

СПОСОБ ЗАЩИТЫ УФ-ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛ КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА ПУТЁМ СОЗДАНИЯ КОНТРОЛИРУЕМОЙ АТМОСФЕРЫ

Ф.Л. Чубаров¹, А.В. Регеда^{1,2}, А.О. Штокал², Т.А. Говорун^{1,2}, Е.В. Рыков²

¹ Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (248000, Россия, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2)

² Филиал Акционерного общества «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина» в городе Калуга (248000, Россия, г. Калуга, ул. Октябрьская, д. 17)

E-mail: fedor1966chub@yandex.ru, antosharegeda@gmail.com, cuauthemoc1@yandex.ru, Glancet@yandex.ru, rik@laspace.ru

Приведены данные об основных характеристиках космического телескопа Т-170М и конструкции его оптической системы. Обоснована необходимость защиты УФ-отражательного покрытия поверхностей зеркал космического телескопа от содержащегося в воздухе кислорода. Введена концепция пылевлагозащитного чехла для защиты УФ-отражательной способности поверхности зеркал космического телескопа путём создания внутри телескопа контролируемой атмосферы. Обоснована оптимальная схема продува оптической системы космического телескопа газообразным азотом особой чистоты. Произведён подбор оптимального избыточного давления наддува для обеспечения равномерного заполнения объёма телескопа азотом и минимизации механических нагрузок на легкоповреждаемые элементы космического телескопа. Требование по допустимому загрязнению элементов оптической системы космического телескопа обеспечено установкой форсунок наддува космического телескопа и пылевлагозащитного чехла на инструментальный отсек.

Ключевые слова: проект «Спектр-УФ», зеркала оптической системы, покрытие Al+MgF₂, пылевлагозащитный чехол, поддув азота.

UV-REFLECTIVE CAPABILITY PROTECTION PROCESS OF SPACE TELESCOPE MIRRORS SURFACE BY MEANS OF CONTROLLED ATMOSPHERE FORMATION

F.L. Chubarov¹, A.V. Regeda^{1,2}, A.O. Shtokal², T.A. Govorun^{1,2}, E.V. Rykov²

¹ Kaluga Branch of FSBEI HE «Moscow State Technical University named after N.E. Bauman (national research institute)» (2, Bazhenov-street, Kaluga, Russian Federation, 248000)

² The Kaluga Branch of Public Company «Lavochkin Research and Production Association» (17, Oktyabrskaya-street, Kaluga, Russian Federation, 248000)

E-mail: fedor1966chub@yandex.ru, antosharegeda@gmail.com, cuauthemoc1@yandex.ru, Glancet@yandex.ru, rik@laspace.ru

The data about basic characteristic of space telescope T-170M and structure of its optical system are described. Necessity of protection against airborne oxygen of UV-reflective covering of space telescope mirrors surfaces is proved. The conception of dust-proof-and-moisture-proof sheath for UV-reflective capability protection of space telescope mirrors surface by means of controlled atmosphere formation inside the telescope is introduced. Optimal scheme of vent of space telescope optical system by gaseous nitrogen of special purity is validated. The selection of optimal superatmospheric pressure of charging for provision of jogless flooding of telescope volume by nitrogen and minimization of mechanical loads on fragile elements of space telescope is executed. The requirement for tolerable level of contamination of space telescope optical system elements is secured by erection of boosting jets of space telescope and dust-proof-and-moisture-proof sheath on the equipment bay.

Keywords: project «Spektr-UV», optical system mirrors, coating Al+MgF₂, dust-proof-and-moisture-proof sheath, nitrogen-feeding.

Астрофизические наблюдения в УФ-диапазоне обладают многими преимуществами, наиболее значительные: в этом спектральном участке сосредоточена наибольшая плотность физической информации о звёздах и газе; фон космического излучения самый низкий, что обеспечивает наименьший естественный шум при исследованиях [1].

