

А.Ю.Карчин

## **Оценивание параметров разрушения блока «А» ракеты-носителя типа «Союз» на пассивном участке траектории в задаче баллистического обоснования районов падения отделяющихся частей ракет космического назначения**

*Изложены основные подходы к созданию научно-методического аппарата оценивания параметров разрушения блока «А» ракеты-носителя типа «Союз» на пассивном участке траектории, позволяющего повысить достоверность исходных данных в задаче прогнозирования координат точек падения фрагментов конструкции ракет космического назначения. Показаны основные результаты имитационного моделирования разрушения блока «А» на пассивном участке траектории.*

В Федеральной космической программе России на 2006-2015 годы, целью которой является удовлетворение растущих потребностей государственных структур, регионов, а также населения страны в космических средствах и услугах, отмечается важность практического решения экологических проблем, возникающих в результате космической деятельности<sup>1</sup>.

В настоящее время для запуска космических аппаратов (КА) заданной массы в распоряжении Федерального космического агентства и Войск воздушно-космической обороны имеются ракеты-носители (РН) типа «Союз». В состав ракеты космического назначения (РКН) входит трехступенчатая РН с комбинированной конструктивно-компоновочной схемой ракетных блоков (РБ). Отделение РБ от «уходящей» субракеты предусмотрено штатной циклограммой полета. После отделения отработавшие РБ продолжают движение по баллистической траектории и падают на Землю в специально предусмотренные для этого районы – районы падения (РП).

В настоящее время под влиянием ряда экономических и экологических факторов, в условиях континентального расположения отечественных космодромов, значимо воз-

росла актуальность повышения точности определения предполагаемых координат точек падения отделяющихся частей (ОЧ) РКН на поверхность Земли. В связи с принятием законов «О земельной реформе», «Об охране окружающей среды» возросли экономические компенсации за возмещение непреднамеренного ущерба, наносимого ОЧ РКН, при их падении на Землю, которые могут составлять от 3 до 30% от стоимости всей пусковой программы конкретного КА [1]. В результате серьезные проблемы стали возникать не только при эксплуатации штатных РП, но и при открытии новых трасс. Особую значимость вопрос полноты и достоверности информации о характеристиках РП ОЧ РКН приобретает в связи со строительством нового российского космодрома «Восточный», в условиях возникновения трудностей при резервировании земельных участков для предполагаемых РП.

Неотъемлемым элементом при решении задачи обеспечения гарантированного доступа России на стратегически важные типы орбит в космосе является вопрос баллистического обоснования трасс запусков КА и выбора РП ОЧ РКН [2]. С 2007 года решение вопроса «районов падения» приобрело статус на уровне поручения Президента РФ [3].

Поисковыми группами установлено, что при пусках РН типа «Союз» фактические тра-

1 Федеральная космическая программа России на 2006-2015 годы. Постановление Правительства Российской Федерации от 22.10.2005 г. № 635 (с изменениями от 31.03.2011 г. № 235).

ектории падения блока «А» могут существенно отличаться от расчетных [4]. Ключевым фактором, определяющим такие отклонения, является разрушение корпуса блока «А» на пассивном участке траектории (ПУТ). В случае разрушения корпуса эллипс рассеивания фрагментов конструкции блока «А» может выходить за согласованные РП, за границами которых могут быть расположены

объекты промышленной инфраструктуры, населенные пункты и места с охраняемыми государством природными территориями (рисунок 1). Кроме того, отличие прогнозируемых координат точек падения ОЧ РКН от фактических затрудняет их оперативный поиск, утилизацию, ликвидацию результатов воздействия на окружающую среду и ведет к росту материальных затрат [3].

