

УДК 629.7.023:629.12: 678.519.92

А.В. Кондратьев, канд. техн. наук,
А.Г. Дмитренко,
К.Д. Стэнилэ,
А.А. Царицынский

АНАЛИЗ НОМЕНКЛАТУРЫ ТИПОВЫХ КОМПОЗИТНЫХ АГРЕГАТОВ РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ И ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ НИХ КОНСТРУКТИВНО-СИЛОВЫХ СХЕМ

Существующие на сегодняшний день жесткие требования рынка космических запусков имеют строго определенную тенденцию к увеличению массы и габаритов выводимого на орбиту полезного груза (ПГ), что инициирует увеличение грузоподъемности ракет космического назначения (РКН) за счет создания новых и модернизации существующих носителей [1, 2].

Поиск эффективных путей снижения массы агрегатов ракетно-космической техники (РКТ), особенно в последние два десятилетия, привел к постоянно нарастающей тенденции использования в них полимерных композиционных материалов (ПКМ) с непрерывно возрастающим объемом и уровнем ответственности изделий [3 – 5]. Так, в работе [5] отмечается, что в современных твердотопливных ракетах доля ПКМ может составлять порядка 75...80% от общей массы конструкции без учета топлива, в крупногабаритных ракетных двигателях твердого топлива – 85...90%, в носителях с жидкостным ракетным двигателем – 25...30%.

Однако дальнейшее повышение массовой эффективности РКТ за счет расширения использования в ее конструкциях композитов делает актуальным проведение анализа существующей номенклатуры типовых композитных агрегатов РКН в целях выявления и обоснования наиболее перспективных направлений их использования.

Сам по себе данный анализ для изделий такой отрасли машиностроения, как ракетостроение, является сложной задачей в силу «закрытости» информации. Практически до начала 80 – 90-х годов прошлого столетия как в отечественных, так и в зарубежных источниках информации содержание и объемы применения ПКМ в РКТ сохранялись под грифом секретности различного уровня. Публикации этого периода весьма малочисленны, например [6 – 14], и обобщены в более поздних изданиях, например [15]. И только в последующий период начинают публиковаться оригинальные и переводные работы, в которых анализируется состояние применения ПКМ в РКТ в странах дальнего зарубежья [16 – 22], в бывшем СССР, а после его развала – в России [23 – 27] и Украине [28 – 32].

Последний период применения композитов в изделиях зарубежной РКТ нового поколения освещен в обзоре [33]. Обобщенные авторами

этой работы зарубежные данные по эволюции применения ПКМ в изделиях РКТ и технологиям изготовления из них элементов конструкций представлены в табл. 1 [33].

Таблица 1 – Разработки ведущих зарубежных фирм в области ПКМ для РКТ нового поколения [33]

Годы	Изделие РКТ, конструкция, материал	Технология
1975-1980	– металлические топливные баки; – металлические сэндвичевые и подкрепленные оболочечные конструкции корпуса	Сварка; механическая ручная сборка
1980-1985	– начало разработки верхней части корпуса (головной обтекатель, приборный отсек, адаптер грузового отсека) с использованием углепластика	Внутренние сэндвичевые панели и подкрепленные металлические оболочки Механическая ручная сборка
1985-1990	– конструкция всей верхней части корпуса (металлический наружный цилиндр + внутренний сэндвичевый конус) с использованием ПКМ	Сэндвичевые панели, ручная сборка Технология соотверждения сэндвичевых панелей
1995-2000	– соединительный модуль РКН «Ариан 5» диаметром 5,4 м из ПКМ; – конический адаптер РКН «Ариан 5» из ПКМ с интегрированными кольцами	Сэндвичевые панели, выкладка волокна Выкладка волокна, литьевое формование (RTM) колец Технология соотверждения Широкое использование разработок, применяемых в авиастроении
2000-2005	– интегрированная монолитная углепластиковая конструкция центральной части корпуса (цилиндр + конус) платформы EUROSTAR 3000; – интегрированный с кольцами конический адаптер из ПКМ РКН «Ариан 5»	Сэндвичевые панели, технология выкладки волокна Технология выкладки волокна и препрега, RTM, технология склеивания
с 2005	– проектирование и изготовление конструкций из ПКМ с использованием разработок авиастроения (самолеты Airbus и Boeing); – применение ПКМ, модифицированных наночастицами	Замена сэндвичевых конструкций из ПКМ на монолитные и сетчатые

Анализ описанного в вышеупомянутых работах опыта использования ПКМ в конструкциях РКТ показал их широкое применение в различных агрегатах, в том числе:

1. Силовые элементы, для которых преваляющее значение имеют прочностные и упругие характеристики композита:

- головные обтекатели (ГО);
- корпуса ракетных двигателей;
- переходные отсеки;
- адаптеры полезного груза;
- топливные баки;
- баллоны высокого давления.