В число основных проектов Федеральной космической программы России на период 2006-2015 гг. включён проект «Спектр-УФ» [2], направленный на создание крупной космической обсерватории для работы в ультрафиолетовом (УФ) участке спектра. Основными целями функционирования обсерватории «Спектр-УФ» являются изучение свойств «космической паутины» - максимальной структуры Вселенной, доступной для изучения современными средствами; изучение процессов, происходивших в ходе эволюции Вселенной; изучение сверхмассивных объектов и аккреционных дисков вокруг них; а также исследование внешних слоёв планетных атмосфер [3].

Основной инструмент обсерватории – космический телескоп Т-170М (рисунок 1) с главным зеркалом диаметром 1,7 м – оснащен спектрографами высокого и низкого разрешения и камерами для построения высококачественных изображений в УФ-диапазоне. Оптическая система телескопа Т-170М построена по двухзеркальной оптической схеме Ричи-Кретьена [4]. Благодаря такой конструкции телескопа Т-170М и двум оптическим элементам получается достичь высокой отражательной способности, особенно в дальнем ультрафиолетовом участке спектра.

Выбор параметров телескопа Т-170М обусловлен следующими конкретными требованиями [5]:

- достижение углового разрешения лучше 0,1 угл. сек.,
- максимальная эффективная площадь в рабочем диапазоне длин волн 110-350 нм.

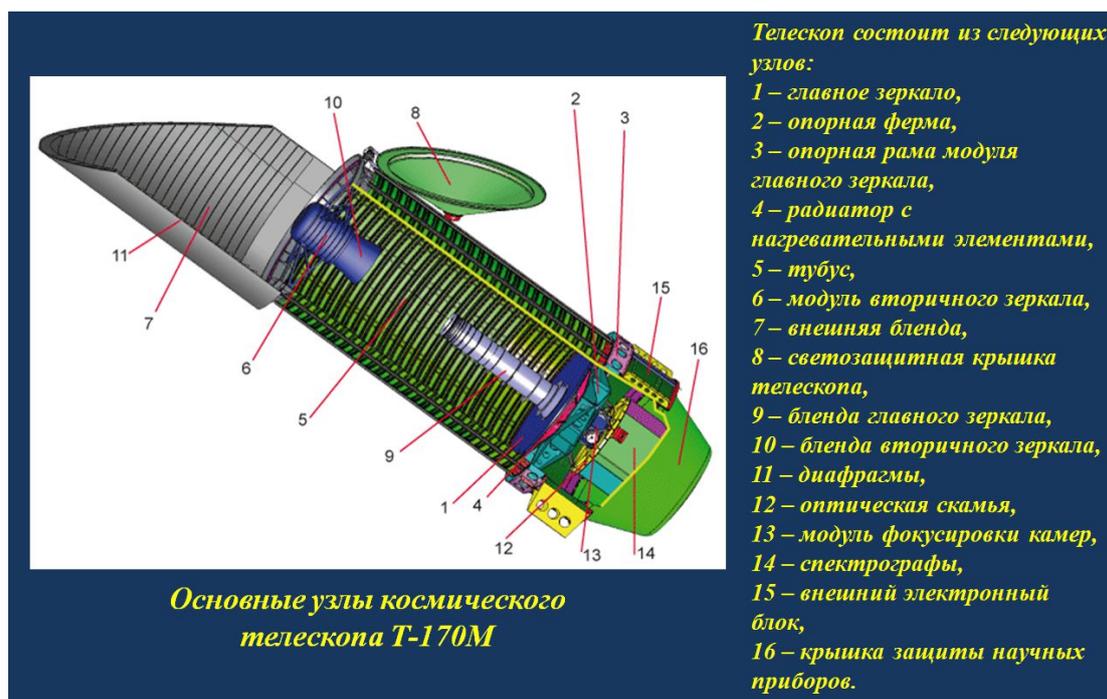


Рис. 1. Устройство космического телескопа Т-170М [6-8]