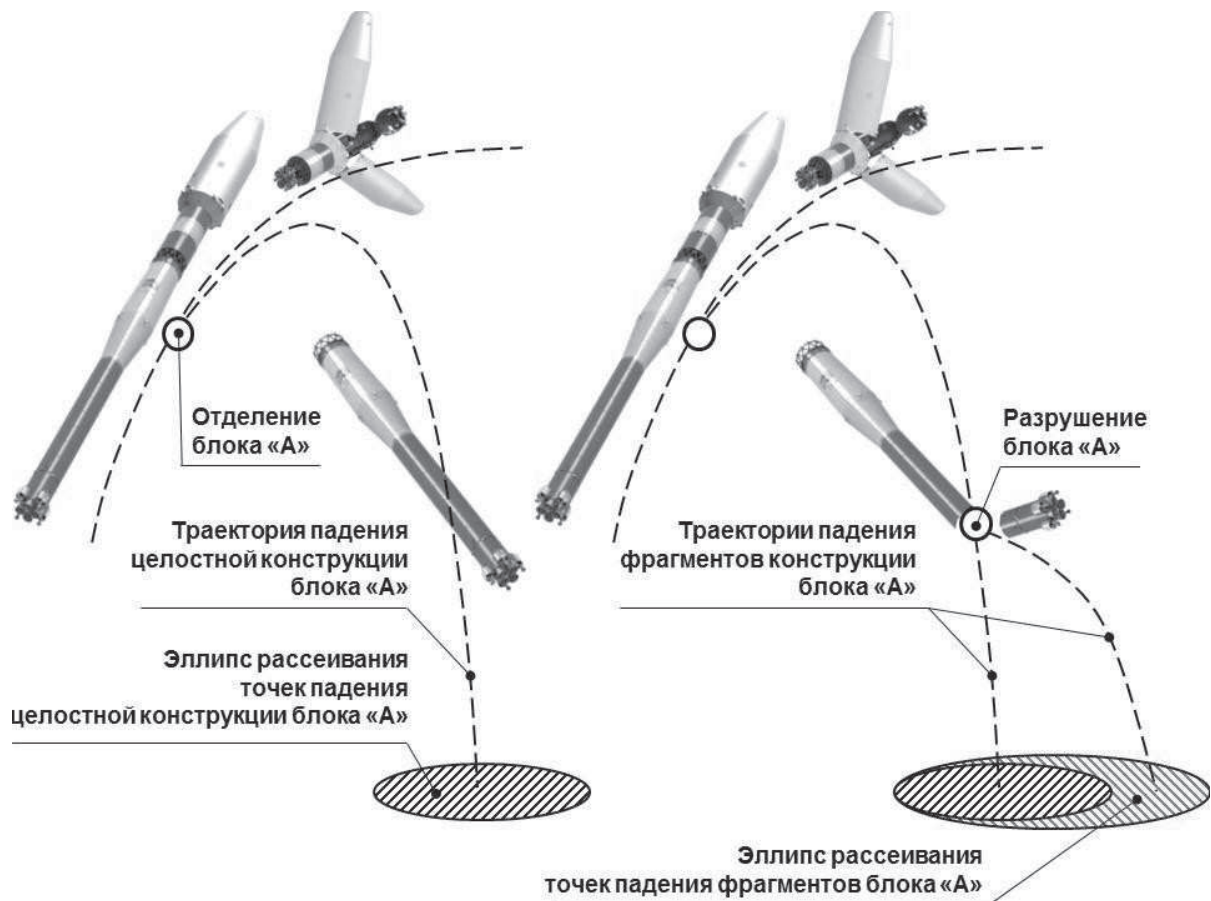


Рисунок 1 – Отклонение фактических траекторий падения от расчетных, при разрушении блока «А» ракеты-носителя типа «Союз» на пассивном участке траектории

На данный момент в баллистическом обеспечении прогнозирования РП ОЧ РКН имеются противоречия между реальным движением РБ на ПУТ и существующими способами его математического описания [5].

Данные противоречия объясняются тем, что при прогнозировании эллипса рассеивания координат точек падения, ОЧ РКН рассматриваются как целостные конструкции и не учитывается факт их возможного разрушения на ПУТ. Для разрешения указанных противоречий возникает необходимость оце-

нивания параметров разрушения ОЧ РКН на ПУТ и учет этих параметров в математических моделях движения ОЧ [3].