2. Термонапряженные и эрозионно стойкие элементы:

- камеры сгорания;
- сопла;
- турбонасосные агрегаты;
- газоводы.

3. Элементы конструкции, предназначенные для тепловой защиты:

- теплообменники;
- теплозащитные и теплоизоляционные покрытия.

Ниже представлены результаты проведенного анализа существующей номенклатуры типовых композитных агрегатов РКН и применяемых для них конструктивно-силовых схем (КСС). При проведении исследований были использованы доступные опубликованные оригинальные и переводные источники.

1. Российская Федерация.

- ОАО «ОНПП "Технология"» (РН «Протон-М» и «Рокот») [34];



Рисунок 1 – Номенклатура типовых композитных агрегатов РКН «Протон-М»

- ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»» (РН «Союз-СТ») [35].

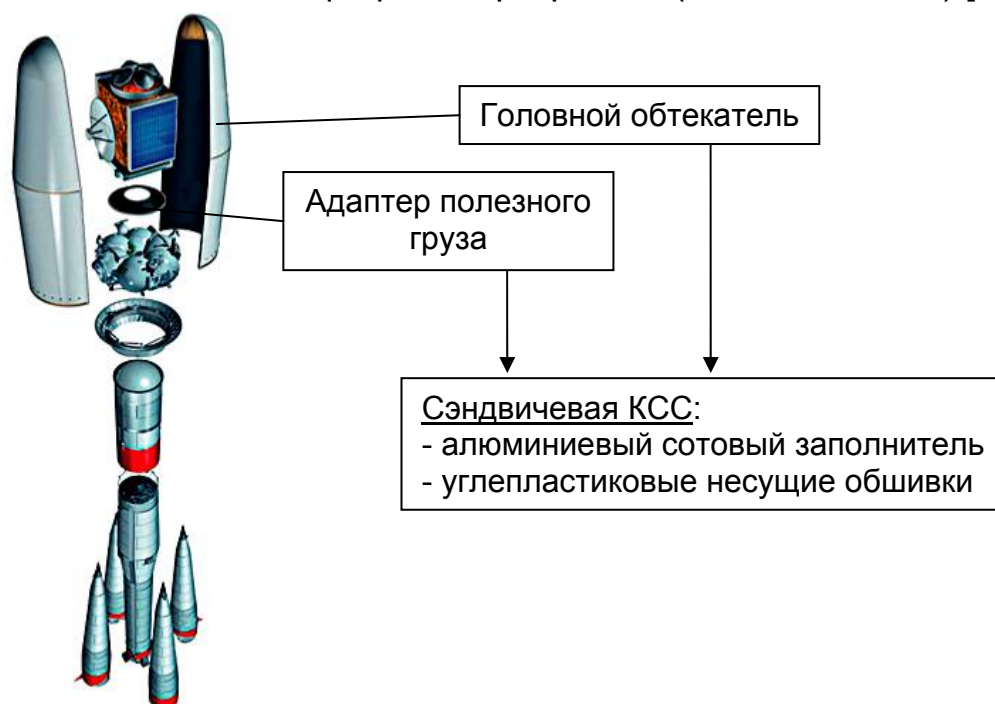


Рисунок 2 – Номенклатура типовых композитных агрегатов РКН «Союз-СТ»

Помимо указанных на рис. 1 элементов конструкции РКН «Протон-М» также из углепластика выполнены локальные обтекатели, приборные рамы, воздухопроводы. В серийно производимых конструкциях РКН «Протон-М» и «Рокот» доля углепластика в силовом каркасе составляет от 20 до 80%, что обеспечивает снижение массы от 16 до 33% [36]. Кроме того, применение ПКМ приводит к увеличению жесткости конструкции на 15%. На РКН «Рокот» ГО выполнен в виде углепластиковой оболочки интегрального типа, полученной методом совмещенного формования, что обеспечило дополнительное снижение массы на 14% по сравнению со сборным углепластиковым ГО.

