



УДК 662.311.11+678.046+539.319

В. В. Яковина, А. В. Гуляев, В. И. Малинин

Влияние размера частиц наполнителя на отслоение при растяжении смесового топлива

В прочноскрепленных зарядах при эксплуатации топливо растягивается, на границе «наполнитель – связующее» возникают отрывные напряжения. В высоконаполненных композициях толщина прослойки связующего между частицами наполнителя минимальна и вероятность достижения критических значений напряжений с отрывом частиц высока. Смоделирована структура полифракционного топлива и проанализировано влияние размера частиц наполнителя на отрывные напряжения при статической растягивающей нагрузке.

Ключевые слова: смесовое твердое топливо, наполнитель, размер частиц, отслоение, связующее, отрывные напряжения, деформация топлива, скорость горения.

Современные рецептурные композиции смесовых твердых топлив (СТТ) характеризуются высоким коэффициентом наполнения твердыми частицами окислителя и энергетических добавок в связи с потребностью в повышенных энергетических характеристиках. Объемная доля полимерного горючего-связующего (ГСВ), обеспечивающего монолитность структуры топлива и требуемый уровень физико-механических характеристик (ФМХ), не превышает 20 %. В процессе эксплуатации прочноскрепленных зарядов из таких СТТ при изменении температуры окружающей среды топливо подвергается растягивающим нагрузкам ввиду отличающегося на порядок и более коэффициента линейного температурного расширения по сравнению с материалом оболочки корпуса. Поскольку модули упругости твердых частиц наполнителя значительно выше вязкоупругого модуля полимерной матрицы, поле напряжений в материале является неоднородным и имеет зоны концентрации с высокими отрывными напряжениями на контакте «твердая частица – связующее». Уровень этих напряжений и распределение зон концентрации напряжений в объеме СТТ при фиксированных растягивающих деформациях существенно зависят от толщин прослоек связующего между частицами наполнителя, т. е. в целом от коэффициента наполнения СТТ. При некотором значении коэффициента наполнения (суммарной массовой доли окислителя, энергетических добавок и иных твердых компонентов), характеризующем конкретный

состав СТТ, толщины прослоек и напряжения на контакте «твердая частица – связующее» при растяжении будут зависеть от морфологических и гранулометрических характеристик наполнителя (в том числе от плотности упаковки компонентов различной дисперсности в смеси), ФМХ связующего и наполнителя. Так, для частиц одного и того же типа наполнителя, например распространенной сферической формы, в полифракционной смеси отрывные напряжения будут различными для крупных и мелких зерен.

Непосредственно отрыв частиц наполнителя от ГСВ происходит в том случае, когда напряжения достигают критических значений, соизмеримых со значением его адгезии к связующему. Последняя является случайной величиной, имеющей некоторые пределы и подчиняющейся нормальному закону распределения [1]. Ее значение может быть оценено теоретически с использованием опытных диаграмм растяжения образцов СТТ [2]. Несмотря на то, что отрыв частиц наполнителя является нежелательным процессом и приводит к увеличению удельной поверхности горения СТТ и росту ожидаемой скорости горения, избежать данного процесса для ряда высоконаполненных СТТ в полной мере не удастся. Этому способствует в целом применение высоконагруженных конструкций зарядов, работающих в широком температурном диапазоне $-50...50$ °С, а также использование в составе СТТ компонентов с низкой адгезией к связующему, например октогена. Влияние структурных изменений, происходящих в топливе при знакопеременных нагрузках, на баллистиче-

© Яковина В. В., Гуляев А. В., Малинин В. И., 2018



ские и прочностные свойства должно учитываться как при разработке рецептур СТТ, так и при проектировании конструкций зарядов [3, 4]. Актуальна задача понимания и прогнозирования процесса отслоения наполнителя, а также дальнейшего учета его влияния на скорость горения топлива в изделиях [2, 3]. В этом плане понимание зависимости отрывных напряжений от относительного размера частиц в смеси является шагом на пути к построению модели горения широко применяемых в практике полифракционных составов СТТ в условиях напряженно-деформированного состояния (НДС).