До конца 70-х годов считалось, что разрушение ОЧ РКН после их отделения от «уходящей» субракеты не происходит. Позднее появились работы, в которых проводилась оценка условий разрушения и предполагаемого состава фрагментов ОЧ РКН. Считалось, что разрушение корпуса ОЧ РКН на ПУТ происходит вследствие снижения прочностных свойств конструкционных материалов от

аэродинамического нагрева элементов конструкции до температуры плавления [4]. При этом не учитывались другие существенные факторы, оказывающие значительное влияние на нагружение корпуса отработавшего РБ: действие сил и моментов, определяющих напряженно-деформированное состояние корпуса ОЧ.

Оценка параметров разрушения ОЧ РКН на ПУТ с использованием методик, учитывающих только аэродинамический нагрев обечайки корпуса ОЧ, не в полной мере соответствует физическим процессам, приводящим к разрушению корпуса. Это ведет к существен-

ным ошибкам как при расчете диапазона высот, на котором может произойти разрушение корпуса ОЧ, так и при определении массово-геометрических параметров фрагментов конструкции ОЧ [4].

Анализ данных о фрагментах конструкции, найденных поисковыми группами в РП, показал, что основной причиной разрушения блока «А» РН типа «Союз» следует рассматривать превышение допустимых значений механических напряжений в условиях, когда существенного снижения прочности конструкционного материала от нагрева еще не произошло (рисунок 2) [3].

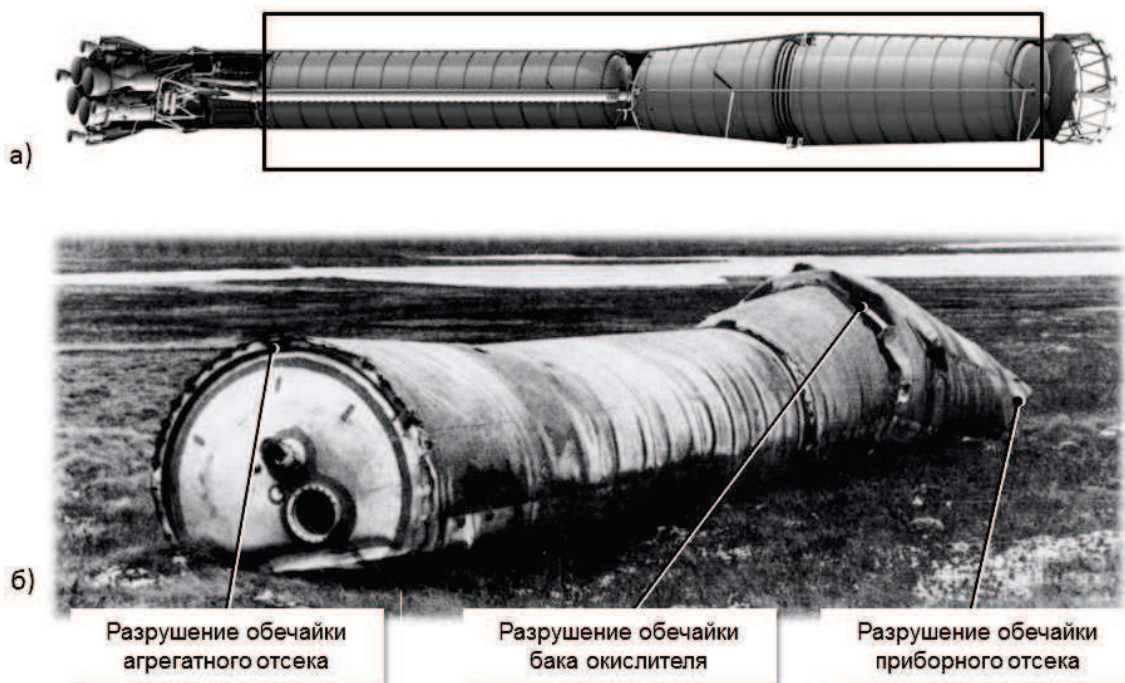


Рисунок 2 – Фрагмент блока «А» ракеты-носителя типа «Союз»: а – модель блока «А»; б – фотография фрагмента блока «А»

С целью повышения достоверности исходных данных в задаче баллистического обоснования РП фрагментов блока «А» РН типа «Союз» разработан программный комплекс прогнозирования координат точек падения фрагментов корпуса блока «А», структурная схема которого показана на рисунке 3.