Решающую роль в обеспечении качества получаемого телескопом изображения играет конструкция, точность изготовления и оптические свойства зеркал телескопа. В ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла» отработана технология приклейки оправ с применением клея DP-190 [9] и изготовления ситалловых зеркал без покрытия со среднеквадратичной шероховатостью не более 1 нм и среднеквадратичным значением деформации рабочей поверхности не более 6 нм. Это достигается в том числе финишной доводкой оптической поверхности зеркал после приклейки к ним элементов оправ, чем нивелируются деформации, возникающие в массиве зеркал от воздействия «чужеродных» элементов. [4]

В ФГУП «НИИ НПО ЛУЧ» отработана технология нанесения на рабочие поверхности зеркал двухслойного тонкоплёночного отражающего покрытия $Al+MgF_2$ [10]. Толщина слоя Al составляет около 100 нм, а слоя MgF_2 – около 30 нм. Разнотолщинность отражающего покрытия зеркал не превышает 3%. [4] Проблема в том, что на алюминии образуется слой оксида (Al_2O_3), который становится весьма непрозрачным на длинах волн короче 200 нм и значительно ухудшает УФ-отражательную способность. До некоторой степени УФ-отражательную способность можно сохранить, защищая голый алюминий покрытием из соединений фтора. В современных УФ-телескопах используют LiF или MgF_2 . На протяжении многих лет рассматривалось большое количество различных материалов в качестве защитных покрытий в УФ, но ни один пока не превосходит по комплексу параметров MgF_2 или LiF . Учитывая вопросы технологии и стоимости, при изготовлении оптических элементов телескопа Т-170М проекта «Спектр-УФ» сделан выбор в пользу «классического» сочетания покрытий $Al+MgF_2$. [11]

Важными характеристиками покрытия являются его толщина, однородность и плотность. Очевидно, например, что чем тоньше защитное покрытие, тем оно более прозрачно, но тонкое покрытие может быть неоднородным, допуская «пробелы», через которые молекулы кислорода могут достигнуть слоя алюминия. Поэтому приходится увеличивать толщину защитного слоя или постараться сделать его плотнее. [11] Для достижения требуемых оптических характеристик поверхности зеркал мы вынуждены делать покрытие MgF_2 как можно меньшей толщины и механически защищать оставшиеся участки металлического алюминия, напылённого на ситалловые зеркала, от воздействия содержащегося в воздухе кислорода.

Для обеспечения требований к оптическим характеристикам отражающей поверхности зеркал космического телескопа необходимо:

- предотвратить контакт содержащегося в воздухе кислорода с поверхностями оптической системы телескопа путём формирования внутри него контролируемой атмосферы;
- обеспечить оптимальные химический состав, температуру и давление контролируемой атмосферы;
- обеспечить требуемую чистоту поверхностей зеркал оптической системы телескопа (допустимое загрязнение деталей оптической системы не более 0,03% от общей площади поверхности (300 p.p.m.)) в процессе транспортировки готового изделия и при его хранении.

Для решения поставленных задач:

- 1) введена концепция пылевлагозащитного чехла (ПВЗЧ), который устанавливается на телескоп и препятствует контакту элементов оптической системы телескопа с атмосферой;
- 2) формирование контролируемой атмосферы внутри телескопа и ПВЗЧ предложено осуществлять путем поддува внутрь газообразного азота особой чистоты (сорт 1) в соответствии с ГОСТ 9293-74 с температурой точки росы не выше -50°C ;
- 3) необходимая чистота поверхностей зеркал оптической системы телескопа обеспечена путём поддержания внутри ПВЗЧ класса чистоты не хуже класса 7 ИСО в соответствии с ГОСТ ИСО 14644-1-2002.