Для увеличения энергомассовых характеристик предшествующей модификации «Протон» был предпринят ряд мероприятий, в том числе и по снижению массы конструкции. В числе элементов, подвергшихся существенному облегчению, – переходная система, верхняя и нижняя проставки второй ступени. Эти составляющие РКН стали изготавливать из углепластика по сетчатой (изогридной и анизогридной) КСС, что позволило получить максимальную весовую отдачу [36 – 41]. Так, верхний и нижний переходные отсеки второй ступени РКН «Протон-М» были представлены из системы ребер из углепластика и обшивки из органопластика. При этом экономия массы сетчатого верхнего отсека по отношению к алюминиевому стрингерному прототипу составила 20%, а нижнего отсека – 38% [36]. Высокая весовая и экономическая эффективность сетчатых конструкций позволила использовать их также в качестве переходных отсеков, несущих баков и ГО РКН «Протон-М». [38]. Существенное

повышение массовой эффективности РКН «Протон-М» обеспечило также применение сетчатого адаптера, предназначенного для обеспечения механического интерфейса между РКН и космическим аппаратом. Применение композитных сетчатых отсеков в конструкции РКН «Протон-М», кроме существенного снижения массы ракеты, дало значительный экономический эффект [36]. Так, масса сетчатого адаптера на 60% меньше массы конструкции из алюминиевого сплава, а его стоимость на 30% меньше [36].

2. США

- The Boeing Company (РКН «Зенит-3SL», «Delta II» и «Delta IV») [42, 43];



Рисунок 3 – Номенклатура типовых композитных агрегатов РКН «Delta II» и «Delta IV»

- Orbital Sciences Corporation (РКН «Pegasus», «Minotaur IV») [44];

В РКН «Pegasus» и «Minotaur IV» ГО и адаптер ПГ выполнены в виде сэндвичевой конструкции, состоящей из алюминиевого сотового наполнителя и углепластиковых несущих обшивок.

Для РКН «Зенит-3SL» фирмой The Boeing Company из ПКМ выполнены такие элементы, как ГО, переходник между адаптером ПГ и адаптером РКН (сэндвичевая КСС с алюминиевым сотовым наполнителем и углепластиковыми несущими обшивками). Данный тип РКН имеет также сопловые насадки радиационного охлаждения двигателя 11Д58М из углерод-углеродных композиционных материалов.

3. Швейцария (Европейский союз)

- RUAG Space Switzerland (РН «Ariane 5», «Vega», «Atlas V») [45];

