

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПЯТОГО АТМОСФЕРНОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО ТЕЛЕСКОПА

А. В. Шайковский^{1,}, А. Н. Бородин^{1,2},
Д. П. Жуков³*

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

³ Научно-исследовательский институт прикладной физики
Иркутского государственного университета, Иркутск, Россия

В УНУ «Астрофизический комплекс МГУ–ИГУ» в Тункинской долине (Республика Бурятия) в составе эксперимента TAIGA с весны 2022 г. работают три атмосферных черенковских гамма-телескопа (АЧТ), четвертый телескоп готовится к вводу в эксплуатацию. Такие телескопы являются основными инструментами наземной гамма-астрономии высоких энергий, позволяющими отделять события гамма-квантов от событий заряженных частиц космических лучей.

Имеющиеся четыре телескопа реализованы на базе конструкции телескопов HEGRA, разработка которых велась в 1980-х гг., и на данный момент являются морально устаревшими с точки зрения конструкторских решений.

Представлен обзор проведенной технической модернизации пятого черенковского телескопа. Показана возможность замены определенных узлов телескопа готовыми изделиями, производимыми серийно, с заданными показателями качества, гарантийными и назначенными ресурсами и сроками службы.

Также описаны введенные изменения не только для механической части телескопа, но и для его подсистем, в частности системы обогрева зеркал и светозащитных бленд.

Since spring 2022, three atmospheric Cherenkov gamma-ray telescopes (AGT) have been operating as part of the TAIGA experiment at the MSU–ISU Astrophysical Complex in the Tunka Valley (Republic of Buryatia). Such telescopes are the main instruments of ground-based high-energy gamma-ray astronomy, allowing gamma-quanta events to be separated from events caused by charged particles of cosmic rays.

The four existing telescopes are based on the design of the HEGRA telescopes, which were developed in the 1980s and are currently obsolete in terms of design solutions.

The article presents an overview of the technical modernization of the fifth Cherenkov telescope. It shows the possibility of replacing certain components of the telescope with finished products manufactured in series, with specified quality indicators, warranty and assigned resources and service life.

* E-mail: Shaikovskiy@jinr.ru

The changes introduced are also described not only for the mechanical part of the telescope, but also for its subsystems, in particular the mirror heating system and light-protective hoods.

PACS: 29.40.Ka; 95.55.Vj

ВВЕДЕНИЕ

Оптическая конструкция, принятая в большинстве современных черенковских телескопов, представляет собой рефлектор, построенный по схеме Дэвиса–Коттона [1]. Механическая конструкция черенковских телескопов сложна, если учитывать большие апертуры и необходимость поддержки большого массивного блока детекторов в главном фокусе. Сочетание веса и простоты привели к использованию альт-азимутальных типов монтаровок для всех современных черенковских телескопов [2].

Требования к жесткости конструкции крепления оптических элементов и камеры решены двумя способами: либо методом «грубой» постройки черенковского телескопа из стальной пространственной рамы (например, в случае телескопов H.E.S.S. [3, 4] и VERITAS [5, 6]), либо путем использования легкой карбоновой рамы в сочетании с активной системой регулировки зеркал (в случае MAGIC) [7, 8].

От черенковского телескопа также требуется точное отслеживание, обычно с точностью до нескольких угловых минут. Положение телескопа отслеживается энкодерами (обычно оптическими, с разрешением в угловые секунды).

Черенковские телескопы также должны иметь возможность как можно быстрее наводиться на новые цели. Телескопы MAGIC весом 40 т и диаметром 17 м, например, способны перемещаться для наблюдения за любым положением на небе в течение 40 с. Это требование продиктовано изменчивым характером гамма-излучения неба, которое содержит множество источников, о которых известно, что они действуют резко в короткие промежутки времени.

Черенковские телескопы по своей механической конструкции являются развитием телескопов установки HEGRA [9], которые были спроектированы и запущены в эксплуатацию в конце 1980-х гг.

В гамма-обсерватории TAIGA с гибридной системой совместно работающих детекторов развивается принципиально новый подход к исследованиям гамма-излучения сверхвысоких энергий. Основная его особенность состоит в том, что в этом проекте прецизионное восстановление энергии, положения и направления оси широких атмосферных ливней (ШАЛ) осуществляется по данным широкоугольной черенковской установки TAIGA-HiSCORE. Для определения вида частицы, породившей ШАЛ (в первую очередь, выделения ШАЛ от гамма-квантов из создаваемого адронного фона), используются данные, получаемые с помощью атмосферных черенковских гамма-телескопов (АЧТ) установки TAIGA-IACT.

1. ФАКТОРЫ, ВЫЗВАВШИЕ НЕОБХОДИМОСТЬ МОДЕРНИЗАЦИИ ПЯТОГО ТЕЛЕСКОПА

Имеющиеся в эксплуатации черенковские телескопы представляют собой массивные металлические конструкции, основным составным элементом которых является альт-азимутальная монтировка, состоящая:

- из азимутальной оси, включающей в себя основание, на котором установлены все остальные составные части, поворотную платформу, систему противовесов;

- из угломестной оси, включающей в себя люльку, обеспечивающую перемещение по угломестной оси, раму зеркал.