Для оценки влияния относительного размера частиц полифракционной смеси наполнителя на уровень отрывных напряжений на границе с ГСВ был смоделирован небольшой объем топлива, подверженный одноосному деформированию. Отмечается, что рассмотрение одиночной частицы, окруженной полимером, нецелесообразно, поскольку такая модель не имитирует реальное распределение напряжений вокруг частицы. Объем представлял собой правильную бездефектную структуру СТТ, в которой все твердые части-

цы наполнителя имели гладкую сферическую форму и были расположены в объеме связующего равномерно. Для определенности задаваемых ФМХ и относительных размеров фракций в качестве материала наполнителя был выбран распространенный вариант окислителя – перхлорат аммония с характерным диапазоном размеров частиц 165...700 мкм, соответствующим применяемым на практике средним и крупным фракциям [5]. В качестве ГСВ был выбран полидивинилизопреновый каучук с соответствующими ФМХ. В моделируемой структуре СТТ расположение частиц наполнителя не хаотичное, а имеет ближний порядок, соответствующий плотной гексагональной упаковке основной фракции наполнителя [6]. Наиболее крупные зерна диаметром 700 мкм образуют трехмерную сетку, а более мелкие частицы с диаметрами 165 и 300 мкм размещены равномерно в свободном объеме между крупными, как показано на рис. 1. Соотношение объемных долей крупной и мелкой фракции составило около 5:1. Значения минимальных толщин прослоек связующего между соседними частицами приведены в табл. 1.

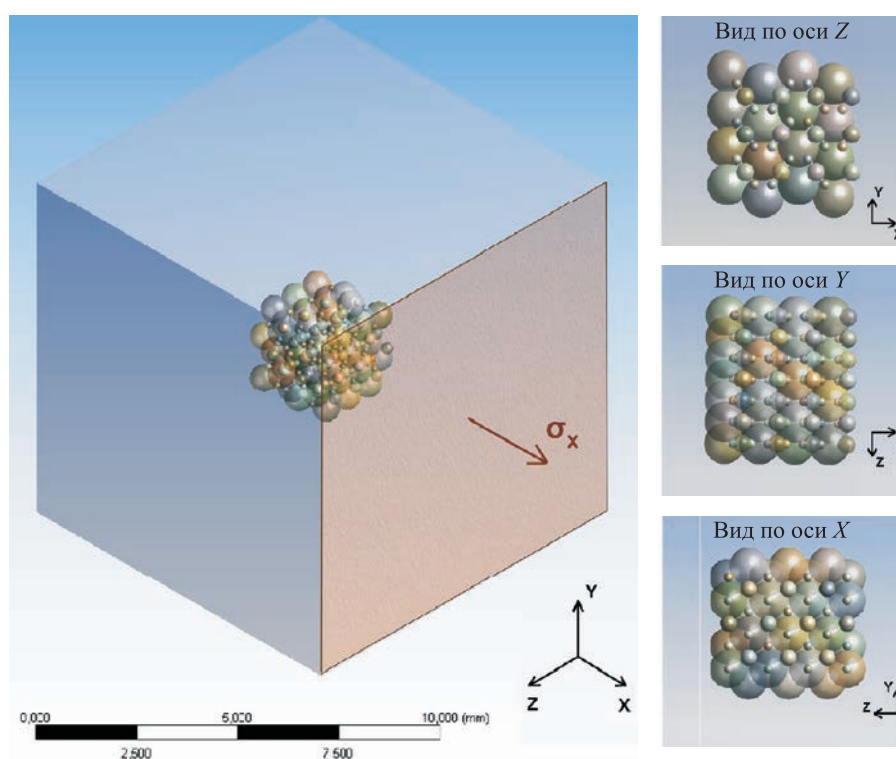


Рис. 1. Модель полифракционного СТТ, одноосное растяжение вдоль X



Таблица 1

Параметры моделируемой структуры СТТ

Диаметр частиц D , мкм	Диаметр соседних частиц, мкм	Минимальная толщина X_{\min} прослойки ГСВ, мкм	Относительная толщина прослойки X_{\min}/D
700	700	35,0	0,050
300	700	17,5	0,058
165	700	17,5	0,106

Объемная степень заполнения полимерной матрицы смоделированной структуры СТТ составила 51 %, что меньше степени заполнения реального топлива (80–85 %), однако достаточно для решения поставленной задачи получения качественной оценки. Определение конкретных значений контактных напряжений (количественная оценка) для различных фракций наполнителя СТТ не являлось целью данного исследования и не может быть вычислено в применяемой модели.