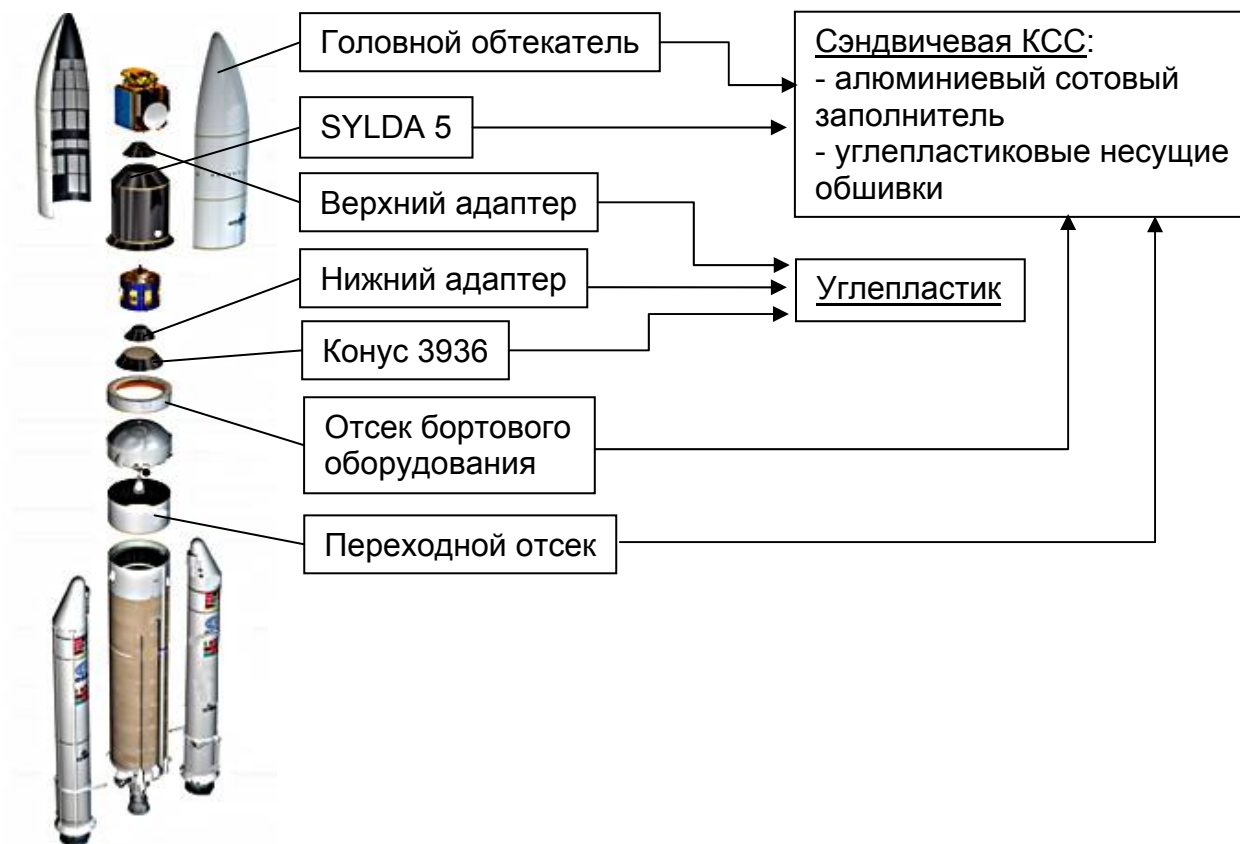


Рисунок 4 – Номенклатура типовых композитных агрегатов РН «Ariane 5»

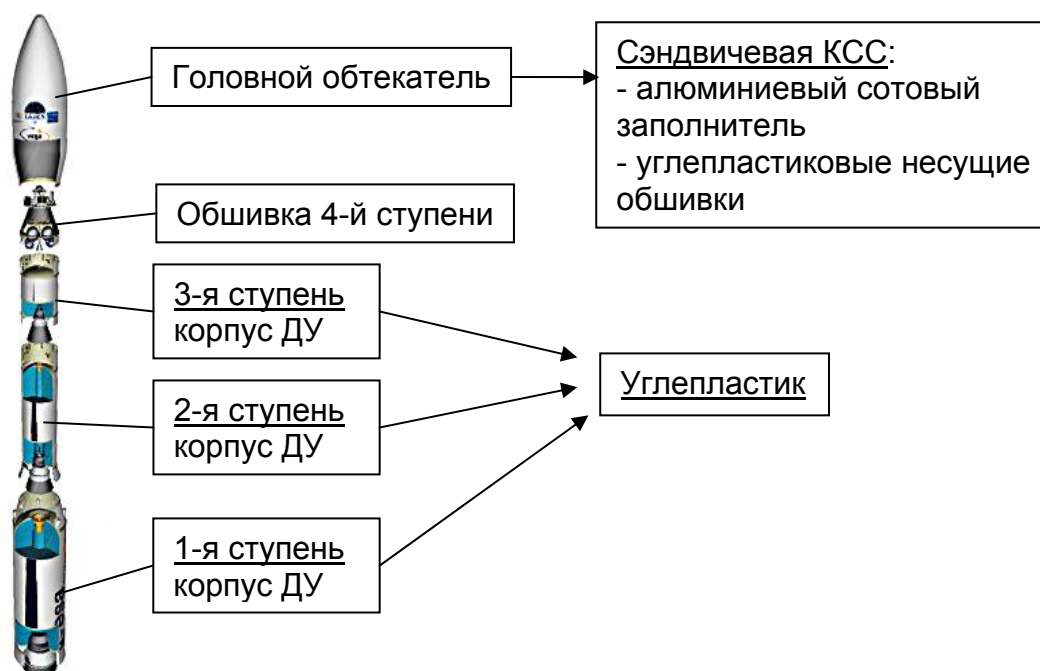


Рисунок 5 – Номенклатура типовых композитных агрегатов РН «Vega»

