

## ОБЗОР И АНАЛИЗ МИРОВЫХ ТЕНДЕНЦИЙ И ПРОБЛЕМ РАСШИРЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АГРЕГАТАХ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Анализ применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в изделиях ракетно-космической техники (РКТ) позволяет выявить определенные тенденции роста объема и уровня ответственности конструкций из композитов. Наиболее значимые из этих тенденций и соответствующих им вероятных причин их возникновения представлены в виде блок-схемы на рис. 1 в порядке их проявления.

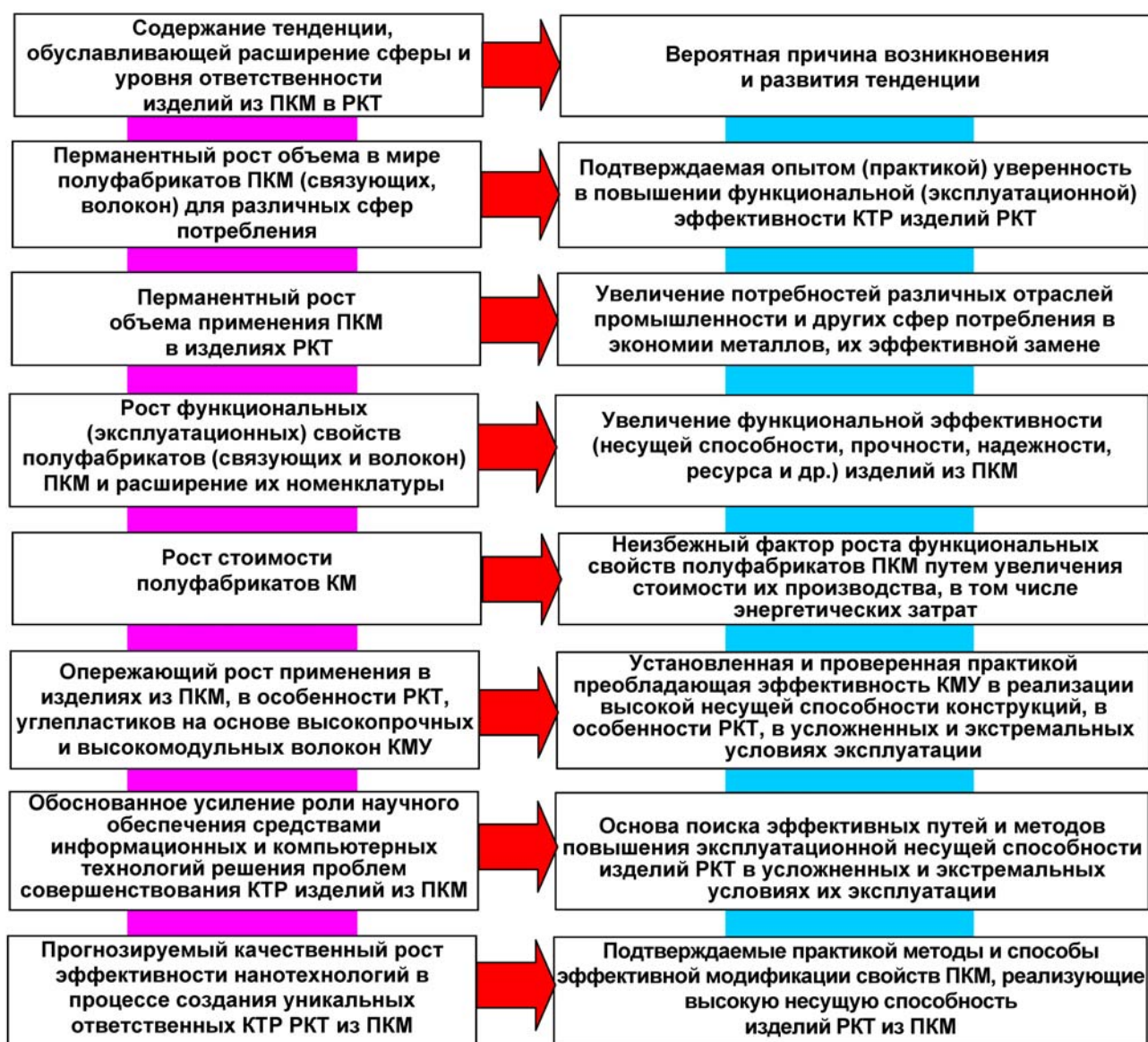


Рисунок 1 – Тенденция роста применения ПКМ в конструкциях РКТ и их вероятные причины

Ниже приведена краткая информация, подтверждающая каждую из выявленных тенденций.

Рост объема применения ПКМ на примере углеволокон в различных сферах, и в частности в изделиях РКТ демонстрируют рис. 2 и табл. 1 [1].