Смоделированная структура топлива представляла собой ячейку размером $2,7 \times 2,8 \times 2,9$ мм, вмещающую 167 частиц наполнителя, в том числе 56 крупных частиц. Для создания одноосного НДС она была размещена в центре полимерной матрицы ГСВ большего размера $10 \times 10 \times 10$ мм, растягиваемой по оси X на 10 % (см. рис. 1). При этом относительная деформация выделенного объема СТТ составила 1,6 %. Задача решалась в статической постановке в комплексе конечно-элементного

анализа *ANSYS Mechanical*. Для расчетной сеточной модели количество элементов составило 1 085 000, количество узлов – 1 705 000.

Результаты расчета максимального растягивающего главного напряжения σ_1^{\max} , действующего на отрыв твердой частицы от связующего, для представительной выборки частиц, находящихся в центральной части ячейки топлива, приведены в табл. 2. Расположенные на периферии частицы наполнителя не учитывались.

На рис. 2 обозначены включенные в анализ частицы и изображено распределение напряжений σ_1 на сферических поверхностях раздела «наполнитель – ГСВ». Направления векторов главных напряжений на примере крупной частицы $D1-1$ показаны на рис. 3. Красным цветом обозначены векторы растягивающего напряжения σ_1 .

Из результатов расчета следует, что величины максимальных напряжений, а также их средних значений в зонах concentra-

Таблица 2

Результаты расчета напряжений

Обозначение частицы	Диаметр D , мкм	Относительный диаметр (D/D_1)	σ_1^{\max} , МПа	Среднее σ_1^{\max} , МПа
$D1 - 1$	700	1,00	1,75	3,49
$D1 - 2$			2,14	
$D1 - 3$			4,11	
$D1 - 4$			3,84	
$D1 - 5$			3,70	
$D1 - 6$			5,40	
$D2 - 1$	300	0,43	0,47	0,59
$D2 - 2$			0,84	
$D2 - 3$			0,47	
$D3 - 1$	165	0,24	0,17	0,42
$D3 - 2$			0,53	
$D3 - 3$			0,55	