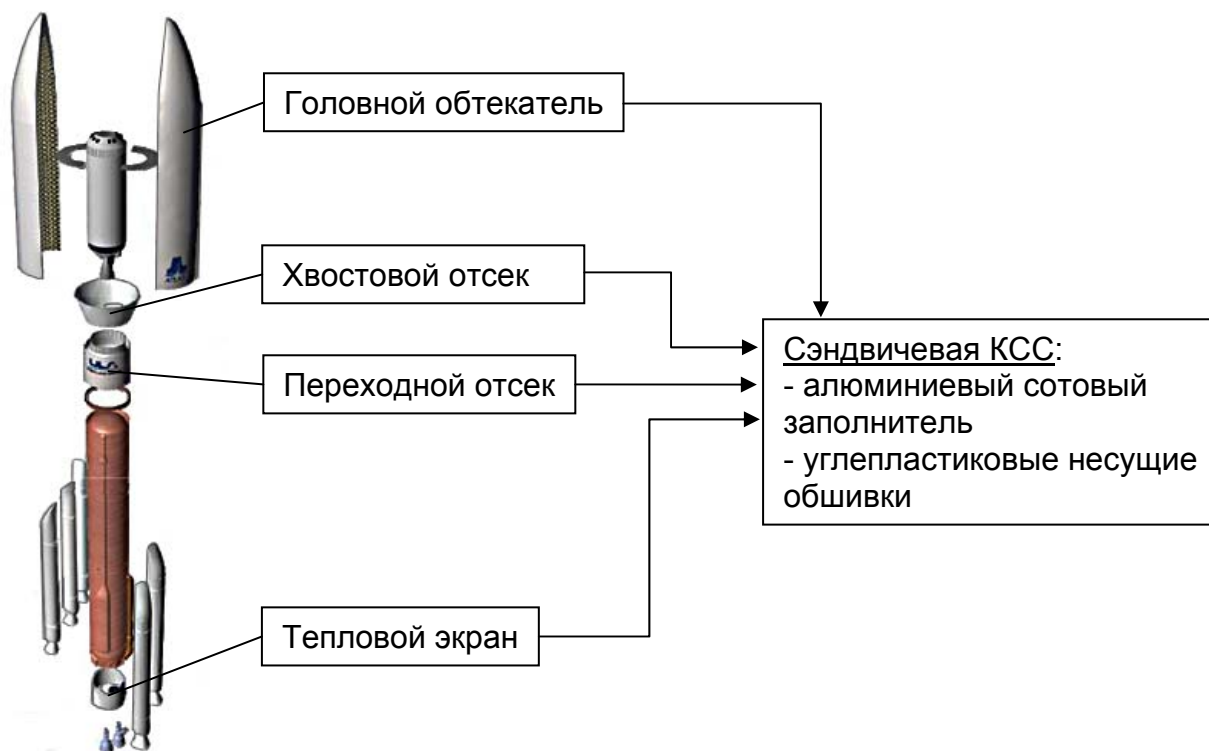


Рисунок 6 – Номенклатура типовых композитных агрегатов РН «Atlas V»

4. Китайская народная республика
 - China Academy of Launch Vehicle Technology (семейство РН «Chang Zheng») [46];

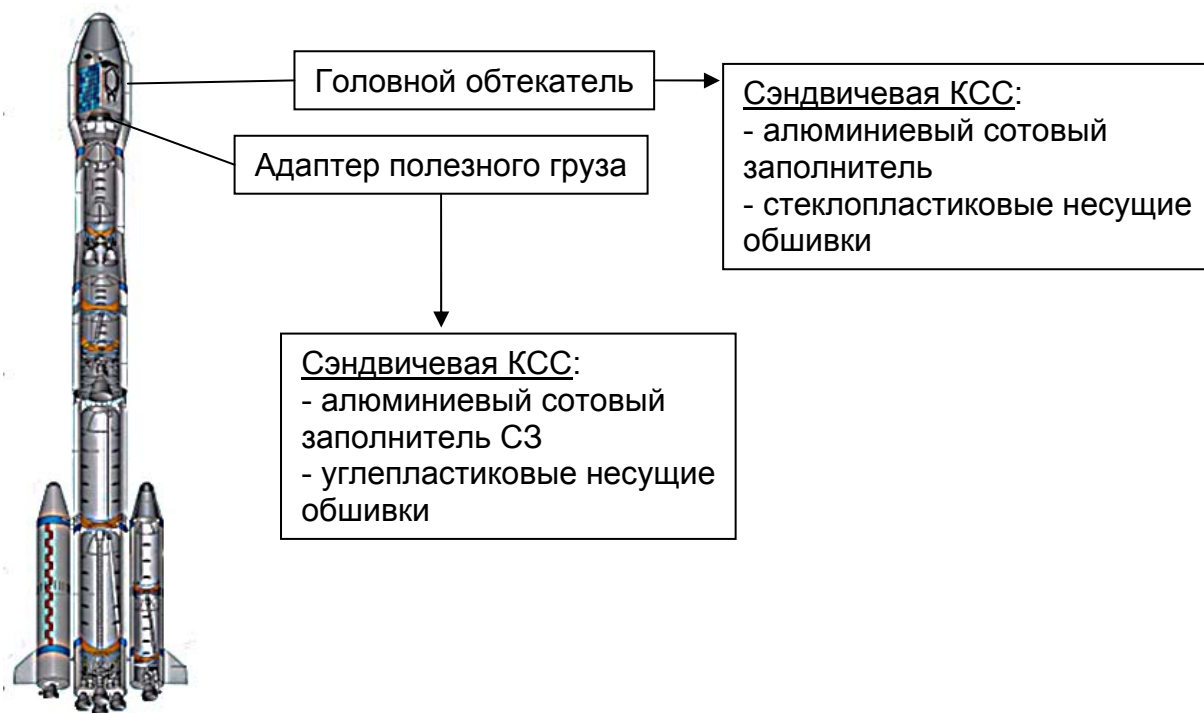


Рисунок 7 – Номенклатура типовых композитных агрегатов РН Chang Zhen LM-3C

5. Япония

- Mitsubishi Heavy Industries (РКН «Н-IIА» и «Н-IIВ») [47].