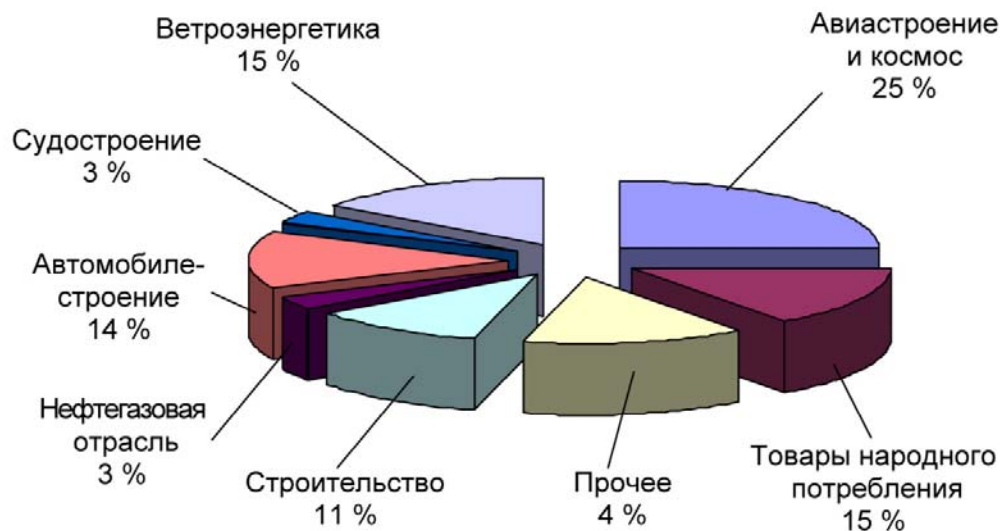


Рисунок 2 – Структура мирового потребления углеволокна по отраслям (2009 г.)

Таблица 1 – Емкость мировых рынков по отраслям потребления углеволокна (тонны)

Наименование отрасли	2010 г.	2013 г. (прогноз)
Авиастроение и космос	9100	15800
Ветроэнергетика	5700	11700
Строительство	4000	5900
Судостроение	1100	1200
Нефтегазовая отрасль	1000	1600
Автомобилестроение	5400	6500
Товары народного потребления	5800	6600
Машиностроение, атомная энергетика, медицина, металлургия и пр.	5400	8000
Итого потенциальная емкость	37500	57300

Из этой информации следует, что в авиастроении и космической технике потребление углеволокна во всем мире к 2013 году возрастет в 1,74 раза и составит 15800 т.

Обзор мирового рынка потребления ПКМ на основе стеклопластиков дан в [2]. На рис. 3 показана диаграмма мирового потребления стеклоармированных ПКМ за весь период их производства (с 1945 г.). Указывается, что потребности транспорта составляют до 25 % объема потребления.

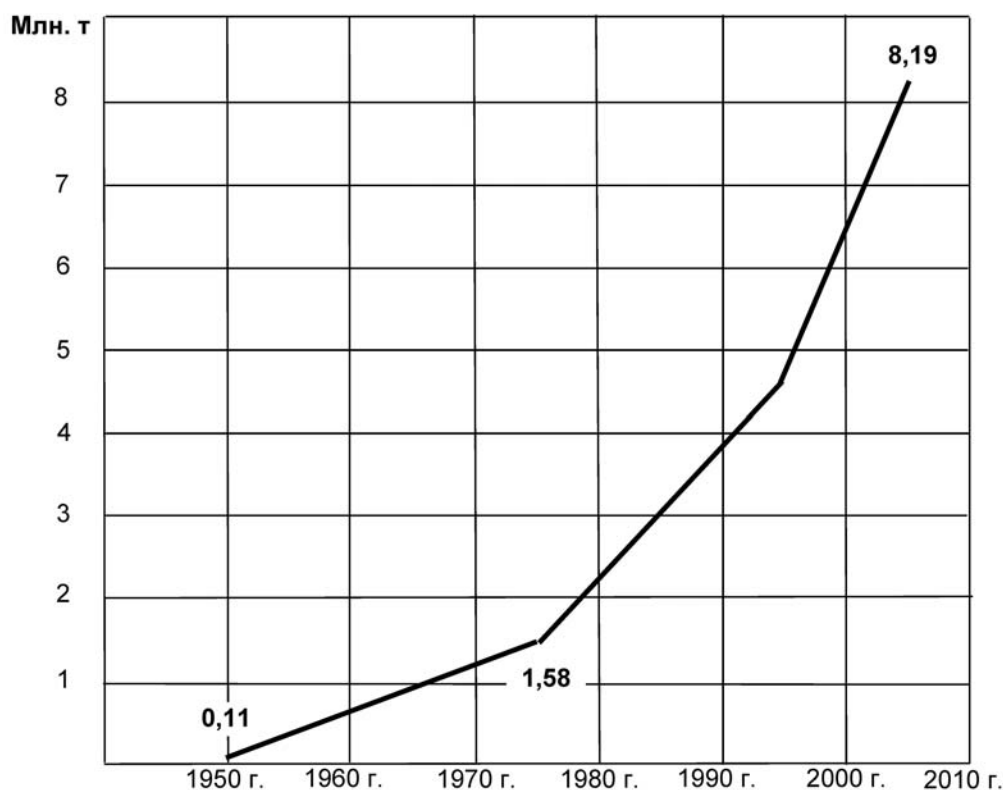


Рисунок 3 – Мировые потребности в стеклоармированном пластике

Перманентно увеличиваются функциональные (эксплуатационные) свойства полуфабрикатов ПКМ – связующих (матрицы) и волокон, а следовательно, и самих композитов. Уже к концу 80-х годов прошлого столетия физико-механические характеристики (ФМХ) ПКМ возросли в среднем на 30 % относительно полученных в 70-е годы при снижении их разбросов. В [3] подробно изложены аспекты влияния термореактивных эпоксидных и полиимидных матриц на ФМХ углепластиков (КМУ). В табл. 2 приведены КМУ на основе различного типа волокон (содержание 60 % об.), а на рис. 4 – динамика изменения прочности однонаправленного углепластика на основе высокопрочных волокон [3]. ФМХ ряда КМУ, полученных в последние годы, приведены в [4].

