

РАЗРАБОТКА И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЁТЫ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО ГАММА-ТЕЛЕСКОПА

М.В. Пустобаев, Ф.Х. Енгальчѳв,
И.А. Мещихин, С.В. Чеботарѳв
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Представлены материалы по разработке и предварительным расчѳтам конструкции космического гамма-телескопа «Гамма-400» с применением современных материалов. С учѳтом требований заказчика были разработаны два варианта конструкции. Для лѳтного варианта конструкции выполнен расчѳт на прочность и жѳсткость. Показано, что конструкция удовлетворяет всем предъявляемым требованиям.

Ключевые слова: космический аппарат, гамма-телескоп, компоновка, сотовые панели, детекторы, углепластиковые стержни, расчѳт на прочность, анализ собственных частот, численное моделирование.

Вопрос о природе «тѳмной материи» в Галактике – наиболее актуальный в современной астрофизике. Одна из широко обсуждаемых теорий предполагает, что «тѳмная материя» формируется пока ещѳ не обнаруженными частицами (нейтралино), существование и свойства которых предсказывает теория суперсимметрии. В этом случае при взаимодействии двух нейтралино может происходить их аннигиляция с испусканием двух моноэнергетических гамма-квантов с энергией более сотен ГэВ. Регистрация такого рода гамма-линий подтвердит, с одной стороны, правильность теории суперсимметрии, а с другой, продвинет отечественную и мировую науку в решении вопроса о природе «тѳмной материи».

Регистрация гамма-излучения космического происхождения предоставит уникальные возможности исследования процессов, происходящих на удалѳнных астрономических объектах при высоких и сверхвысоких энергиях.

Задача является достаточно сложной, и в еѳ решении участвуют ряд отечественных и зарубежных организаций, таких как ФИАН, МИФИ, Институт физики высоких энергий, Istituto Nazionale di Fisica Nuclaeare, Sezioni di Roma 2 и другие. Полный список организаций, взаимодействующих в рамках проекта, а также физические процессы, лежащие в основе работы телескопа, изложены в [1].

Запуск телескопа планируется в 2015 – 2016 гг.

Проводившиеся до настоящего времени прямые измерения космического гамма-излучения внеатмосферными обсерваториями ограничивались энергиями не более 30 – 50 ГэВ (программы Анна-3 [2], SAS-II [3], COS-B [4], ГАММА-1 [5], EGRET [6], AGILE [7]). В то же время есть основания полагать, что измерения в области больших энергий (вплоть до 1 ТэВ) дадут возможность получить информацию по ряду ещѳ не решѳнных вопросов.

Гамма-телескоп «Гамма-400» предназначен для исследования в диапазоне энергий 30 – 1000 ГэВ дис-

кретных источников высокоэнергетического гамма-излучения (остатков сверхновых, пульсаров, чѳрных дыр, молекулярных облаков и т. д.), измерения энергетических спектров галактического и внегалактического диффузного гамма-излучения, исследования гамма-всплесков, приходящих из космического пространства, гамма-излучения активного Солнца. Гамма-телескоп имеет угловое разрешение ~0,02 град и энергетическое разрешение ~1%. Специальная задача – изучение потоков гамма-излучения, электронов и позитронов, которые могут быть связаны с аннигиляцией или распадом частиц тѳмной материи.

На этапе эскизного проектирования ФГУП «НПП ВНИИЭМ» разработал конструкцию космического телескопа по исходным данным, полученным от ФИАН, МИФИ, а также от разработчика ракетно-носителя: количество детекторов, их размеры, требования по точности, жѳсткости и массе конструкции. Детекторы представляют собой электронные блоки, не являющиеся самостоятельными несущими конструкциями.

В настоящей статье рассмотрены варианты конструкции гамма-телескопа.

Гамма-телескоп представляет собой ряд детекторов, расположенных последовательно один над другим, каждый из которых имеет свое поле зрения и электронику (рис. 1).

Параметры детекторов представлены в табл. 1. Как видно из табл. 1, в телескопе находятся два детектора с массой не менее 400 кг – КК1 и КК2, что с учѳтом перегрузок влечѳт за собой необходимость значительного усиления конструкции. Общая масса детекторов близка к 1200 кг.