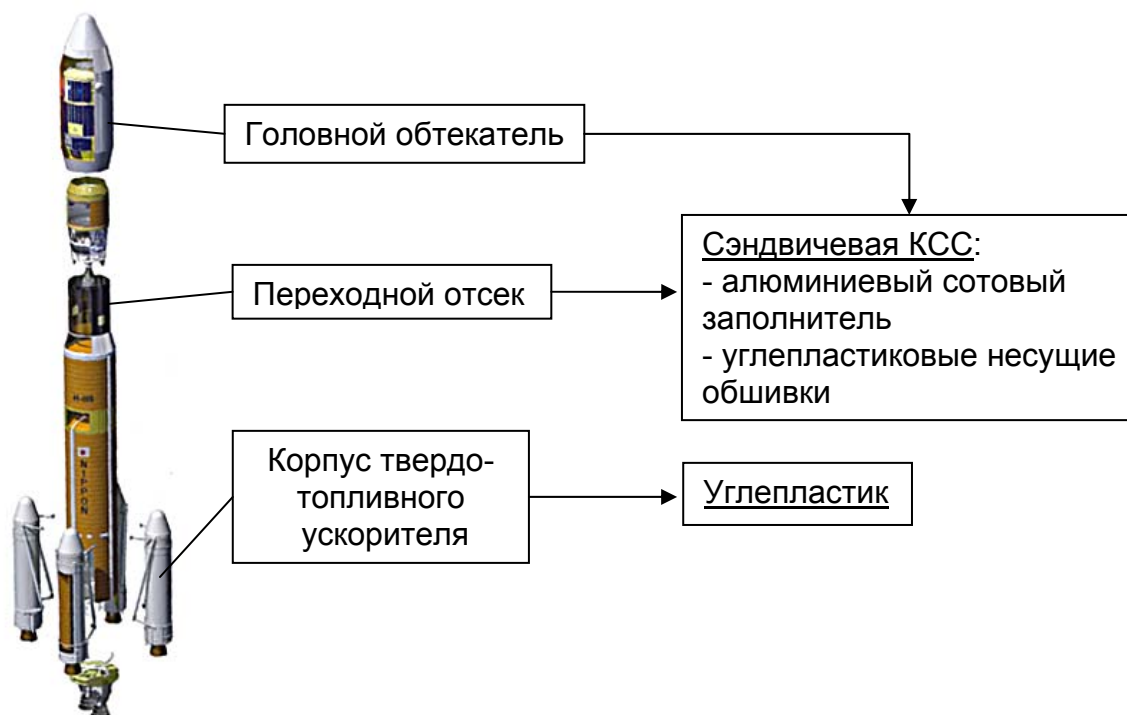


Рисунок 8 – Номенклатура типовых композитных агрегатов РКН «Н-IIВ»

Таким образом, проведенный анализ номенклатуры типовых композитных агрегатов эксплуатируемых РКН и используемых для них КСС показали, что ПКМ широко применяются в силовых элементах (ГО, переходные отсеки, адаптеры ПГ, корпуса ракетных двигателей и т.д), в термонапряженных и эрозионно стойких элементах (камеры сгорания, сопла, турбонасосные агрегаты и др.) и для тепловой защиты. При этом основными КСС для силовых элементов РКН являются сэндвичевые конструкции с различными типами наполнителя и сетчатые (изогридные и анизогридные).

Список использованных источников

1. Рынок ракет-носителей: современные конкурентные тенденции и среднесрочные перспективы развития [Электронный ресурс] // Официальный сайт совместного казахстанско-российского предприятия «Байтерек». – Режим доступа: http://www.bayterek.kz/info/launch_vehicles.php<http://ntrs.nasa.gov>. – 15.08.2012.

2. Сердюк, В.К. Проектирование средств выведения космических аппаратов [Текст] / В.К. Сердюк; под ред. А.А. Медведева. – М.: Машиностроение, 2009. – 504 с.

3. Армированные пластики – современные конструкционные материалы [Электронный ресурс] / Э.С. Зеленский, АМ. Куперман, Ю.А. Горбаткина и др. // Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева. – 2011. – т. XLV, №2. – 19 с. – Режим доступа: <http://www.chem.msu.su/rus/jvho/2001-2/56.pdf> – Загл. с экрана.

4. Коваленко, В.А. Применение полимерных композиционных материалов в изделиях ракетно-космической техники как резерв повышения ее массовой и функциональной эффективности [Текст] / В.А. Коваленко, А.В. Кондратьев // Авиационно-космическая техника и технология. – Х., 2011. – № 5(82). – С.14 – 20.