Таблица 2 – Физико-механические характеристики КМУ на основе волокон различного типа (60 об. %) при 25 °С

Свойство	Матрицы			
	T300/914C	XAS/914C	N4DA/CY209	75S/CY209
$E_0$ , ГПа	133	133	255,5	298
$E_{90}$ , ГПа	9,3	9,3	7,4	3,7
$G_0$ , ГПа	4,6	4,6	4,3	3,1
$\mu_{0,90}$	0,28	0,28	0,26	0,36
$\sigma_{e0}$ , МПа	1613±46	1580	1422±4	1572±35
$\sigma_{e90}$ , МПа	36±5,5	36	30	14±1,4
$\sigma_{-e0}$ , МПа	1812±73	1714	760±51	526±78
$\sigma_{-e90}$ , МПа	218±13	206±12,8	94±4	72±2,6

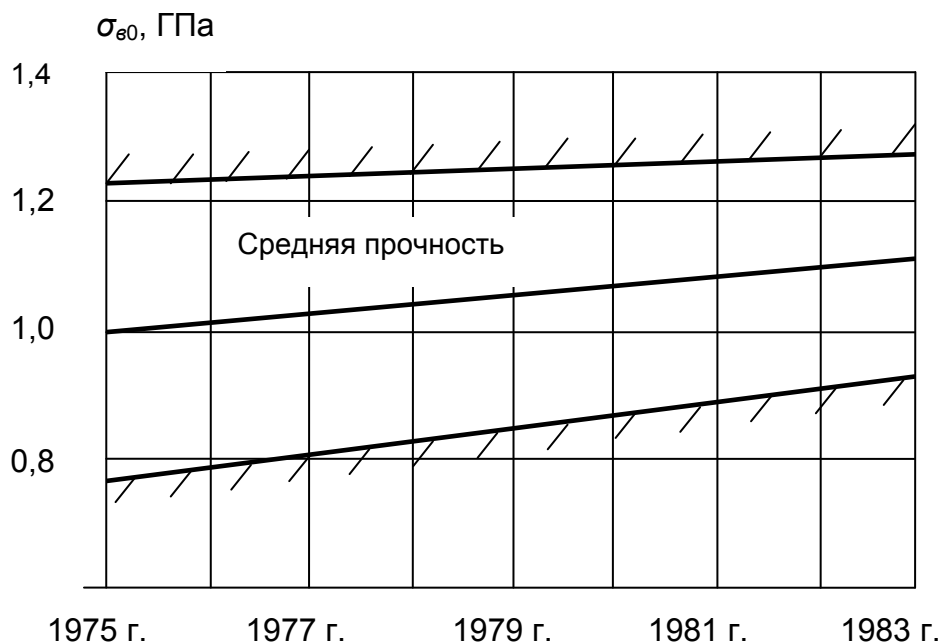


Рисунок 4 – Динамика изменения прочности однонаправленного углепластика на основе высокопрочных волокон

Рост стоимости полуфабрикатов (составляющих) ПКМ и в частности КМУ связан с несколькими причинами. Одной из них является стремление технологов к использованию связующих, отверждаемых при температуре не выше  $120^{\circ}\text{C}$  в целях снижения энергозатрат производства конструкций РКТ из ПКМ. Однако уменьшение температуры отверждения связующих повлекло за собой и снижение термостойкости изделий. Это потребовало разработки новых связующих, лишенных этих недостатков [4, 5].

Имеются все основания полагать, что скоро на рынке появятся новые матричные системы, обладающие повышенными характеристиками. Накопленный опыт работы с матричными смолами показал, что при их создании нужно учитывать наличие добавок, которые могут снижать стойкость к действию растворителей.

Использование некоторых эпоксидных смол при производстве композита путем мокрой намотки породило проблемы экологического характера. Экологические факторы явились второй причиной роста стоимости связующих и ПКМ для РКТ на их основе [3].

На рост стоимости составляющих ПКМ существенно влияют и увеличение модуля упругости, и предела прочности углеволокон (УВ), достигаемые удорожанием технологии их производства и ростом стоимости сопровождающих НИОКР.

В силу очень высоких теплопроводности и прочностных показателей углеволокна находят основное применение при изготовлении некоторых деталей космических кораблей, самолетов и ракет. Стоимость волокон аэрокосмического назначения в зависимости от механических по-

казателей может колебаться в пределах 40...2000 \$/кг. Обычно жгуты для их получения содержат от 3000 до 12000 филаментов (легкие жгуты 3 К...12 К). До недавнего времени УВ из ПАН жгутов с низким количеством филаментов находили основной спрос в авиастроении, ракетостроении, при изготовлении деталей космических кораблей. В настоящее время УВ из гидратцеллюлозных волокон (ГЦ) используют для термозащиты космических кораблей, изготовления их носовых частей, деталей двигателей, некоторых углекомполитов, а также для производства активированных углеродных волокон (АУВ).