Наиболее важными среди выдвинутых заказчиком требований являются следующие:

- размещение всего состава аппаратуры с обеспечением доступа к детекторам в собранном виде;
- обеспечение температурного режима работы аппаратуры;

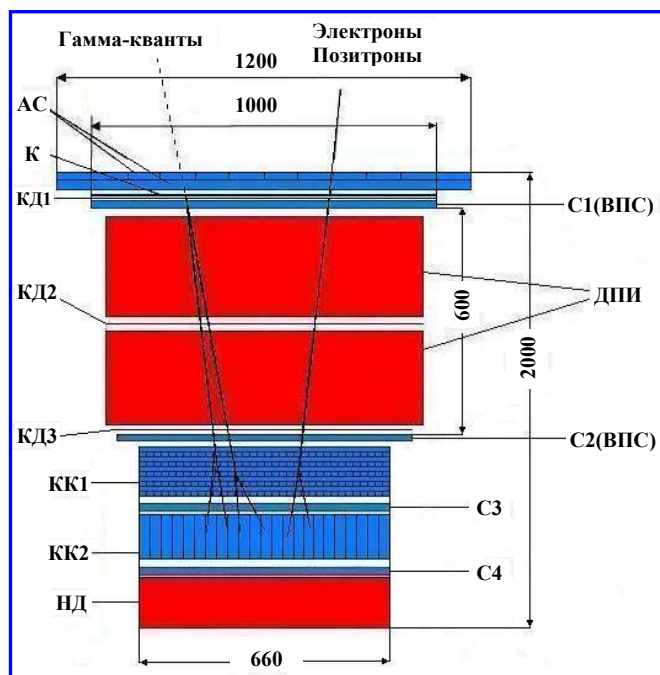


Рис. 1. Физическая схема расположения детекторов

– использование современных материалов и технологий с целью минимизации массы конструкции (не более 1700 кг);

– минимальная стоимость изготовления при выборе того или другого варианта конструктивного решения.

Варианты конструкции телескопа

Изначально в качестве основы конструкции телескопа рассматривался металлический каркас. Однако в связи с превышением допустимой массы этот вариант был определён как лабораторный и предназначен для наземных испытаний телескопа.

Конструкция лабораторного варианта представляет собой совокупность металлических рамок, каждая из которых является несущей для своего детектора. Рамки устанавливаются одна на другую с помощью пазов и выступов и по углам стягиваются шпильками.

В боковой поверхности рамок делаются окна, которые обеспечивают вывод электроники и снижают избыточный запас прочности и массу рамок.

Таблица 1

Массы и энергопотребление детекторов гамма-телескопа с блоками электроники

Детекторы	Размер, мм	Потребление, Вт	Масса, кг
Сцинтилляционный антисовпадательный детектор (АС)	1300 × 1300 × 40	30	65
Конвертор (К)	1000 × 1000 × 3	0	60
Координатный (стриповый) (X, Y)-детектор КД1 и КД2	1100 × 1100 × 4	40	1,71 1,43
КД3	1000 × 1000 × 4	25	1,13
Времяпролётная система (ВПС) Сцинтилляционный детектор (С1) Детектор (С2)	1300 × 1300 × 20 1100 × 1100 × 20	20 20	25 18
Детектор переходного излучения (ДПИ) ДПИ1 ДПИ2	1000 × 1000 × 300 950 × 950 × 300	5 5	25 25
Координатно-чувствительный калориметр (КК) Модуль КК1 Модуль КК2	860 × 860 × 300 750 × 750 × 425	150 150	400 450
Времяпролётная система (ВПС) Сцинтилляционный детектор (С3), (С4)	1000 × 1000 × 50	50	36
Нейтронный детектор (НД)	1000 × 1000 × 200	50	72