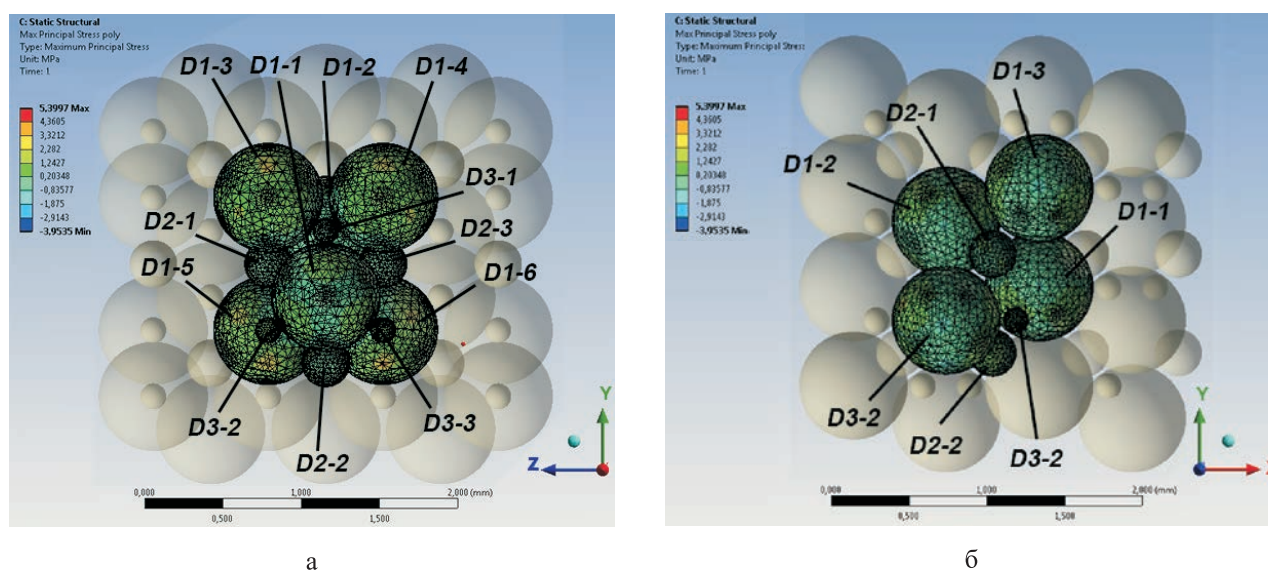


Рис. 2. Контрольная выборка частиц наполнителя, виды по осям X (а) и Z (б)

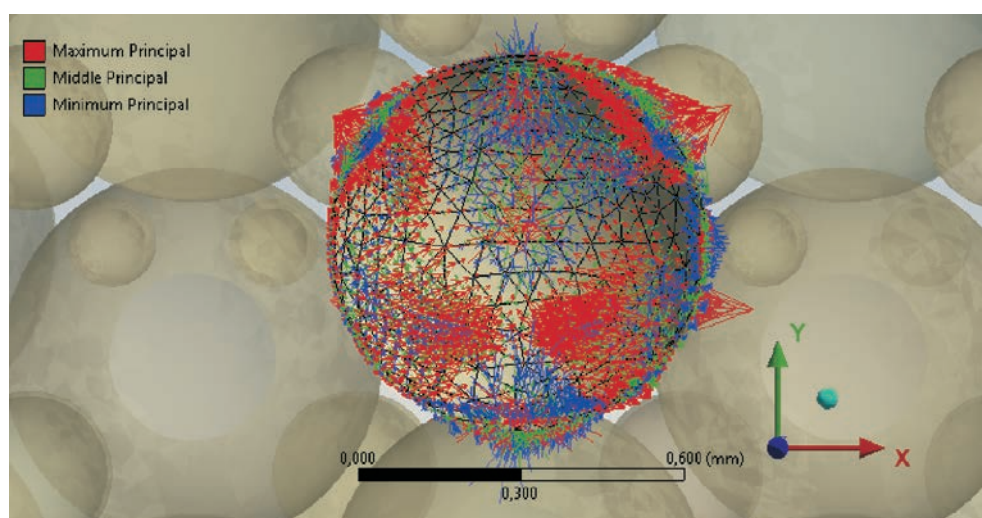


Рис. 3. Векторы главных напряжений на границе «наполнитель – ГСВ»

ции (рис. 4), для смоделированной структуры СТТ существенно зависят от относительного размера частиц в смеси наполнителя.

По мере удаления рассматриваемой частицы от центра выделенного объема СТТ к периферии уровень напряжений для частиц всех размеров возрастает, однако тенденция зависимости от относительных размеров сохраняется. Можно сделать вывод, что при условии постоянства уровня адгезии между наполнителем и связующим более крупные частицы смеси будут отслаиваться от полимерного связующего при меньших значениях растягивающих деформаций СТТ. Однако для многообразия составов СТТ с различным соотношением и

размером фракций наполнителя структура топлива и поле напряжений будут отличаться от смоделированной. Например, для описанной выше модели с уменьшением объемной доли крупной фракции D1 (от 40 % и ниже) частицы последней нельзя считать упакованными плотно. В этом случае роль определяющей максимальные отрывные напряжения может занять более мелкая, но плотно упакованная фракция. Если объемное содержание ни одной из фракций смеси не обеспечивает ее плотную упаковку (не высоконаполненные СТТ), без проведения соответствующих расчетов некорректно считать отрывные напряжения для самой крупной фракции превышающими