Английская компания Thomas Swan&Co.Ltd объявила о начале коммерческого выпуска с середины 2004 г. углеродных нанотрубок (Англия, Consett) [6]. Предполагается, что использование нанотрубок станет прорывом в производстве ультралегких композитов. Благодаря сверхвысокой тепло- и электропроводности они найдут применение и в аэрокосмической технике. Весьма высока стоимость данного типа волокон: 200 фунтов стерлингов за один грамм [6]. Однако, по мнению английских ученых из Центра прикладных исследований, стоимость углеродных волокон в ближайшем будущем может быть снижена до 20 \$/кг [6].

Опережающий рост применения КМУ в РКТ прослеживается при анализе ряда источников информации [1, 3 – 5, 7 – 12]. В обстоятельном обзоре тенденций формирования мирового рынка углеродных волокон [11] приведены графики мировой динамики производства углеволокон и роста его мощности (рис. 5 – 7 и табл. 3).

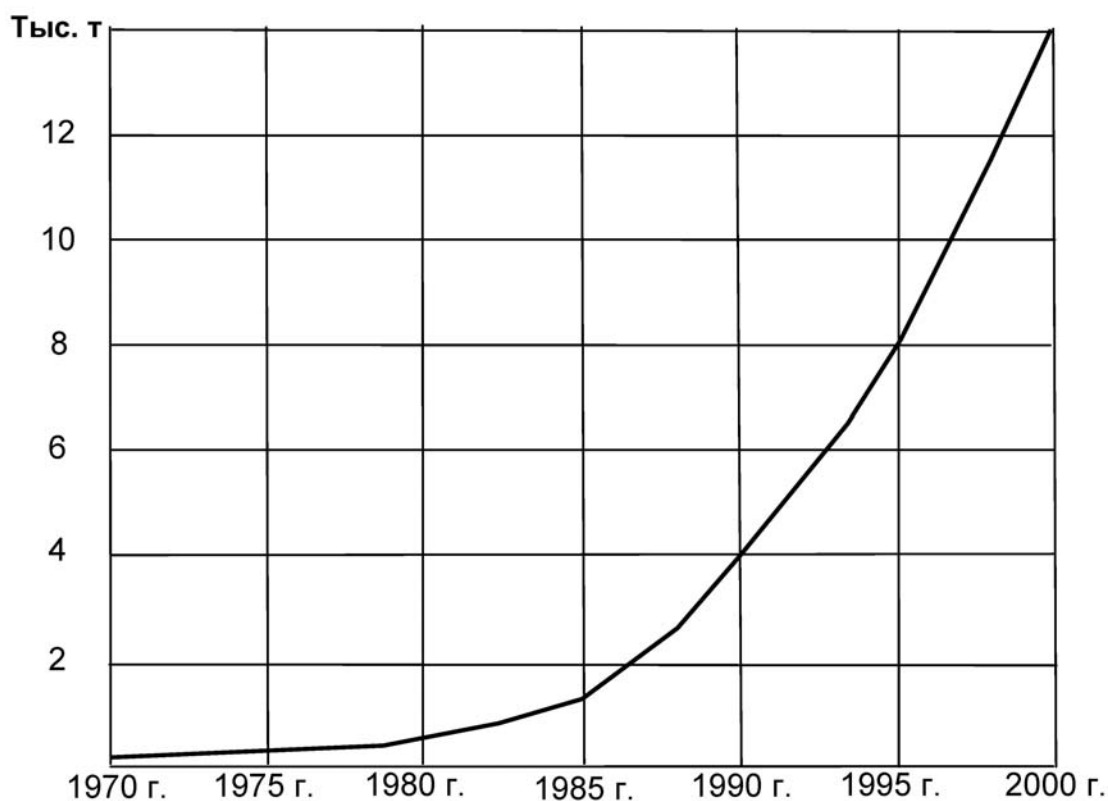


Рисунок 5 – Мировая динамика производства углеродных волокон

Тыс. т

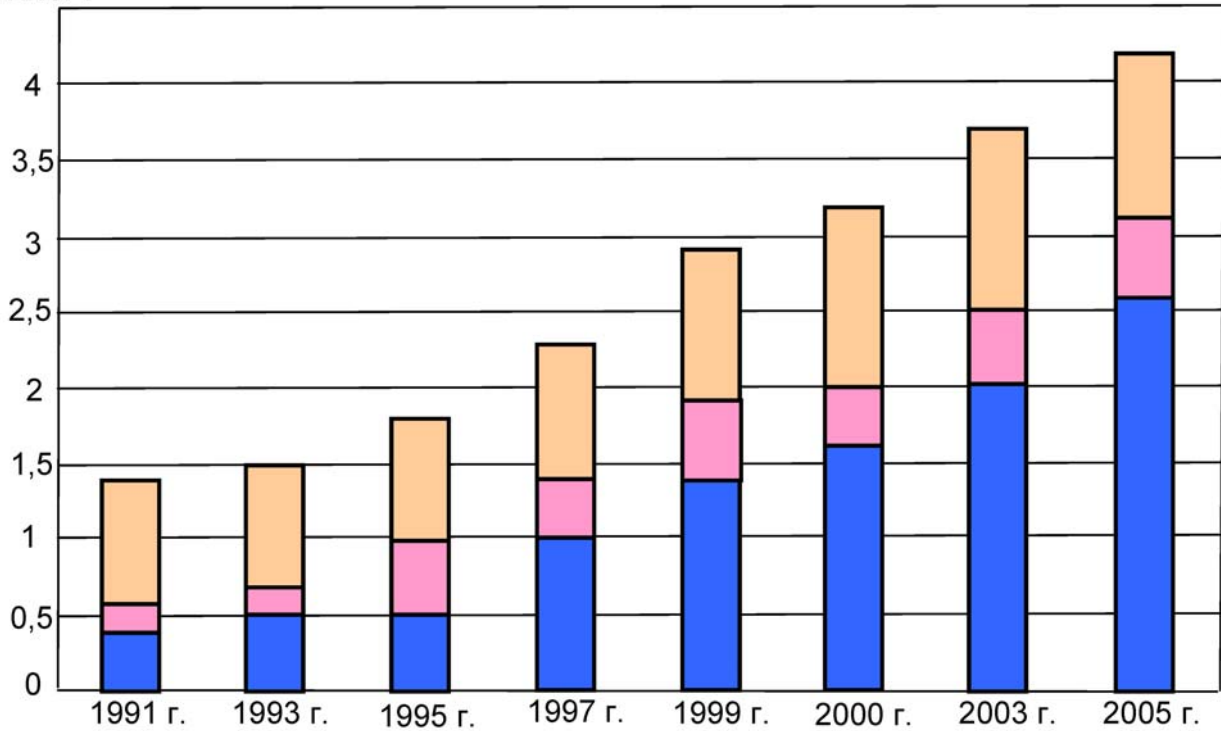


Рисунок 6 – Динамика потребления произведенного УВ в Европе:

■ – аэрокосмическая промышленность; ■ – спорт и развлечения;  
 ■ – другие невоенные отрасли