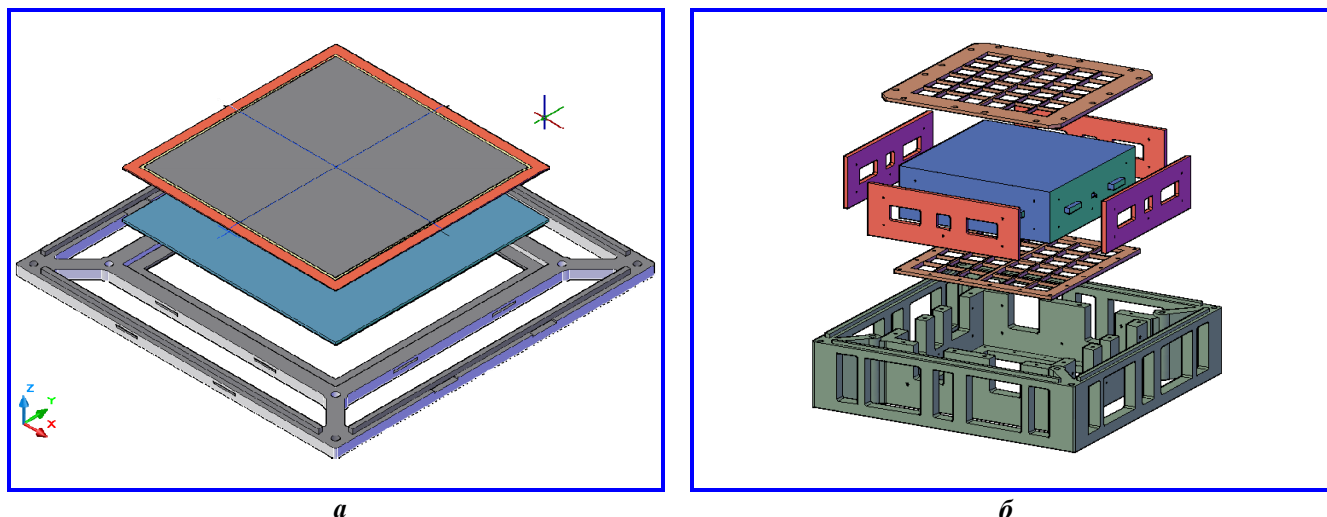


Рис. 2. Блок детектора: а – КДЗ; б – КК1 до сборки

Каждый детектор (за исключением детекторов КК1 и КК2) прикрепляется к сотовой панели (СП) и опирается на металлическую подложку, которая является частью рамки. СП в данном случае служат для передачи распределённой нагрузки на металлическую рамку, а также для обеспечения температурного режима. Примеры детекторов представлены на рис. 2. Детекторы КК1 и КК2 дополнительно усилены титановой сеткой.

Так как каждая рамка опирается на предыдущую, вертикальная нагрузка передается через эти рамки непосредственно к основанию.

Доступ к разъёмам осуществляется через отверстия в рамках детекторов. Оценочная суммарная масса телескопа составляет 2230 кг. Компоновка представлена на рис. 3, а.

Оценочная масса лабораторного варианта конструкции не удовлетворяла требованиям заказчика по общей массе телескопа (1700 кг), в связи с чем было принято решение о разработке нового варианта конструкции, обладающего меньшей массой и при этом способного выдерживать заданные нагрузки. В основу лётного варианта были положены материалы с высокой удельной прочностью. В качестве таких материалов были выбраны СП и стержни из углепластика. СП содержат тепловые трубы, поэтому в данной конструкции СП обеспечивают одновременно и несущую способность, и отвод тепла от детекторов.

Конструкция представляет собой каркас, состоящий из восьми углепластиковых стержней, пятнадцати горизонтальных СП, восьми больших боковых СП (через отверстия в которых осуществляется доступ к разъёмам детекторов) и двенадцати

малых боковых СП. При этом четыре стержня располагаются по внешнему контуру и проходят по всей высоте конструкции, а другие четыре поддерживают шесть нижних СП (рис. 3, б).

Каждый детектор прикрепляется к горизонтальной СП. Горизонтальная СП имеет отверстия, через которые соединяется с углепластиковыми трубами, а также проставки, которые обеспечивают уменьшение напряжений в стержнях при передаче продольного усилия за счёт увеличения площади опор. При этом каждая горизонтальная СП прикрепляется к четырём большим боковым СП с помощью винтов, что обеспечивает жёсткость конструкции.