Разработку конструкции ПВЗЧ следует начинать с определения избыточного давления внутри телескопа и ПВЗЧ, а также оптимальных мест расположения форсунок, обеспечивая таким образом равномерный продув внутреннего пространства ПВЗЧ азотом для предотвращения образования изолированных объёмов воздуха, т.к. азот должен полностью заменить внутреннюю атмосферу ПВЗЧ и телескопа. Для удовлетворения высоких требований по чистоте инструментального отсека, где расположена научная аппаратура телескопа, наддув азота внутрь телескопа и ПВЗЧ следует производить через инструментальный отсек. Таким образом, схема продува азотом телескопа и ПВЗЧ принимает вид, изображённый на рисунке 2.

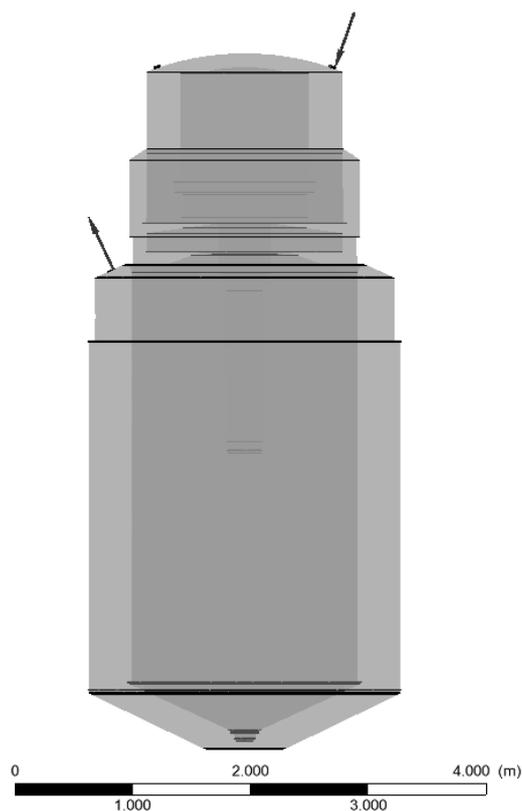


Рис. 2. Схема продува азотом телескопа и ПВЗЧ

Избыточное давление контролируемой атмосферы внутри телескопа и ПВЗЧ должно обеспечивать равномерный продув телескопа азотом, не допуская областей пониженного давления возле тубуса телескопа и корпуса ПВЗЧ, чтобы даже при микроразгерметизации предотвратить попадание кислорода внутрь телескопа и ПВЗЧ. При этом необходимо добиться минимизации механических нагрузок на легкоповреждаемые элементы космического телескопа, обладающие пониженной жёсткостью и прочностью, такие как экранно-вакуумная теплоизоляция, нагреватели системы обеспечения теплового режима, поверхности зеркал оптической системы и светозащитные диафрагмы тубуса и бленд, т.к. вихревые потоки, образующиеся при подаче внутрь телескопа азота под высоким избыточным давлением, могут создавать значительные механические нагрузки.