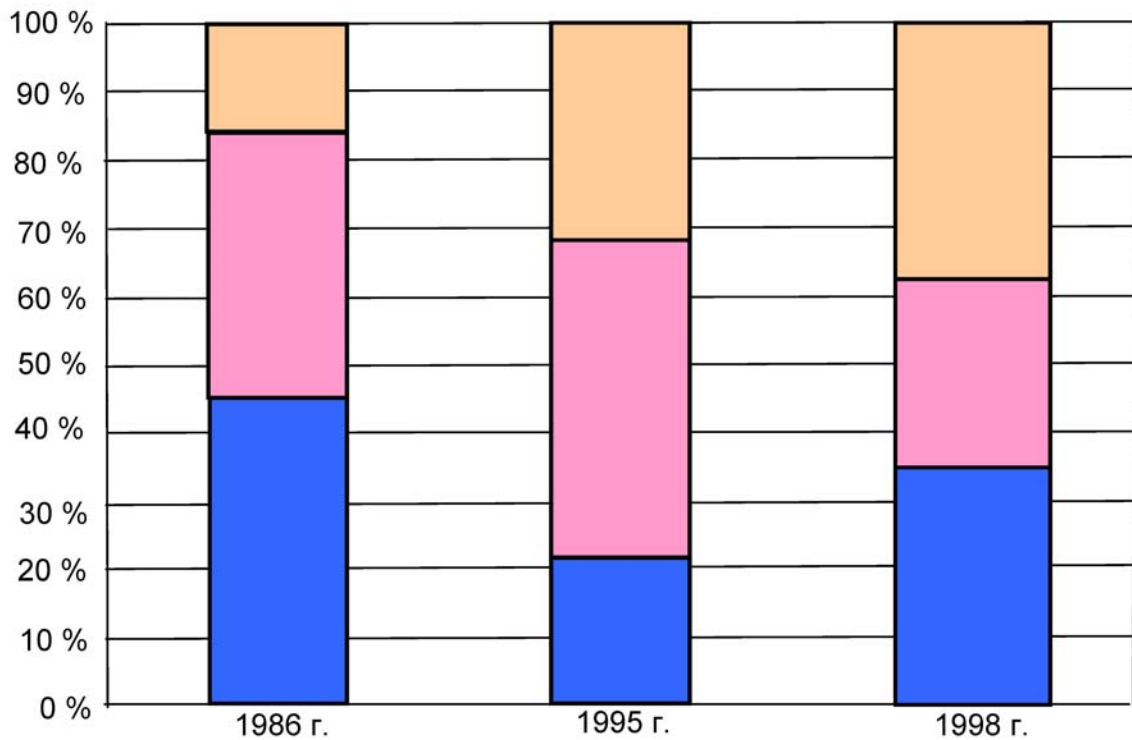


Рисунок 7 – Диаграмма динамики мирового потребления углеволокон:

■ – аэрокосмическая промышленность; ■ – спорт и развлечения;  
 ■ – другие невоенные отрасли

Таблица 3 – Мировые объемы производства углеволокна, тыс. т

Регион	1986 г.	1991 г.	1996 г.	2000 г.	2005 г.
США	1800	3200	3100	5220	7760
Япония	1190	900	1800	2980	3980
Европа	610	1310	1630	2780	4530
Другие	430	1310	1860	3000	6000
Всего	4030	4950	8390	13980	22180

Приведенные данные показывают, что объем потребления УВ неуклонно растет. Объем потребления УВ в авиакосмической сфере с 1995 по 2005 г. вырос приблизительно в 3 раза и продолжает расти.

Тенденция усиления роли научного обеспечения средствами информационных технологий, решения проблем совершенствования конструктивно-технологических решений (КТР) изделий РКТ из ПКМ и их изготовления прослеживается не только в ряде монографий и статей [13 – 18 и др.], но и в ряде квалификационных работ этого направления [19 – 22 и др.], а также в докладах на международных форумах [23 – 29 и др.] В рассматриваемых аспектах состояния проблемы эта тенденция имеет особую важность, требующую её отдельного более детального анализа.