Опыт эксплуатации первых трех черенковских телескопов выявил ряд существенных недостатков конструкции. Изготовленные телескопы содержат, помимо базовых недостатков установки-предшественника (телескоп HEGRA в настоящее время является морально и технически устаревшей конструкцией, содержащей недостатки в виде избыточных люфтов, больших пролетов несущих конструкций), собственно конструктивные недостатки в виде некорректного использования опорно-поворотного устройства (внутренний зубчатый венец не используется по назначению), дополнительного избыточного массивного элемента в виде люльки, на которую устанавливается рама зеркал, неэффективно функционирующей системы выборки люфтов и системы обогрева зеркал с использованием тепловых пушек и с системой трубопроводов к зеркалам (для АЧТ-1, АЧТ-2).

В настоящее время рынок современных решений по приводам и опорно-поворотным устройствам находится на более высоком уровне относительно времени создания и эксплуатации телескопов HEGRA, что позволяет реализовать изделие на более качественном и технически современном уровне.

2. ИЗМЕНЕНИЯ, ВНЕСЕННЫЕ В КОНСТРУКЦИЮ ПЯТОГО ТЕЛЕСКОПА

1. В процессе модернизации пятого изделия заменены узлы, обеспечивающие перемещение по азимутальной оси, и узлы, обеспечивающие перемещение по угломестной оси, общей массой более 2 т (внешний вид заменяемых узлов приведен на рис. 1) на опорно-поворотное устройство серии DAD (Dual Axis Drive) массой около 600 кг (рис. 2).

Это комбинированное вертикально-горизонтальное опорно-поворотное устройство полного вращения в азимутальном и угломестном направлениях, одним из применений которого являются солнечные треке-ры, а основным преимуществом использования — его характеристика по люфту, которая обеспечивает значение менее $0,03^\circ$, что позволит выполнять управление пятым черенковским телескопом с оптимальной точностью наведения, а также с минимальным временем отклика на

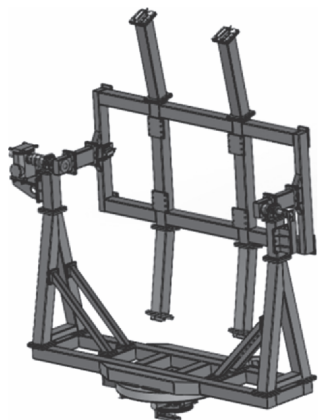


Рис. 1. Внешний вид заменяемых узлов в сборе

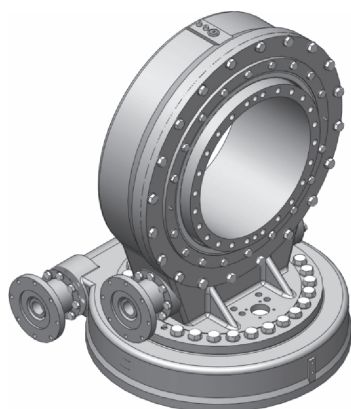


Рис. 2. Внешний вид опорно-поворотного устройства DAD6-Z0-LM

управление по перемещению. Применение данного опорно-поворотного устройства не повлечет изменения в принципах позиционирования и методиках калибровки для пятого телескопа. Внешние габаритные размеры двух идентично функционирующих узлов для сравнения приведены на рис. 3.

Основные технические характеристики опорно-поворотного устройства DAD6-Z0-LM приведены в таблице.



Рис. 3. Внешний вид сборок, обеспечивающих идентичное функционирование по азимуту и углу места: слева — опорно-поворотное устройство DAD6-Z0-LM с системой противовесов; справа — поворотная платформа, люлька с узлами механизации и трубами системы противовесов, устанавливаемых в фундамент телескопа. Сохранены относительные размеры сборок

Параметр	Значение
Передаточное отношение	102:1
Люфт, °	Менее 0,03
Максимальный крутящий момент, кН·м	50
Удерживающий момент, кН·м	84
Опрокидывающий момент, кН·м	150
Радиальная динамическая нагрузка, кН·м	160
Осевая динамическая нагрузка, кН·м	380
Номинальный крутящий момент, кН·м	25
Максимальная скорость вращения, об./мин	1 (для каждой из осей)

2. Помимо этого заменена конструкция рамы зеркал (общей массой более 1,2 т) на конструкцию из стальных ферм готового производства с болтовым соединением на фланцах. Масса рамы зеркал составила около 1 т, при этом конструкция люльки была полностью исключена из состава модернизированного телескопа.