В состав программного комплекса интегрирован компонент прогнозирования разрушения блока «А» на ПУТ (5), который координирует работу компонента прогнозирования параметров движения блока «А» на ПУТ (6 и

б') и обеспечивает математические модели движения оперативными исходными данными о возможной высоте разрушения и массово-геометрических параметрах образовавшихся фрагментов [3].

Работа компонента прогнозирования разрушения блока «А» на ПУТ базируется на оценивании несущей способности корпуса блока в условиях многофакторного нестационарного нагружения, блок-схема алгоритма которого показана на рисунке 4.

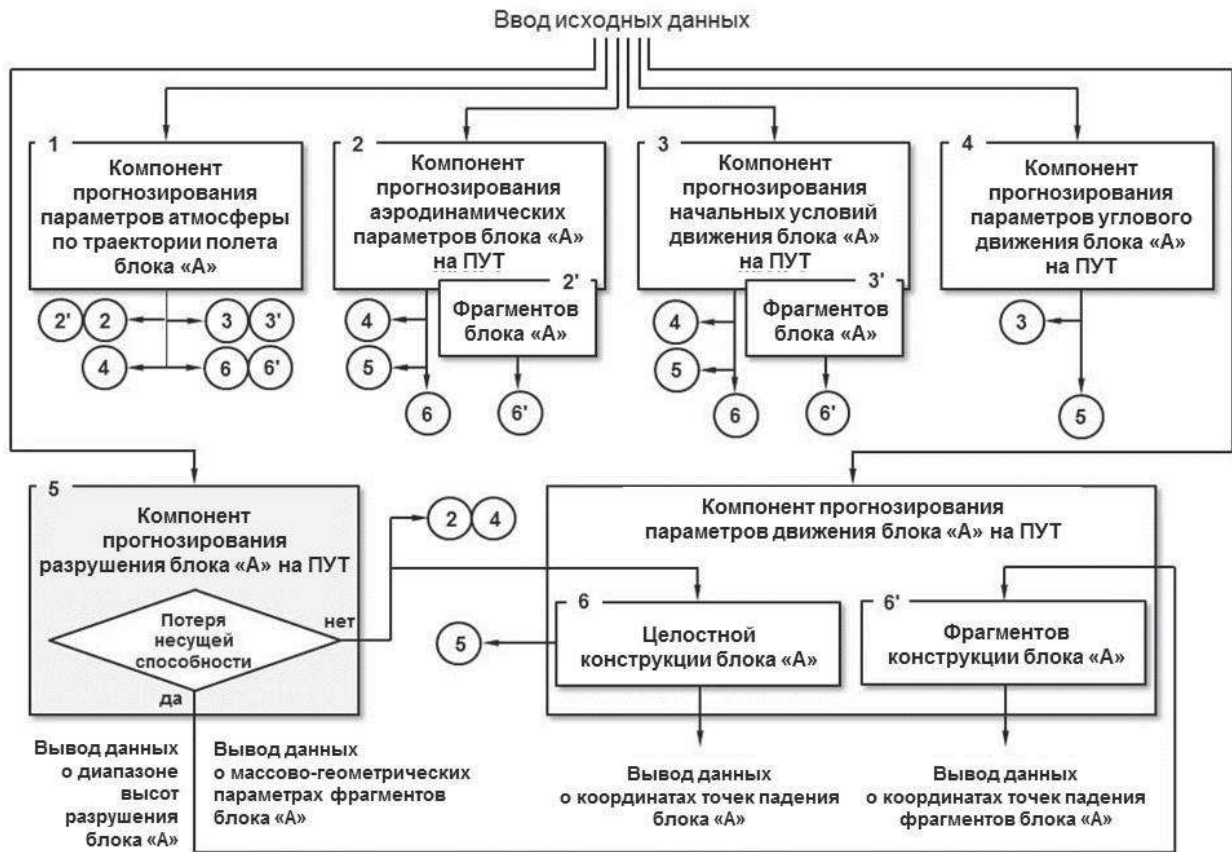


Рисунок 3 – Структурная схема программного комплекса прогнозирования координат точек падения фрагментов корпуса блока «А»