Прогнозируемый качественный рост эффективности нанотехнологий в процессе создания уникальных ответственных КТР агрегатов и узлов РКТ из ПКМ основывается на интенсивном всплеске публикуемых в технически развитых странах монографий и статей в последнее десятилетие. Только в России с 2001 года появилось около десятка монографий (например, [30 – 34]), библиография которых включает тысячи статей и сообщений на авторитетных международных форумах.

Большое распространение получили методы пропитки и экструзии смеси связующего элемента и наполнителя через фильеры. Последний способ позволяет упорядочить и сориентировать компоненты с высоким отношением длины к поперечнику вдоль одного направления армированных нанокomпозиционных материалов (НКМ). Во многих случаях это дает возможность добиться необходимой анизотропии свойств и высокой прочности материала в направлении действия максимальных напряжений в конструкции [31].

Волокнистые НКМ с армирующими элементами из нитевидных кристаллов (усов или вискеро́в), углеродных, борных, стеклянных, кремнеземных и карбидокремниевых волокон получили значительное распространение в аэрокосмической отрасли задолго до пришествия эры нанотехнологий. Они применялись в качестве конструкционных, теплоизолирующих, экранирующих от разных воздействий, фрикционных материалов. Теперь на смену им идут еще более прочные НКМ, армированные нановолокнами и нанотрубками [32].

Для аэрокосмических и других отраслей, нуждающихся в легких высокопрочных материалах, большую перспективу имеют полимерные наноконкомпозиты. Оценки показывают, что оптимально устроенные композиты на основе нанотрубок могут обеспечить исключительно высокие показатели: прочность порядка 50 ГПа, жесткость ~ 1000 ГПа и деформацию до разрушения – десятки процентов. Помимо рекордной удельной прочности они могут обладать рядом других полезных особенностей [33, 34].

Реализация проанализированных выше мировых тенденций роста применения ПКМ в конструкциях РКТ в конкретных условиях Украины наталкивается на ряд существующих проблем, в первую очередь экономического и технического характера. К числу этих проблем следует прежде всего отнести такие.

1. Дефицит качественного сырья для получения связующих и волокон, обеспечивающих создание конструкций из ПКМ с достигнутыми в мире физико-механическими и другими свойствами, необходимыми для реализации потребной несущей способности ответственных изделий РКТ в специфических условиях их эксплуатации.

2. Высокая стоимость импортных полуфабрикатов ПКМ для производства изделий РКТ, многие из которых не подлежат вообще импортированию как стратегическая продукция оборонного профиля.

3. Высокая себестоимость производства изделий РКТ из ПКМ (оборудования, оснащения, материалов, энергии) особенно в период организации и становления производства, связанная с необходимостью закупки зарубежных современных образцов специальных средств производства.

4. Значительная утрата высококвалифицированных кадров и слабое их пополнение молодыми специалистами для научно-технического обеспечения проектирования производства современных высокоэффективных изделий РКТ из ПКМ.

Перечисленный выше далеко не полный перечень проблем, в конечном итоге имеющих в своей основе экономический характер, свидетельствует о реальной возможности утраты Украиной престижного статуса государства, все еще находящегося в десятке стран мира, лидирующих в сфере освоения космоса и современной РКТ в рамках международного сотрудничества и отечественных перспективных программ.

В связи с этим представляется актуальным и настоятельно необходимым синтезировать одну из предопределяющих выход страны на конкурентоспособный в мире уровень научно обоснованную комплексную проблему, составляющие которой системно содержат все основные этапы от выявления и учета фундаментальных характеристик агрегатов РКТ из ПКМ как элементов технической системы их производства до научных основ управления качеством их производства.

Составляющие этой комплексной проблемы и основные контуры путей ее решения показаны на блок-схеме (рис. 8).