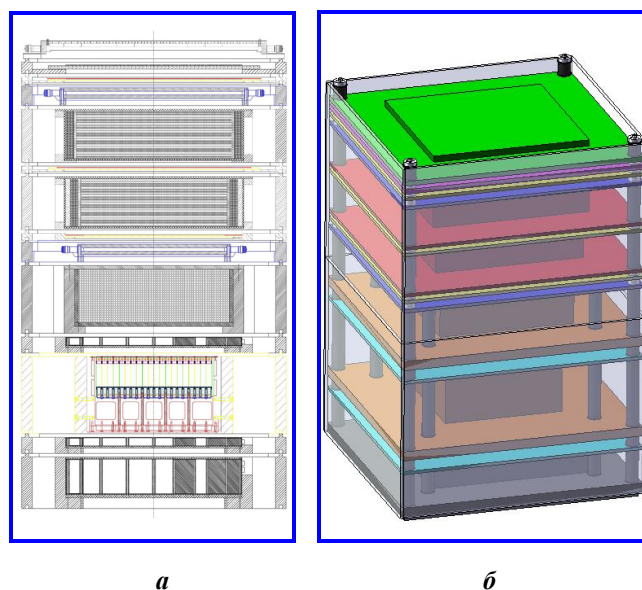
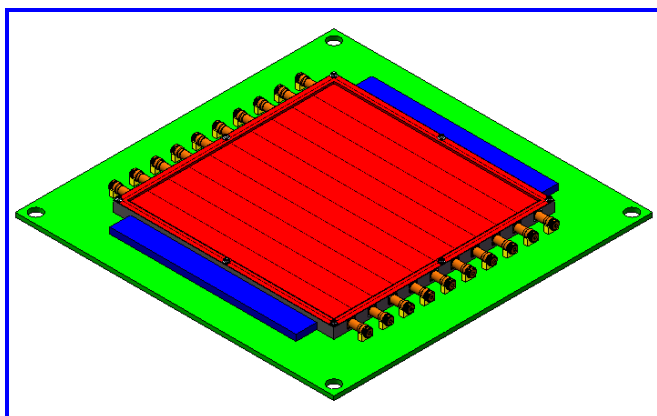
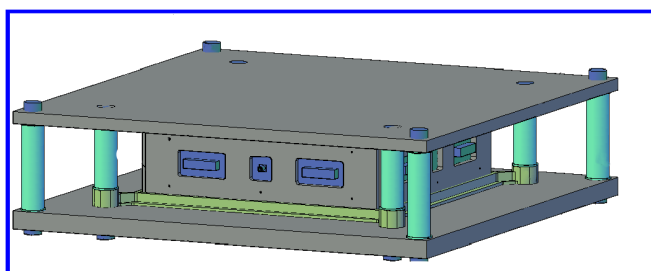


Рис. 3. Варианты компоновки: а – лабораторный; б – лётный



а



б

Рис. 4. Конструкция блоков детекторов телескопа лётного варианта: а – блок детектора С1; б – блок детектора КК1 с дополнительной алюминиевой рамой

СП в данном случае служат для передачи нагрузки, а также для обеспечения температурного режима. Примеры блоков представлены на рис. 4. В табл. 2 представлено сравнение вариантов конструкций.

Таблица 2

Сравнение вариантов конструкций телескопа

Вариант	Масса, кг	Габариты, мм	Массовая доля полезной нагрузки* по отношению к массе конструкции телескопа
Лабораторный	2232	1500 × 1500 × 2390	58%
Лётный	1700	1580 × 1580 × 2273	75%

* Под полезной нагрузкой понимается научная аппаратура и электроника детекторов гамма-телескопа, а также система ориентации телескопа.

По сравнению с лабораторным вариантом доля массы полезной нагрузки по отношению к массе телескопа у лётного варианта выше на 17% (см. табл. 2), что позволяет при одинаковом значении предельной массы телескопа разместить большее количество научной (целевой) аппаратуры.

Конструкция лётного варианта предусматривает неперекрывание полей обзора детекторов за счёт использования СП и отсутствия дополнительных элементов в полях зрения детекторов.

После разработки конструкции гамма-телескопа проведены прочностной и тепловой анализ для подтверждения его несущей и теплопроводящей способности.

Тепловой анализ был проведён в ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» и в настоящей статье не рассматривается.

Предварительные расчёты конструкции и определение собственных частот

При расчёте на прочность были определены параметры несущих СП (толщины) блоков детекторов телескопа. В ФГУП «НПП ВНИИЭМ» была проведена предварительная оценка толщин сотовых панелей для каждого детектора.

Окончательные параметры СП определялись их производителем – ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» – с учётом компоновки и исходных данных (распределение массы по площади панели, условия закрепления), предоставленных ФГУП «НПП ВНИИЭМ».

В расчёте не учитывается наличие в СП тепловых труб (их введение в дальнейшем приведёт к увеличению несущей способности СП).