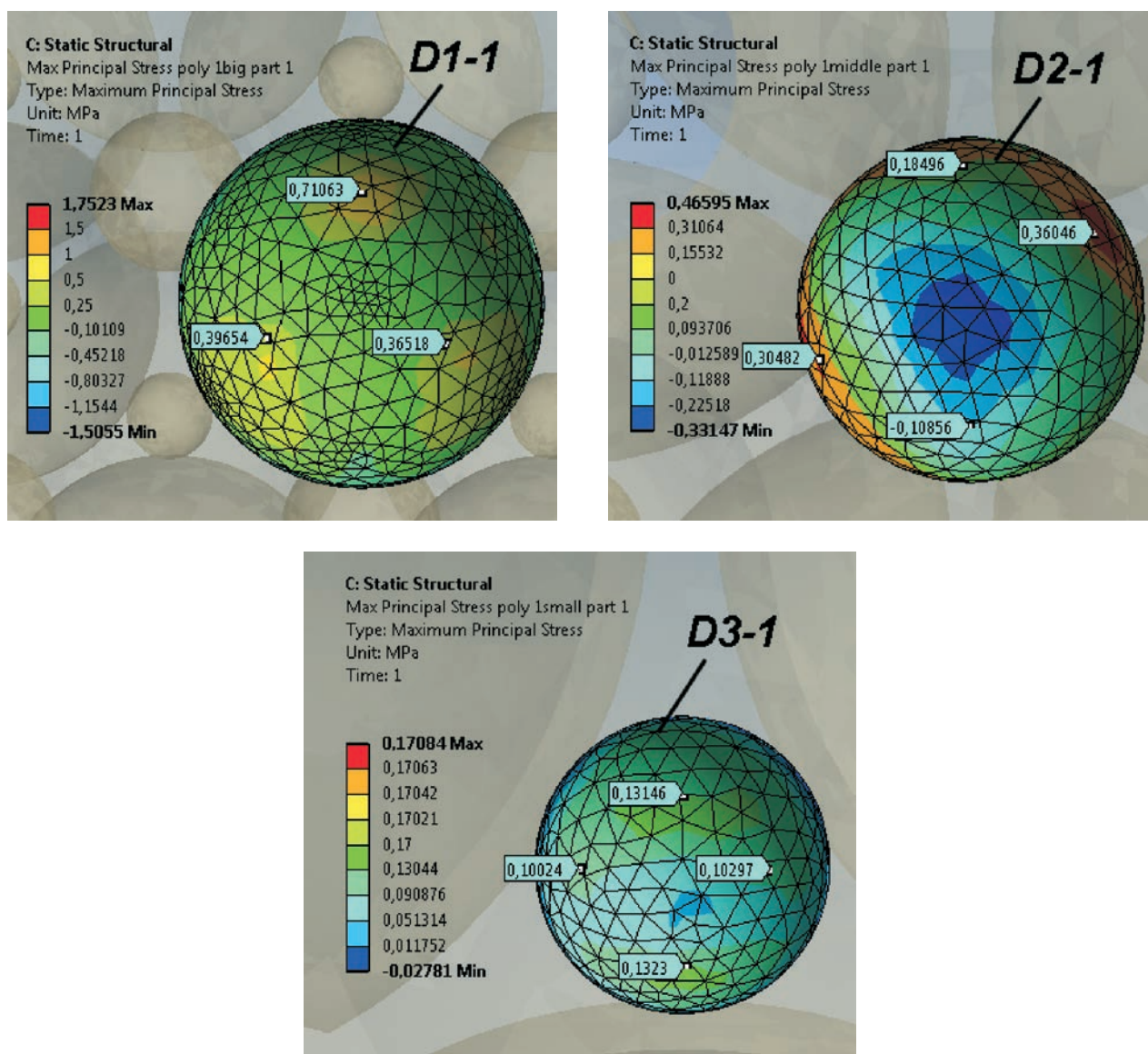


Рис. 4. Распределение напряжений σ_1^{\max} на границе «наполнитель – ГСВ»

таковые для мелких фракций. Возвращаясь к модели с максимально плотной упаковкой крупной фракции, необходимо отметить, что с увеличением объемной доли мелких частиц $D2$, $D3$ (от 10 % и выше) их плотность упаковки, очевидно, будет возрастать, как и контактные напряжения на границе с ГСВ. Однако в силу особенностей предельного наполнения СТТ [5] можно утверждать, что относительная толщина прослойки связующего (отношение ее абсолютной толщины к диаметру частицы) останется выше значения, характерного для крупной фракции, а отрывные напряжения – ниже.