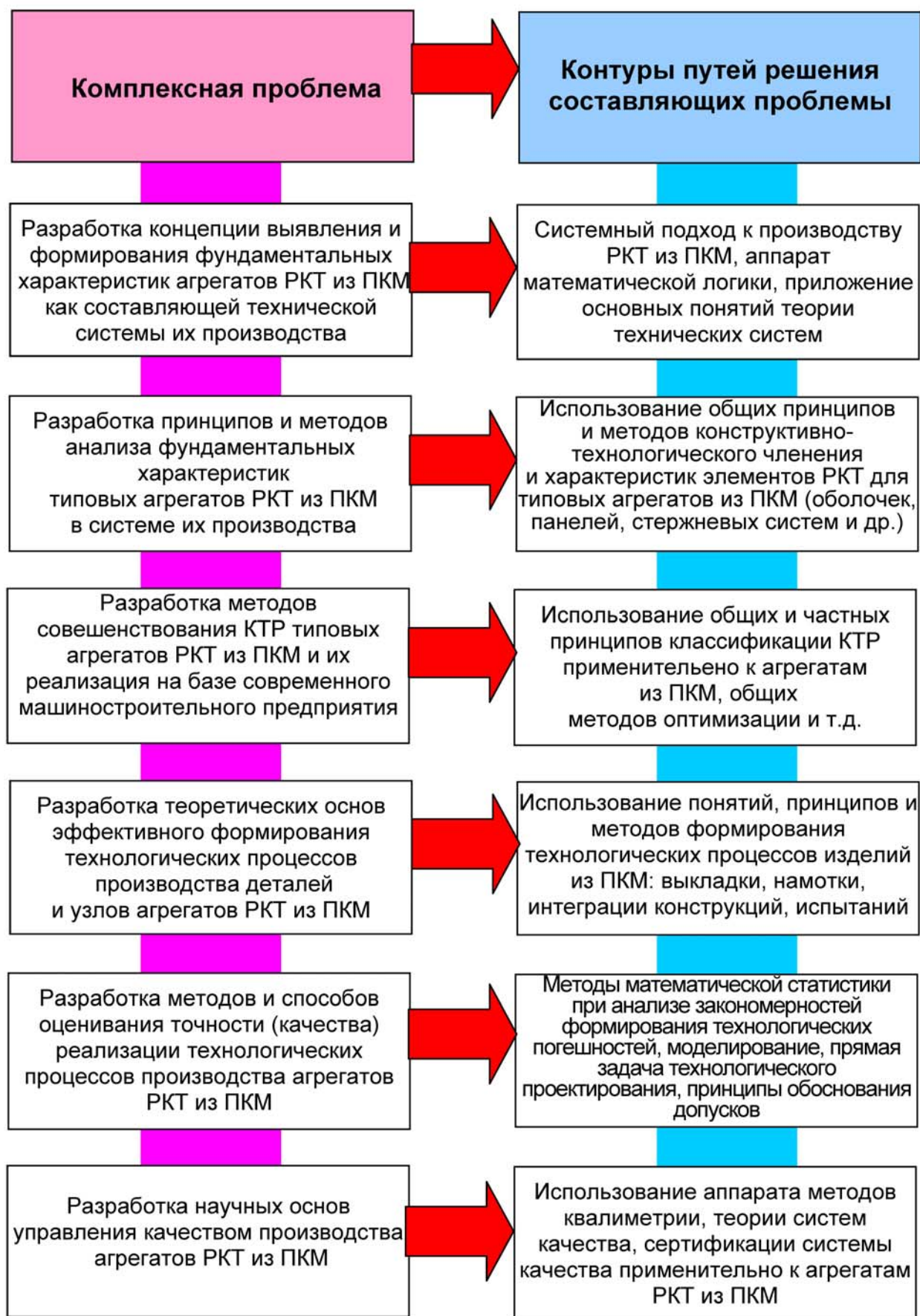


Рисунок 7 – Комплексная проблема научного обеспечения создания высокоэффективных агрегатов РКТ из ПКМ

## Список использованных источников

1. Исследования и разработки, обеспечивающие создание конкурентоспособных полимерных композиционных материалов на основе углеродного волокна [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://www.rusnanoforum.ru/Picture.aspx/Download/29308>. – Загл. с экрана.
2. Мафэлд, Э. Обзор мирового рынка композитов на основе стеклопластика [Текст] / Э. Мафэлд // Композитный мир. – 2006. – № 6 (09). – С. 42 – 43.
3. Углеродные волокна и углекомпозиаты [Текст]: пер с англ. / под ред. Э. Фитцера. – М.: Мир, 1988. – 336 с.
4. Михайлин, Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы [Текст] / Ю.А. Михайлин. – СПб.: НОТ, 2008. – 822 с.
5. Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов [Текст] // сб. докладов XIX науч.-техн. конф., 5 – 7 октября 2010 г. – Обнинск, 2010. – 197 с.
6. Nanotechnology. Technology [Текст] // JEC-composites. – № 9. – 2004. – Р. 66 – 76.
7. Кулага, Е.С. От самолетов к ракетам и космическим кораблям [Текст] / Е.С. Кулага. – М.: Воздушный транспорт, 2001. – 232 с.
8. Композиционные материалы в ракетно-космическом аппарато-строении [Текст] / Г.П. Гардымов, Е.В. Мешков, А.В. Пчелинцев и др. – СПб.: СпецЛит, 1999. – 271 с.
9. Углеродные волокна [Текст] : пер с японск. / под ред. С. Симамуры. – М.: Мир, 1987. – 304 с.
10. 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.
11. Лысенко, А.А. Тенденции формирования мирового рынка углеродных волокон [Текст] / А.А. Лысенко // Технический текстиль. – 2005. – № 12. – С. 33 – 37.
12. Буланов, И.М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов [Текст] / И.М. Буланов, В.В. Воробей. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 516 с.
13. CALS-технологии в технологической подготовке производства авиакосмической техники [Текст] / В.Д. Костюков, Э.М. Годин, В.П. Соколов и др.; под ред. Э.М Година. – М.: Изд-во МАИ, 2005 – 552 с.
14. Жигаев, Е.В. Анализ систем автоматизации технологической подготовки производства ГКНПЦ им. М.В. Хруничева [Электронный ресурс] / Е.В. Жигаев. Режим доступа : <http://lab18.ipu.rssi.ru/projects/conf-2009/3/7.htm>. – Загл. с экрана.
15. Полиновский, В.П. Применение программных продуктов фирмы MSC. Software для расчета новых изделий из композиционных материалов в ГКНПЦ им. М.В. Хруничева [Электронный ресурс.] / В.П. Полинов-

ский // тр. Рос. конф. пользователей систем MSC 2003 г. – М.: MSC.Software Corporation. – Режим доступа: [http://www.mscsoftware.ru/document/conf/Moscow\\_conf/conf\\_2003/khrun2.zip](http://www.mscsoftware.ru/document/conf/Moscow_conf/conf_2003/khrun2.zip). – Загл. с экрана.