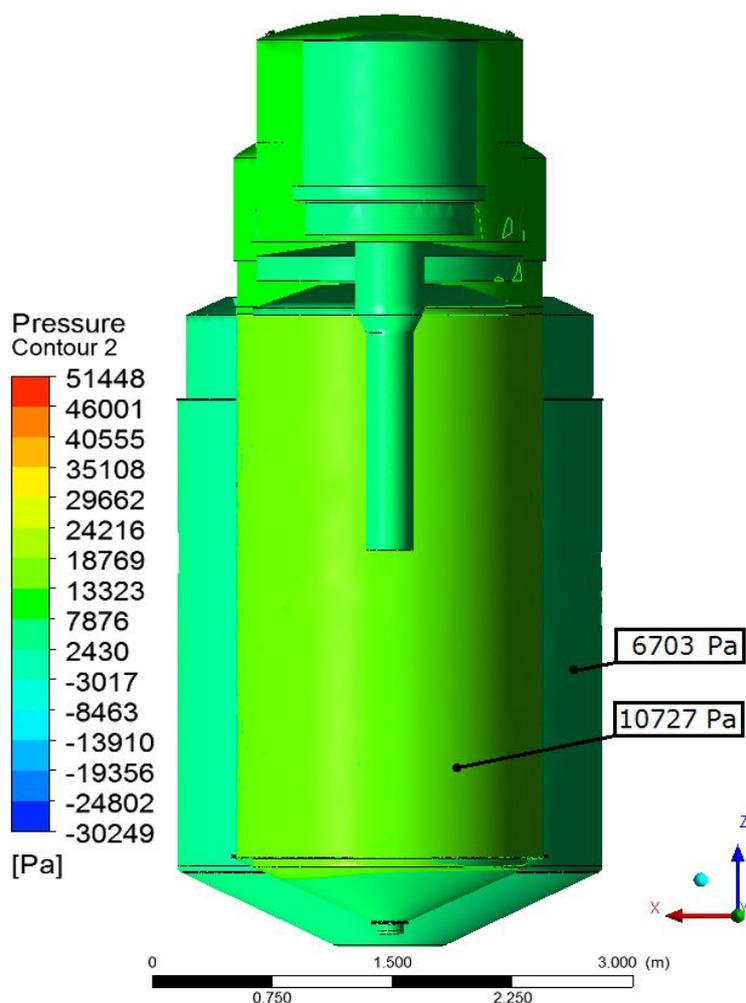


Рис. 3. Поле распределения избыточного давления внутри телескопа и ПВЗЧ

Для оптимизации избыточного давления внутри телескопа и ПВЗЧ был выбран метод конечных элементов. Сначала в САПР «SolidWorks» была построена трёхмерная модель внутреннего воздушного пространства телескопа и ПВЗЧ (рисунок 2), а затем в программной среде «ANSYS CFX» были произведены расчёты поля распределения избыточного давления внутри телескопа и ПВЗЧ (рисунок 3) и распределения скоростей потока азота на входе в инструментальный отсек (рисунок 4).

Результаты расчётов показали, что наддув избыточным давлением 10 кПа достаточен для равномерного распределения азота по всему объёму телескопа и ПВЗЧ и формирования внутри них установившегося поля распределения давления, что минимизирует перенос пылевых частиц и концентрацию их возле одного из элементов оптической системы телескопа.