5. Буланов, И.М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учебник [Текст] / И.М. Буланов, В.В. Воробей – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1998. – 516 с.

6. Darms, F.J. Optimum Filament-Wound construction for Cylindrical Pressure Vessels [Текст] / F.J. Darms // ASD-TRD-62-878, Aerojct-General, Apr. 1962. – 82 p.

7. Graham, T.L. Rigidizable Expandable Aerospace Structures [Текст] / T.L. Graham, R.G. Spain // SAE Meeting, Los-Angeles, Oct. 1962.

8. Moore, H.R. Urethane Foams for Aerospace Application [Текст] / H.R. Moore. – Technical Note. Naval Air Development Center Warminster Pa Aeronautical Electronic and Electrical Lab, 1962. – 37 p.

9. Hefty, R.W. The Rigidization Inflatable Structures in Space [Текст] / R.W. Hefty, H.R. Hersh, L.H. Shenker. – American Rocket Society Paper 2034-61, Space Flight Report to the Nation, New York, NY, Oct. 1961.

10. Plastic for Flight Vehicles: Part I. Reinforced Plastics. – Military Handbook 17. Armed Forces Supply Support Center. [Текст]: Available from U. S. Gov. Printing Office, Washington, D.C, May 1964.

11. Hawthorn, A. Development of Fabric Base Materials for Space Application. [Текст] – Air Force Material Laboratory, Report ML-TD64-20, Jan. 1964.

12. Keller, L.B. Rigidization Technics for Integrally Woven Composite Construction [Текст] / L.B. Keller, S. Schwartz. – AFML Report. No. AFML-TR-65-402, 1964 – 73 p.

13. Space rigidized resin fiberglass sandwich materials [Текст] / L.B. Keller, S.A. Allinikov, A. Olevitch, S.S. Schwartz // Journal of Spacecraft and Rockets. – Vol. 3. – Issue 4, 1966. – Pp. 513 – 518.

14. Mac Killap. The Development and Optimization of a Resin System for Rigidization of Expandable Honeycomb Structures [Текст]/ Mac Killap. – SP1 Meeting, Feb. 1965.

15. Композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов: пер. с англ. [Текст] / под ред. А.Л. Абибова. – М.: Машиностроение, 1975. – 272с.

16. Нотон, Б. Композиционные материалы: в 8 т. – Т. 3. Применение композиционных материалов в технике [Текст] / Б. Нотон; под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. – М.: Мир, 1978. – 512 с.

17. Углеродные волокна [Текст]: пер с японск. / под ред. С. Симамуры. – М.: Мир, 1987. – 304 с.

18. Углеродные волокна и углекомпозиаты [Текст]: пер с англ. / под ред. Э. Фитцера. – М.: Мир, 1988. – 336 с.

19. Willis, P.B. Space applications of polymeric materials [Электронный ресурс] // Paul B. Willis, Cheng-Hsien Hsieh. – Режим доступа: <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/18396/1/99-1875.pdf> – Загл. с экрана.

20. Spacecraft applications of advanced composite materials [Электронный ресурс] // K. R. Uleck, P.J. Biermann, J. C. Roberts, B.M. Hilditch. Режим доступа: <http://85.185.231.196/mekanik/Handbook%20of%20Materials%20Selection%20%20Kutz,Myer/appvanded%20ceramics%20processing.pdf> - Загл. с экрана.

21. Fraser, D. Spacecraft structures [Электронный ресурс] / D. Fraser, H. Kleespies, C. Vasicek. Режим доступа: <http://www.thirdwave.de/3w/tech/spacecraft/spacecraftstructures.pdf> – Загл. с экрана.

22. Van Allen, R. Composites for low-cost launch vehicles and spacecraft [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://aerospace-defenseforum.org/wp-content/uploads/2012/03/Van-Allen-11-03-18-Slides.pdf> – Загл. с экрана.

23. ОАО «Авангард». Опыт производства крупногабаритных изделий из композиционных материалов для ракетно-космической отрасли [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.avangard-plastik.ru>. – Загл. с экрана.

24. Викулин, В.В. Неметаллические материалы для авиационной и ракетно-космической техники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.d-s-r.ru/texts/Vikulin%20V.V..pdf> – Загл. с экрана.

25. Научно-технические разработки ОКБ-23 – КБ «Салют» [Текст] / под общ. ред. Ю.О. Бахвалова. – М.: Воздушный транспорт, 2006. – Вып. 1. – 720 с.