В состав алгоритма входят следующие блоки [3]:

- ввода исходных данных;
- расчета параметров нагружения корпуса блока «А»;
- оценки несущей способности корпуса блока «А»;
- вывода данных о параметрах разрушения корпуса блока «А»;

Блок ввода исходных данных использует следующие параметры:

- массовые и геометрические параметры корпуса блока «А», с учетом остатков компонентов топлива и рабочих тел;
- параметры, связанные с особенностями конструкции корпуса блока «А» и силового набора;
- параметры конструкционных материалов (ГОСТ 4784-97);
- параметры атмосферы вдоль трассы пуска (ГОСТ 4401-81; ОСТ-92-9704-95);

- параметры движения блока «А» на ПУТ, как материальной точки;
- параметры углового движения блока «А» на ПУТ, как пространственного тела;
- аэродинамические характеристики блока «А» на ПУТ;
- параметры нестационарного теплового потока, действующего на корпус блока «А» на ПУТ.

Выходными данными блока расчета параметров нагружения являются напряжения (интенсивность усилий) с учетом динамических и термических нагрузок.

Для оценки несущей способности корпуса блока «А» на ПУТ, в соответствующем блоке алгоритма, используются критерии потери несущей способности, применяющиеся в теориях прочности [6]:

$$\sigma_{\Sigma экв} \geq \varphi_{\sigma}^t [\sigma_v]_{норм}^t ; \sigma_{\Sigma экв} \geq \varphi_E^t [\sigma_{кр}]_{норм}^t , \quad (1)$$

где  $\sigma_{\Sigma экв}$  – суммарные эквивалентные напряжения, Па;

$\sigma_v$  – временное сопротивление разрушению (предел прочности), Па;  
 $\sigma_{кр}$  – критические напряжения, Па;

$\varphi_{\sigma}^t, \varphi_E^t$  – коэффициенты, характеризующие изменение допустимых напряжений при изменении температуры.