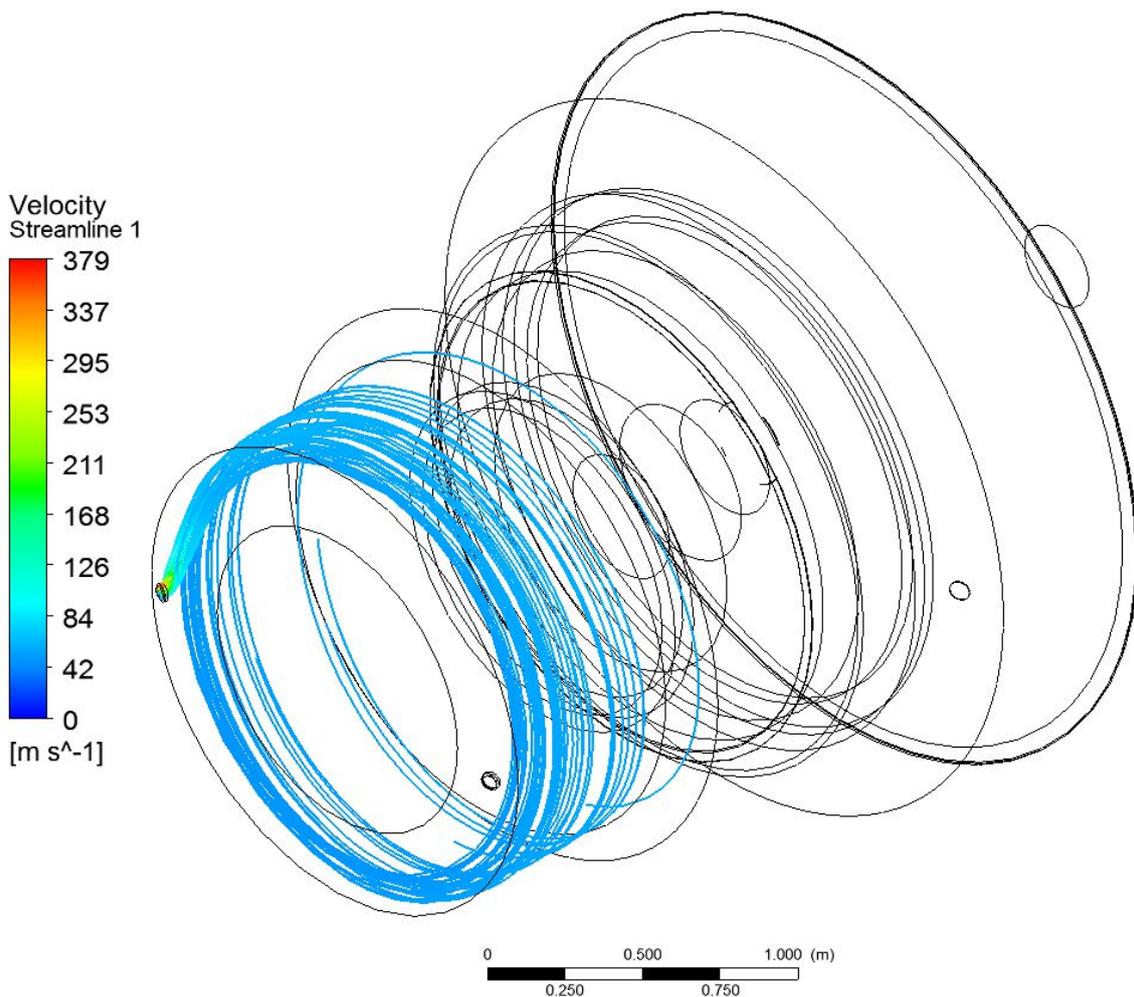


Рис. 4. Распределение скоростей потока азота на входе в инструментальный отсек

Картина распределения скоростей потока азота на входе в инструментальный отсек показывает, что скорость потока азота недостаточна для установления турбулентного течения, поток имеет явно выраженный ламинарный характер, что минимизирует перемещение пылевых частиц внутри телескопа и ПВЗЧ, а также нагрузки на легкоповреждаемые элементы космического телескопа, имеющие пониженную жёсткость и прочность.

Можно заключить, что проделанные расчёты свидетельствуют об оптимальности наддува избыточным давлением 10 кПа для сохранения оптических свойств поверхности зеркал космического телескопа и минимизации нагрузок на легкоповреждаемые элементы телескопа.

Выводы

Требования к качеству оптики ультрафиолетового телескопа предельно высоки. Изготовление высококачественных оптических элементов такого крупного космического телескопа, как Т-170М – весьма сложная технологическая задача. [4] Также непростой задачей является транспортировка изготовленного космического телескопа на стартовый комплекс.

Для выполнения требований к поверхностям зеркал оптической системы телескопа:

- 1) сформирована концепция пылевлагозащитного чехла (ПВЗЧ), который устанавливается на телескоп и предотвращает контакт поверхностей элементов оптической системы телескопа с атмосферным кислородом;
- 2) в качестве компонента контролируемой атмосферы выбран газообразный азот особой чистоты (сорт 1) в соответствии с ГОСТ 9293-74 с температурой точки росы не выше -50°C ; расчётами по методу конечных элементов подтверждено, что наддув избыточным давлением 10 кПа обеспечивает равномерное заполнение телескопа и ПВЗЧ газообразным азотом и при этом минимизирует нагрузки на легкоповреждаемые элементы телескопа, а выбор оптимальной схемы расположения форсунок препятствует образованию изолированных объёмов воздуха;
- 3) внутри ПВЗЧ установлен класс чистоты не хуже класса 7 ИСО в соответствии с ГОСТ ИСО 14644-1-2002; требование по допустимому загрязнению элементов оптической системы не более 0,03% от общей площади поверхности (300 р.р.м.) обеспечено оптимальной схемой наддува телескопа и ПВЗЧ газообразным азотом через инструментальный отсек.