26. Кулага, Е.С. Разработка головных обтекателей из композиционных материалов [Текст] / Е.С. Кулага, И.Г. Оленин // Научно-технические разработки ОКБ-23 – КБ «Салют» / под общ. ред. Ю.О. Бахвалова. – М.: Воздушный транспорт, 2006. – Вып. 1. – С. 418 – 436.

27. Дегтярь, В.Г. Применение композиционных материалов в разработках государственного ракетного центра «КБ им. академика В.П. Макеева» [Текст] / В.Г. Дегтярь // Конструкции из композиционных материалов. – 2004. – № 1. – С. 17 – 23.

28. Ситалов, В.Г. Композиционные материалы в разработках ГКБ «Южное» [Текст] / В.Г. Ситалов, Т.Н. Литвишко // Теория и практика технологии производства изделий из композиционных материалов и новых

металлических сплавов (ТПКММ) – Труды междунар. конф. 30 января – 2 февраля 2001 г., МГУ, Россия – 2001. – С. 107 – 115.

29. Дегтярев, А.В. Применение композиционных материалов при создании перспективных образцов ракетной техники [Текст] / А.В. Дегтярев, В.А. Коваленко, А.В. Потапов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х., 2012. – №2 (89). – С. 34 – 38.

30. Композиционные материалы в разработках ГП «КБ Южное» [Текст] / А.М. Потапов, В.А. Коваленко, Ю.Г. Артеменко и др. // *Композиционные материалы в промышленности: сб. материалов 30 междунар. науч.-практ. конф., Ялта 7–11 июня 2010 г.* / Укр. ИЦ «Наука. Техника. Технология». – К., 2010. – С. 111 – 119.

31. Розвиток ракетно-космічної техніки в Україні [Текст] / А.Ф. Санін, Є.О. Джур, Л.Д. Кучма та ін. – Дніпропетровськ: АРТ-ПРЕС, 2002. – 402 с.

32. Кондратьев, А.В. Обзор и анализ мировых тенденций и проблем расширения применения в агрегатах ракетно-космической техники полимерных композиционных материалов [Текст] / А.В. Кондратьев, В.А. Коваленко // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 3 (67). – Х., 2011. – С. 7 – 18.

33. Кондратенко, А.Н. Полимерные композиционные материалы в изделиях зарубежной ракетно-космической техники (Обзор) [Текст] / А.Н. Кондратенко, Т.А. Голубкова // *Конструкции из композиционных материалов*. – 2009. – №2. – С. 24 – 35.

34. Официальный сайт ОАО «ОНПП «Технология» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.technology.ru>.

35. Официальный сайт ФГУП «ГНПРКЦ “ЦСКБ-Прогресс”» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.samspace.ru>.

36. Анизогридные композитные сетчатые конструкции – разработка и приложение к космической технике [Текст] / В.В. Васильев, В.А. Барынин, А.Ф. Разин и др. // *Композиты и наноструктуры*. – 2009. – №3. – С. 38 – 50.

37. Официальный сайт ФНПЦ ОАО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.tsniism.ru/production_4.htm.

38. Bakhvalov Yu. O., Molochev V.P., Petrokovskii S.A., Barynin V.A., Vasiliev V.V., Razin A.F. Proton-M Composite Interstage Structures: Design, Manufacturing and Performance / *Proc. of European Conf. for Aerospace Sciences*. Moscow, Russia, 2005 (CD).

39. Vasiliev V.V. Anisogrid composite lattice structures – Development and aerospace applications / V.V. Vasiliev, V.A. Barynin, A.F. Razin // *Composite Structures*. – № 94 (2012). – P. 1117 – 1127.

40. Внедрение композиционных материалов в разработках КБ «Салют» [Текст] / Ю.О. Бахвалов, В.П. Молочев, Н.Н. Бобков, А.Ф. Разин //

Композиционные материалы в промышленности: Сб. материалов ХХХ междунар. конф., 7–11 июня 2010 г., Ялта. – К.: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2010 – С. 388 – 394.

41. Разин, А.Ф. Проектирование сетчатых композитных конструкций космических носителей: дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.03 [Текст] / Разин Александр Федорович. – Хотьково, 2003. – 394 с.

42. Официальный сайт Sea Launch [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sea-launch.com>.

43. Официальный сайт The Boeing Company [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.boeing.com>.

44. Официальный сайт Orbital Sciences Corporation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.orbital.com>.

45. Официальный сайт Arianespace [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.arianespace.com>.

46. Официальный сайт China Academy of Launch Vehicle Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.calt.com/english>.

47. Официальный сайт Japan Aerospace Exploration Agency [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.jaxa.jp/index_e.html.

Поступила в редакцию 16.06.2014.

Рецензент: д-р техн. наук, ст. науч. сотр. В.И. Сливинский, УкрНИИТМ, г. Днепрпетровск.