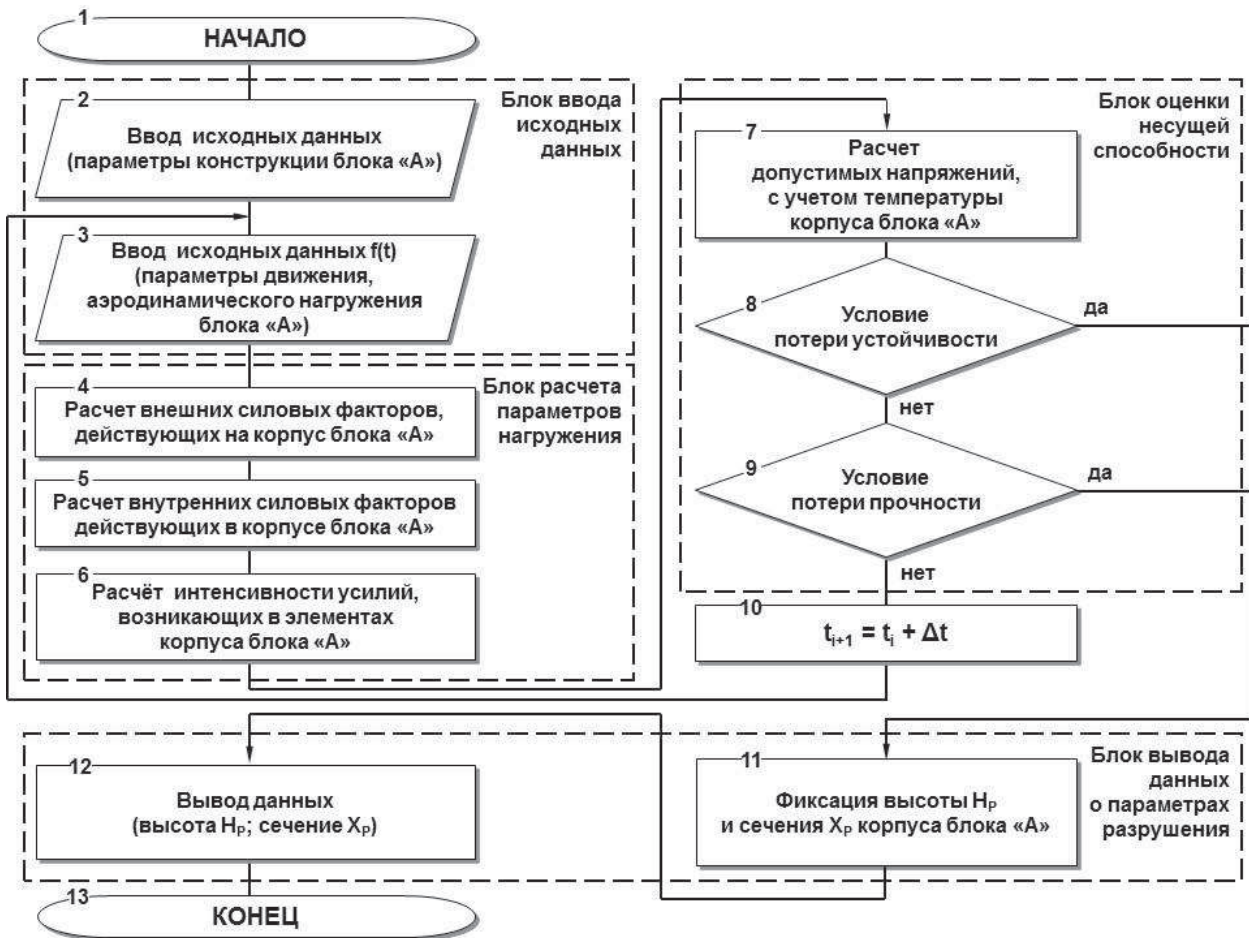


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма оценивания несущей способности корпуса блока «А» на пассивном участке траектории

Значения суммарных эквивалентных напряжений определяются согласно IV теории прочности (энергетической теории), широко применяемой для пластичных материалов. Согласно этой теории, причиной наступления предельного напряженного состояния является величина удельной потенциальной энергии деформации [7].

Значения критических напряжений, которые характерны для каждого элемента конструкции и зависят от особенностей как самого элемента, так и способа его нагружения, определяются с помощью априорных методов расчета, с использованием выражений, полученных эмпирическим путем.

Если условия потери устойчивости и прочности (1) не выполняются, то на последу-

ющем шаге интегрирования происходит ввод новых исходных данных  $f(t)$ . Если условия потери устойчивости и прочности (1) выполняются, то фиксируется высота разрушения и сечение корпуса блока «А», в котором произошла потеря несущей способности. Выходными данными блока являются:

- высота разрушения корпуса блока «А»;
- сечение корпуса блока «А».

Имитационное моделирование разрушения блока «А» РН типа «Союз» на ПУТ проведено с использованием системы MATLAB. В ходе расчетов получены значения суммарных эквивалентных напряжений, возникающих в характерных сечениях конструкции блока «А» (рисунок 5) [7].