3. На основе проведенных расчетов в состав рамы зеркал пятого телескопа также введена светозащитная блenda (рис. 4, 5), чтобы исключить влияние света с направления, противоположного направлению телескопа, для диапазона углов до 30° относительно оптической оси. Для определения эффективности данного механического дополнения светозащитная блenda была установлена на третьем телескопе. По результатам предварительных измерений фоновая засветка детектора в зимний период при использовании блнды уменьшается на 20 %.

4. Пересмотрена конструкция системы противовесов, она была введена в состав рамы зеркал для снижения деформаций как самой рамы, так и трубы установки камеры ФЭУ, что позволило сделать систему сбалансированной. Сбалансированность системы дополнительно обеспе-

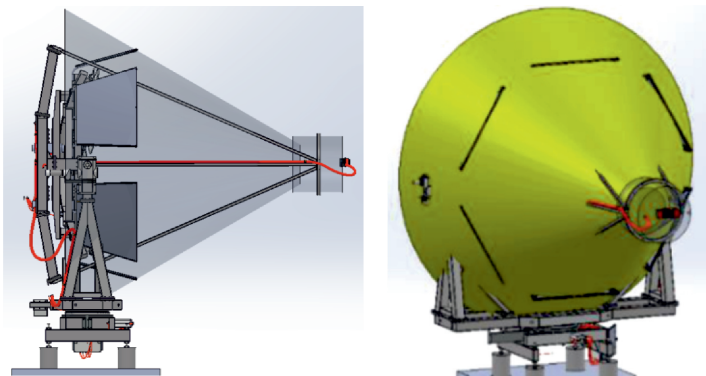


Рис. 4. Поле зрения (в виде конуса, серый слева и желтый справа) и блнды, отсекающие световой поток, выходящий за угол 30° и приходящий с задней стороны телескопа



Рис. 5. Внешний вид бленды, установленной на третьем телескопе



Рис. 6. Греющий кабель (слева) и тепловые пушки (справа)

чит меньший износ опорно-поворотного устройства, а соответственно, сохранение характеристики люфта на продолжительный срок. Люфт для использующихся к настоящему времени АЧТ с каждым годом растет, так как система не сбалансирована, что приводит к механической выработке редукторов.

5. Дополнительно модернизация коснулась системы обогрева зеркал (рис.6) с целью упростить установку и минимизировать время на обслуживание и эксплуатацию. Взамен применяемым двум системам, тепловой пушке и греющему кабелю, расположенному в защитном кожухе в непосредственной близости от задней поверхности зеркал, реализован альтернативный вариант, основанный на базе терморезистивной самоклеящейся пленки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модернизация механической части пятого телескопа позволяет исключить проблемы, которые имеются в конструкциях первых четырех, снизить его стоимость, повысить технологичность конструкции как в качественном, так и в количественном показателе, с учетом предлагаемой

к применению элементной базы, которая обеспечит требуемое функционирование.

Опыт, полученный в ходе данной модернизации, позволит отработать новые технологии и комплектующие, что будет являться заделом для реализации перспективных проектов в области построения аналогичных систем, использующих перемещение как по азимутальной, так и по угломестной оси с заданными показателями точности и повторяемости характеристик, а также для обеспечения возможного серийного производства таких систем.

Дополнительно данная модернизация позволяет отработать другие методы управления (выбранный тип опорно-поворотного устройства позволяет реализовать управление посредством как шаговых двигателей, задействованных на данный момент на четырех телескопах, так и установки преобразователей частоты с изменением типа привода) с учетом требований по точности наведения, слежения и перенаведения, а также со снижением энергопотребления комплекса установки в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Glicenstein J.-F. (for the CTA MST and CTA SCT Projects)*. Status of the Davies-Cotton and Schwarzschild-Couder Medium-Sized Telescopes for the Cherenkov Telescope Array // PoS (ICRC2019). 269.
2. *Davies J. M., Cotton E. S.* Design of the Quartermaster Solar Furnace // Sol. Energy. 1957. V. 1, No. 2/3. P. 16–22.
3. *Hofmann W.* // Proc. of the 26th Intern. Cosmic Ray Conf., Trukuba, 2003. P. 2811–2814.
4. *Aharonian F., Akhperjanian A. G., Aye K.-M. et al.* // Astron. Astrophys. 2004. V. 425. P. L13–L17.
5. *Holder J.* // Proc. of the 29th Intern. Cosmic Ray Conf., Pune, 2005. V. 5. P. 379–382.
6. *Holder J., Acciari V. A., Aliu E. et al.* // AIP Conf. Proc. 2008. V. 1085. P. 657–660.
7. *Baixeras C.* // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2003. V. 114. P. 247–252.
8. *Cortina J.* // Astrophys. Space Sci. 2005. V. 297, No. 1–4. P. 245–255.
9. *Aharonian F. A., Akhperjanian A. G., Kankanian A. S. et al.* // Proc. of the 22nd Intern. Cosmic Ray Conf., Dublin, 1991. V. 2. P. 615–617.