На рис. 5 приведены расчётная схема конструкции телескопа и пример рассчитанной СП142 (картины распределения напряжений по слоям, первые собственные формы колебаний), использующихся в рассматриваемом изделии. Сотовая панель СП142 имеет следующие характеристики: толщина обшивок 0,7 мм; толщина сотового заполнителя 25,4 мм.

Выбор параметров СП производился из условия прочности при перегрузке 10g при запуске телескопа (поперёк плоскости СП). Такая нагрузка с запасом перекрывает статические и динамические воздействия на телескоп.

Были рассчитаны самые худшие случаи нагружения СП типовых размеров, и выявлен минимальный запас прочности (без учёта вклада тепловых труб и жёсткости боковых СП). Конструкция удовлетворяет требованиям по прочности.

Расчёт жёсткости (определение собственных частот)

В программном комплексе Patran/Nastran выполнен расчёт собственных частот конструкции телескопа для случаев с обшивкой СП по боковым сторонам и без неё.

По результатам расчёта выбраны параметры СП обшивки, позволяющие обеспечить значение низших собственных частот более 25 Гц в поперечном направлении и 40 Гц в продольном направлении (рис. 6).

Видно, что при отсутствии боковых СП конструкция не является жёсткой (частота 8,46 Гц в поперечном и 31,6 Гц в продольном). Частоты же конструкции с боковыми панелями с запасом превышают требуемые значения.

В целом, можно сделать вывод, что конструкция с боковыми СП удовлетворяет требованиям по прочности и жёсткости.

Эта конструкция была принята для лётного варианта.

Выводы

Конструкция блока каждого детектора обеспечивает неперекрывание полей обзора детекторов, безопасный вывод электроники на боковую поверхность каркаса через отверстия в СП.

Конструкции блоков двух тяжёлых детекторов КК1 и КК2 содержат специальные крепёжные элементы для обеспечения несущей способности и поперечной устойчивости каркаса.

Масса конструкции не более 1700 кг при общей суммарной массе детекторов, электроники и датчиков 1290 кг, что удовлетворяет предъявленным к конструкции жёстким требованиям по массе.

Конструкция гамма-телескопа обеспечивает тепловой режим, удовлетворяет требованиям по точности и технологичности (обеспечен свободный доступ к детекторам в собранном состоянии телескопа через отверстия в боковых СП).

Тепловые СП, входящие в состав несущей конструкции блоков детекторов, обеспечивают одновременно несущую функцию и тепловой режим.

Использование современных материалов с высокой удельной прочностью: стержней из углепластика и СП – позволяет увеличить массовую долю научной (целевой) аппаратуры с 58 до 75% и, соответственно, увеличить экономический эффект от её использования при эксплуатации телескопа.

Эскизный проект телескопа был защищён в ФКА и передан другим исполнителям.

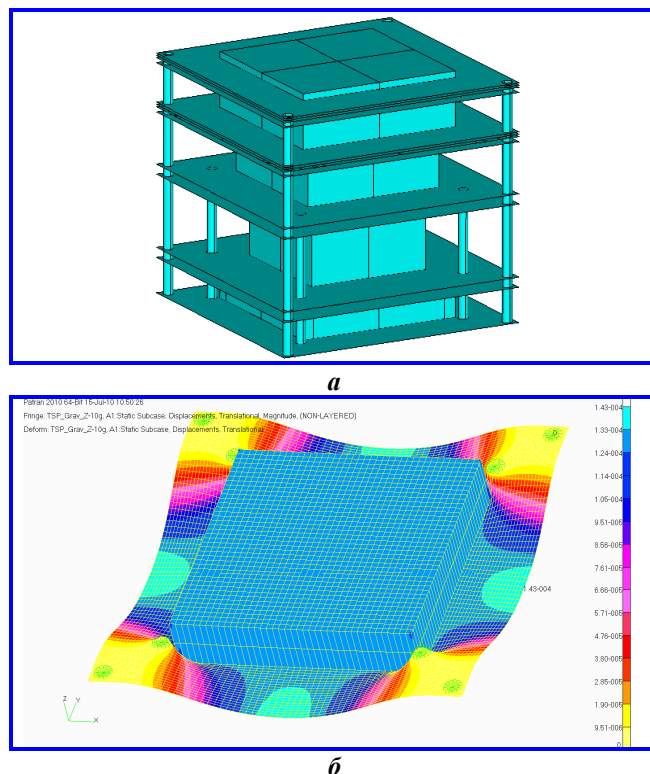


Рис. 5. Расчётная схема конструкции телескопа (а) и пример рассчитанной панели (б)

