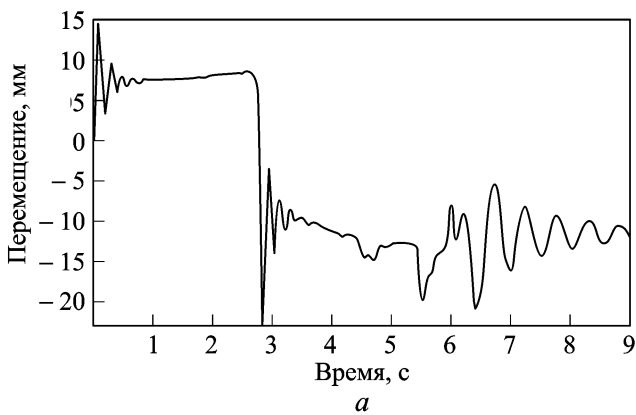


Рис. 4. Результаты расчета изменения давления в гидробуфере (см. рис. 1) при торможении кабель-заправочной мачты СС для РН “Союз-2”



**Рис. 5. Результаты расчета параметров подвижной части (верхней точки) кабель-заправочной мачты СС для РН “Союз-2” (см. рис. 1):**

*a* – тангенциальное перемещение; *б* – скорость; *в* – ускорение

Описанный методический аппарат для расчетного анализа процессов отвода элементов конструкций агрегатов СС, находящихся под воздействием струй ДУ РН, был использован при проектной разработке агрегатов СС для таких вариантов РН “Союз”, как “Аврора”, “Ямал”, “Союз СТ”, “Союз 2-1в”.

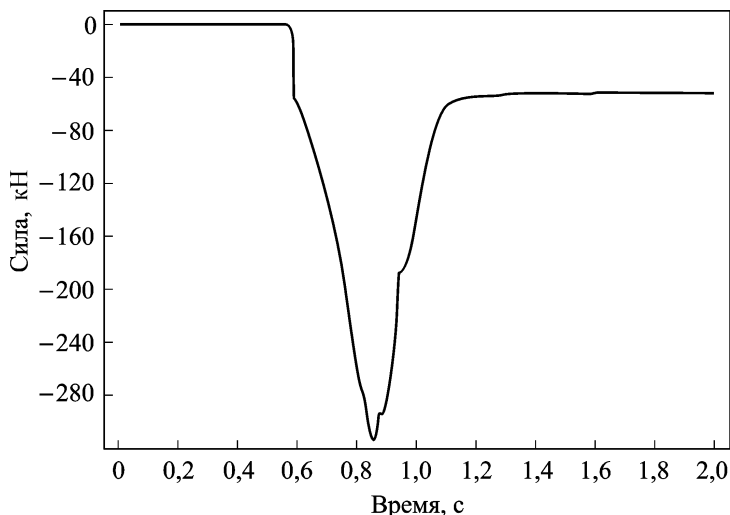


Рис. 6. Результаты расчета изменения силы в гидродомкрате-тормозе (см. рис. 3) при торможении направляющего устройства СС для РН “Союз-2.1в”

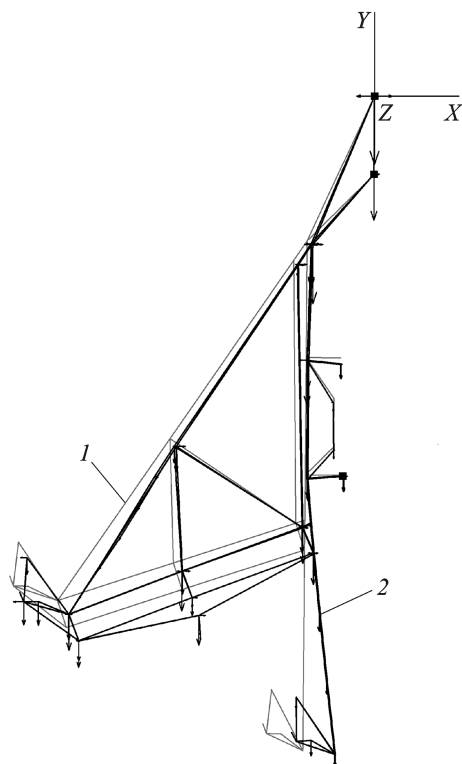


Рис. 7. Деформированное состояние модели направляющего устройства СС для РН “Союз-2.1в” (см. рис. 3) при воздействии скоростного напора газодинамической струи ДУ РН:  
 1 – исходное состояние; 2 – деформированное