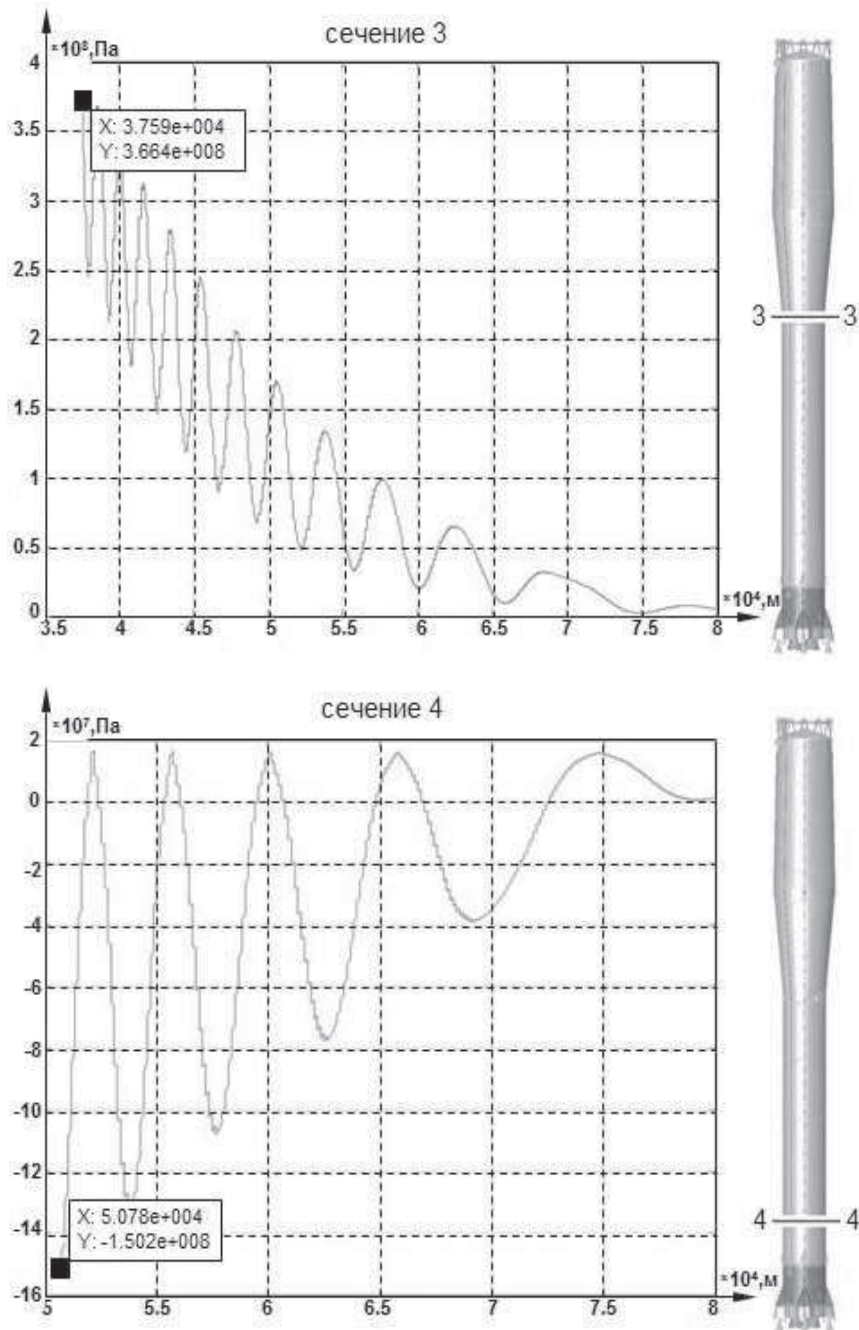


Рисунок 5 – Результаты имитационного моделирования разрушения блока «А» РН типа «Союз» на пассивном участке траектории

На графиках зафиксированы высоты (значения  $X$ ), на которых суммарные эквивалентные напряжения (значения  $Y$ ) превышают значения допустимых.

Диапазон высот  $\Delta H$  разрушения корпуса блока «А» на ПУТ получен на основе имитационного моделирования разрушения блока «А» на ПУТ, в условиях многофакторного нестационарного нагружения, с учетом разброса начальных условий движения блока «А» на

ПУТ [8]. В ходе имитационного моделирования проведено 1000 «пусков» (рисунок 6).

Полученные параметры разрушения корпуса блока «А» РН типа «Союз» – диапазон высот разрушения и массово-геометрические параметры фрагментов конструкции, являются исходными данными для баллистических расчетов, позволяющие повысить достоверность информации о характеристиках РП ОЧ РКН.