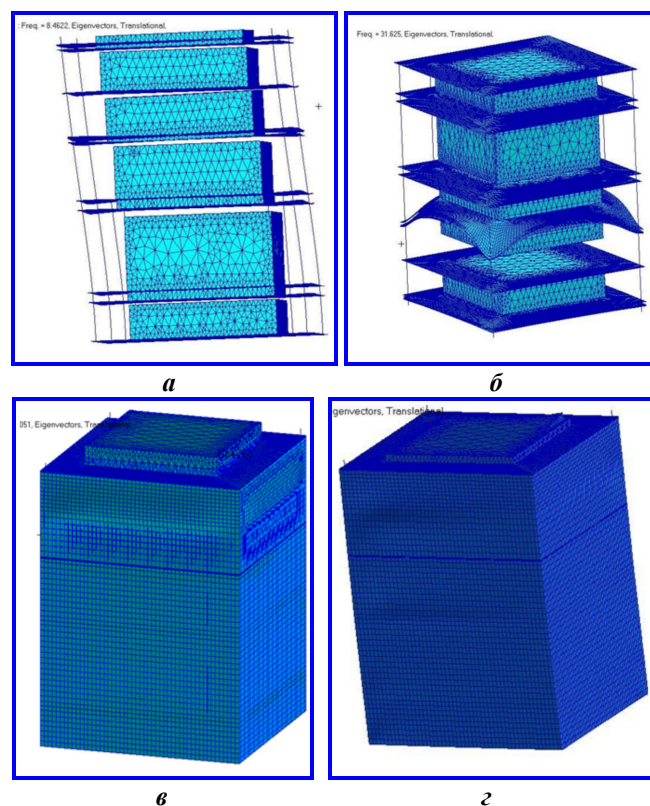


Рис. 6. Собственные формы колебаний телескопа с боковыми панелями и без боковых сотовых панелей: а – $f=8,46$ Гц (поперечное); б – $f=31,6$ Гц (продольное); в – $f=63,05$ Гц (продольное); г – $f=83,61$ Гц (поперечное)

Литература

1. Научные задачи и современное состояние проекта ГАММА-400 / И. В. Архангельская, А. М. Гальпер, М. Боецио [и др.] // 31-я Всероссийская конференция по космическим лучам. – М., 2010. – 5 с.
2. Исследование первичного гамма-излучения с $E > 200$ МэВ на ИСЗ с помощью искровой камеры / С. А. Волобуев, А. М. Гальпер, В. Г. Кириллов-Угрюмов [и др.] // Известия АН СССР. Серия физическая. – 1970. – Т. 34. – № 11. – С. 2259 – 2264.
3. High-energy gamma-ray results from the second small astronomy satellite / С. Fichtel [et. al.] // The Astrophysical Journal. – 1975. – Vol. 198. – P. 163 – 182.
4. The COS-B experiment for gamma-ray astronomy / G. Bignami [et. al.] // Space Science Instrument. – 1975. – Vol. 1. – P. 245 – 268.
5. Determination of the characteristics of the gamma-ray telescope GAMMA-1 / V. Akimov [et. al.] // Space Science Reviews. – 1988. – Vol. 49. – P. 125 – 138.
6. The project EGRET (Energetic Gamma-Ray Experiment Telescope) on NASA's gamma-ray observatory GRO / G. Kanbach [et. al.] // Space Science Reviews. – 1988. – Vol. 49. – P. 69 – 84.
7. The AGILE space mission / M. Tavani [et. al.] / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2008. – Vol. A588. – P. 52 – 62.

Поступила в редакцию 21.01.2011

Михаил Викторович Пустобаев, мл. научн. сотрудник, т. (495) 366-54-24,
e-mail: Mikhail.pustobaev@gmail.com.

Филипп Хусаинович Енгальчѐв, инженер, т. (495) 366-33-61, e-mail: engal86@gmail.com.

Илья Александрович Мешихин, инженер, т. (495) 366-33-61, e-mail: mefict@mail.ru.

Сергей Владимирович Чеботарѐв, инженер, т. (495) 366-54-24, e-mail: na4enay@mail.ru.