На рис. 4–7 приведены примеры физического моделирования и результатов расчетного анализа отводимых агрегатов СС для РН семейства “Союз”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОСТ 92-9249-80. Агрегаты специального назначения.
2. И г р и ц к и й В. А., Ч у г у н к о в В. В., Я з ы к о в А. В. Методика прогнозирования температур и температурных напряжений в элементах конструкций стартового оборудования при газодинамическом воздействии струй двигателей стартующей ракеты // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2010. – Спец. вып. – С. 53–60.
3. З в е р е в В. А., У к р а и н с к и й А. Ю. Исследование динамики отвода конструкций стартового оборудования ракеты-носителя “Союз” при использовании различных вариантов гидробуферов торможения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2010. – Спец. вып. – С. 61–66.
4. А б а к у м о в В. С., З в е р е в В. А., Л о м а к и н В. В. Методика расчетного анализа динамики отвода подвижных конструкций агрегатов ракетно-космических стартовых комплексов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2008. – Спец. вып. – С. 131–135.
5. З е н к е в и ч О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 318 с.
6. М е т о д и ч е с к и й аппарат для расчетного анализа прочности конструкций стартового комплекса ракет-носителей серии “Союз” / В.С. Абакумов, В.А. Зверев, В.В. Ломакин и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2008. – Спец. вып. – С. 124–130.

Статья поступила в редакцию 24.12.2010



Игорь Владимирович Бармин родился в 1943 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1966 г. Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой “Стартовые ракетные комплексы” МГТУ им. Н.Э. Баумана, чл.-корр. РАН. Лауреат Государственной премии и премии Правительства РФ, заслуженный деятель науки РФ, заслуженный создатель космической техники, вице-президент Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, академик Российской и Международной инженерных академий, Международной академии астронавтики. Генеральный конструктор наземной космической инфраструктуры ФГУП ЦЭНКИ. Автор около 200 научных работ в области проектирования и отработки конструкций стартовых комплексов.

I.V. Barmin (b. 1943) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1966. D. Sc. (Eng.), professor, head of “Launch Complexes” department of the Bauman Moscow State Technical University, corresponding member of the Russian Academy of Sciences. Winner of RF State Prize and RF Government Prize, Honored Scientist of the RF, Honored Creator of Space Machinery, vice-president of the Russian Academy of Cosmonautics n.a. K.E. Tsiolkovskii, member of the Russian and International Engineering Academies, and the International Academy of Astronautics. General designer of “TsENKI” Federal State Unitary Enterprise. Author of about 200 publications in the field of design and development of structures of launch complexes.



В.А. Зверев родился в 1966 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1990 г. Доцент кафедры “Стартовые ракетные комплексы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 14 научных работ в области динамики и прочности агрегатов стартовых комплексов.

V.A. Zverev (b. 1966) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1990. Assoc. professor of “Launch Complexes” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 14 publications in the field of dynamics and strength of equipment of launch complexes.



А.Ю. Украинский родился в 1982 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2005 г. Ассистент кафедры “Стартовые ракетные комплексы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор трех научных работ в области динамики и прочности агрегатов стартовых комплексов.



A.Yu. Ukrainskii (b. 1982) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2005. Assistant lecturer of “Launch Complexes” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 3 publications in the field of dynamics and strength of equipment of launch complexes.

А.В. Языков родился в 1983 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2005 г. Старший преподаватель кафедры “Стартовые ракетные комплексы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор четырех научных работ в области тепломассообмена в агрегатах стартовых комплексов.



A.V. Yazykov (b. 1983) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2005. Senior teacher of “Launch Complexes” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 4 publications in the field of heat and mass exchange in equipment of launch complexes.