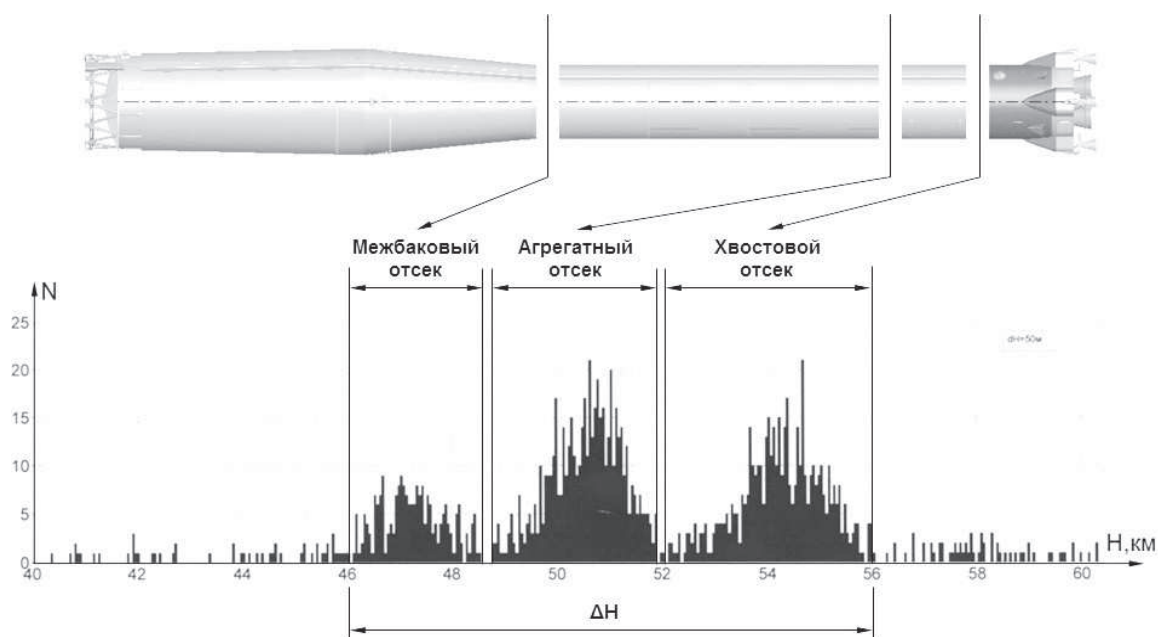


Рисунок 6 – Гистограмма диапазона высот разрушения блока «А» РН типа «Союз» на пассивном участке траектории

Сравнительный анализ результатов имитационного моделирования и материалов, предоставленных поисковыми группами с

мест падения блока «А», свидетельствует об адекватности пути решения задачи и достоверности полученных результатов.

#### Список использованных источников

1. Аверкиев Н.Ф., Булекбаев Д.А. Метод поиска оптимальной программы движения ракет-носителей для минимизации площади рассеивания отделяемых частей // Изв. ВУЗов. Приборостроение. – 2013. – Т. 56. – № 7. – С. 10-12.
2. Булекбаев Д.А. Проблемные вопросы баллистического обоснования районов падения отделяющихся частей ракет космического назначения и пути их разрешения // Вооружение и экономика.– 2013. – № 4 (25). – С. 20-25.
3. Булекбаев Д.А., Богачев С.А., Кубасов И.Ю., Полуаршинов А.М. Методика определения характеристик районов падения отделяющихся частей ракет-носителей с учетом разрушения отделяющихся частей оперативных данных о состоянии атмосферы // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, № 635. – СПб.: ВКА им. А.Ф.Можайского, 2012. – С. 14-17.
4. Овчинников А.Ф., Куреев В.Д., Сергеев С.А. Перспективы ракетно-космической деятельности космодрома в Архангельской области в направлении повышения безопасности и экологии. – 1-й ГИК МО РФ, 1995. – 45 с.
5. Комплексная методика расчета характеристик районов падения отделяющихся частей ракет-носителей с учетом их фрагментации на участке спуска и факторов безопасности. – ФГУП «ЦНИИмаш», ФГУП «ЦЭНКИ», 2011. – 181 с.
6. Волчков О.Д. Прочность ракет-носителей: учебное пособие. Ч.1. – М.: Изда-тельство МАИ, 2007. – 784 с.
7. Погорелов В.И. Строительная механика тонкостенных конструкций. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 528 с.
8. Карчин А.Ю. Прогнозирование высоты разрушения отделяющихся частей ракет-носителей в задаче повышения безопасности эксплуатации районов падения // Сборник трудов XXX науч.-практич. конференции космодрома «Плесецк». – 1-й ГИК МО РФ, 2014. – С. 191-197.