Список литературы

1. Редакционная статья // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. – 2014. – № 5 (26). – С. 3.
2. Санько Н.Ф. Российская программа фундаментальных космических исследований / Н.Ф. Санько, Б.М. Шустов // Физика космоса. Труды 35-й Международной студенческой научной конференции 30 января - 3 февраля 2006 г. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2006. – С. 137–149.
3. Моишеев А.А. Введение в специальность «Ракетно-космическая техника». – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2013. – 120 с.
4. Власенко, О.В. Конструктивная реализация оптической системы телескопа Т-170М / О.В. Власенко, А.Л. Яскович, Б.М. Шустов, М.А. Абдулкадыров, Ю.А. Шаров, А.А. Моишеев, А.В. Зверев, М.Ф. Ильясов // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. – 2014. – № 5 (26). – С. 67–73.
5. Шустов, Б.М. Проект «Всемирная космическая обсерватория – ультрафиолет» / Б.М. Шустов, А.А. Боярчук, А.А. Моишеев, М.Е. Сачков // Ультрафиолетовая Вселенная II. По материалам Всероссийской конференции, прошедшей 19-20 мая 2008 г., г. Москва, Россия / Под ред. Б.М. Шустова, М.Е. Сачкова и Е.Ю. Кильпио. – М.: Янус-К, 2008. – С. 7–19.
6. Шаталов, В.К. Микродуговое оксидирование циркония как способ создания элементов теплоразвязки в космических аппаратах [Электронный ресурс] / В.К. Шаталов, А.О. Штокал, Е.В. Рыков, К.Б. Добросовестнов, О.П. Баженова, Т.В. Рожкова // Наука и

образование. — 2014. — № 8. — С. 174–188. — Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/724519.html>. DOI: 10.7463/0814.0724519.

7. Штокал, А.О. Изучение влияния МДО-покрытия на теплопроводность циркония / А.О. Штокал, В.К. Шаталов // Научно-технические аспекты приборостроения и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Региональной научно-технической конференции, 22–25 апреля 2014 г. — М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — Т. 1. С. 4–7.
8. Штокал, А.О. Многофункциональный метод изготовления прецизионных узлов космического телескопа / А.О. Штокал, Е.В. Рыков, К.Б. Добросовестнов, Т.А. Говорун, О.П. Баженова, Т.В. Рожкова // Электромагнитные волны и электронные системы. — 2016. — Т. 21. — № 1. — С. 27–41.
9. Vlasenko, O. Using the DP-190 glue for adhesive attachment of a large space mirror and its rim / O. Vlasenko, A. Zverev, M. Sachkov // Proceedings of the SPIE. — 2014. — Vol. 9151. — P. 1–6.
10. Zhupanov, V. New facilities for Al+MgF₂ coating for 2-m class mirrors for UV / V. Zhupanov, O. Vlasenko, M. Sachkov, V. Fedoseev // Proceedings of the SPIE. — 2014. — Vol. 9144. — P. 1–8.
11. Жупанов, В.Г. Функциональное покрытие оптических элементов комплекса научной аппаратуры «Спектр-УФ» / В.Г. Жупанов, В.Н. Федосеев, Е.А. Гольшко, А.А. Моишеев, О.П. Баженова, С.В. Алексеев, Б.М. Шустов, М.Е. Сачков, О.В. Власенко // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. — 2014. — № 5 (26). — С. 92–96.