При построении модели горения топлива, отражающей повышение скорости горения в условиях НДС изделия из высоконаполнен-

ного СТТ, для частиц одного типа (химического состава) наполнителя в первую очередь следует учитывать увеличение удельной поверхности горения за счет отслоения наиболее крупной фракции смеси, объемное содержание которой соответствует плотной упаковке. Аналогично, в случае наличия в СТТ полидисперсных наполнителей разных типов с существенно отличающейся адгезией к ГСВ, по каждому из них нужно учитывать возможное отслоение наиболее крупной фракции, содержащейся в количестве, обеспечивающем плотную упаковку частиц.

Список литературы

1. Langhenry M. T. The direct effects of strain on burning rates of composite solid propellants



// AIAA 20th joint propulsion conference. June 11–13, 1984. Cincinnati, Ohio. URL: <https://doi.org/10.2514/6.1984-1436> (дата обращения 20.02.2018).

2. Рашковский С. А., Милёхин Ю. М., Ключников А. Н., Федорычев А. В. Влияние растяжения смесового топлива на скорость его горения // Физика горения и взрыва. 2009. Т. 45. № 6. С. 48–56.

3. Яковина В. В., Малинин В. И. Учет деформации заряда твердого топлива при расчете внутрибаллистических параметров // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Аэрокосмическая техника. 2017. № 48. С. 16–25.

4. Кочнева Н. М., Гуляев А. В. Особенности прогнозирования прочностных свойств наполненных полимерных материалов // Вестник Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 4. С. 1463–1465.

5. Ермилов А. С. Механика смесовых твердых ракетных топлив. Пермь: ПГТУ, 2005. 101 с.

6. Решетников С. М., Фролов В. М. Современные подходы к моделированию процесса горения смесового твердого топлива // Бутлеровские сообщения. 2012. Т. 30. № 6. С. 1–25.

Поступила 21.03.18

Яковина Василий Васильевич – заместитель начальника отдела Акционерного общества «Научно-исследовательский институт полимерных материалов», аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.

Область научных интересов: рабочие процессы в ракетных двигателях на твердом топливе.

Гуляев Алексей Владимирович – начальник лаборатории Акционерного общества «Научно-исследовательский институт полимерных материалов», г. Пермь.

Область научных интересов: теория и расчет прочности изделий для ракетных двигателей на твердом топливе.

Малинин Владимир Игнатьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.

Область научных интересов: рабочие процессы в ракетных двигателях, моделирование горения ракетных топлив.



The influence of the particle size of the filler on the detachment from the binder under composite fuel tension

During operation, the fuel in case-bonded charges stretches, and at the “filler-binder” boundary tear stresses occur. In highly filled compositions, the thickness of the binder layer between the filler particles is minimal and the probability of achieving critical stress values with particle detachment is high. The structure of polyfraction fuel is modeled and the influence of the particle size of the filler on the tear stresses under static tensile load is analyzed.

Keywords: composite solid fuel, filler, particle size, detachment, binder, tear stresses, fuel deformation, burning rate.

Yakovina Vasily Vasilievich – Deputy Head of Department, Joint Stock Company Scientific “Research Institute of Polymeric Materials”, post-graduate student, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Perm National Research Polytechnic University, Perm. Science research interests: operating processes in solid-propellant rocket engines.

Gulyaev Aleksey Vladimirovich – Head of Laboratory, Joint Stock Company Scientific “Research Institute of Polymeric Materials”, Perm.

Science research interests: theory and calculation of the product strength for solid-propellant rocket engines.

Malinin Vladimir Ignatievich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Perm National Research Polytechnic University, Perm.

Science research interests: operating processes in rocket engines, propellant burning modeling.