16. NASA Composite Crew Module FiberSIM [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://www.vistagy.com> – Загл. с экрана.

17. Гурина, И.А. Технологическое обеспечение производства изделий РКТ [Электронный ресурс] / И.А. Гурина, В.Д. Костюков, М.С. Ромашин и др. Режим доступа : <http://lab18.ipu.rssi.ru/projects/conf2010/3/7.htm>

18. Тишин, А.П. Внедрение CALS-технологий на предприятиях ракетно-космической промышленности Росавиакосмоса [Текст] / А.П. Тишин, Г.П. Шинкин // ИТПП. – 2000. – №3. – С. 11 – 16.

19. Смердов, А.А. Разработка методов проектирования композитных материалов и конструкций ракетно-космической техники: дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.02, 05.02.01 / Смердов Андрей Анатольевич. – М., 2007. – 410 с.

20. Бахвалов, Ю.О. Методология интегрирования композиционных корпусных элементов в конструкцию эксплуатируемых ракет-носителей: дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.02 / Бахвалов Юрий Олегович. – М., 2007. – 520 с.

21. Цырков, А.В. Система технологического проектирования изделий ракетно-космической техники: дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.04 / Цырков, Александр Владимирович. – М., 1999. – 398 с.

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

23. Подведение итогов 2-й Междунар. науч.-практич. конф. «Компьютерные технологии в проектировании и производстве конструкций из композиционных материалов» [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://www.ozakaz.ru/index.php/home/94-beepitron>. – Загл. с экрана.

24. Подведение итогов 3-й Междунар. науч.-практич. конф. «Компьютерные технологии в проектировании и производстве конструкций из композиционных материалов» [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://www.bee-pitron.ru/ru/left/mash/news/> – Загл. с экрана.

25. Лэр, К. Применение программных комплексов «Dassault Systemes» (CATIA/DELMIA/SIMULIA). Обзор методов и средств. [Электронный ресурс] / К. Лэр // тр. 3-й Междунар. науч.-практич. конф. «Компьютерные технологии в проектировании и производстве конструкций из композиционных материалов». 20 - 21 апреля 2011 г. – СПб.: СП ЗАО «Би Питрон. – 25 с. Режим доступа: <http://bp-us.com/kompozits2011/>.

26. Холодов, М.И. Термомеханический анализ конструкций космических аппаратов из полимерных КМ. ФГУП «КБ «Арсенал» им. М.В.Фрунзе». [Электронный ресурс] / М.И. Холодов // тр. 3-й Междунар. науч.-практич. конф. «Компьютерные технологии в проектировании и производстве конструкций из композиционных материалов». 20-21 апреля 2011 г. – СПб.: СП ЗАО «Би Питрон. – 19 с. Режим доступа: <http://bp->

us.com/kompozits2011.

27. Пьер Ван Веттер Обзор численных методов, применяемых в компании SONACA для моделирования авиационных конструкций из ПКМ. SONACA (Бельгия) [Электронный ресурс] / Пьер Ван Веттер // тр. 2-й Междунар. науч./-практич. конф. «Компьютерные технологии в проектировании и производстве конструкций из композиционных материалов». 8 апреля 2010 г. – СПб.: СП ЗАО «Би Питрон. – 12 с. Режим доступа: <http://www.bp-us.com/kompozits>.

28. Слезкин, Д.В. MSC.Software: Технологии виртуальной разработки конструкций из композиционных материалов [Электронный ресурс] / Д.В. Слезкин. Режим доступа: [http://www.bee-pitron.ru/mash\\_new/D2\\_01MSC\\_Composites\\_DS\\_2009\\_Weepitron\\_SpB.pdf](http://www.bee-pitron.ru/mash_new/D2_01MSC_Composites_DS_2009_Weepitron_SpB.pdf). – Загл. с экрана.

29. Шальнов, М.М. Проектирование изделий из КМ в среде САТІА «Би Питрон». [Электронный ресурс] / М.М. Шальнов // тр. 3-й Междунар. науч.-практич. конф. «Компьютерные технологии в проектировании и производстве конструкций из композиционных материалов». 20 - 21 апреля 2011 г. – СПб.: СП ЗАО «Би Питрон. – 11 с. Режим доступа: <http://bp-us.com/kompozits2011>.

30. Альтман, Ю. Военные нанотехнологии. Возможности применения и превентивного контроля вооружений [Текст] / Ю. Альтман. – М.: Техносфера, 2008. – 424 с.

31. Головин, Ю.И. Введение в нанотехнику [Текст] / Ю.И. Головин. – М.: Машиностроение, 2007. – 496 с.

32. Дьячков, П.Н. Углеродные нанотрубки. Строение, свойства, применения [Текст] / П.Н. Дьячков. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006. – 296 с.

33. Пул, Ч. Нанотехнологии [Текст] : пер. с англ. / Ч. Пул, Ф. Оуэнс. – М.: Техносфера, 2006. – 336 с.

34. Белая книга по нанотехнологиям: Исследования в области наночастиц, наноструктур и нанокомпозитов в Российской Федерации (по материалам Первого Всероссийского совещания ученых, инженеров и производителей в области нанотехнологий) [Текст] / В.И. Аржанцев, С.Е. Шишов, В.А. Жабрев и др. – М.: Издательство: ЛКИ, 2008. – 344 с.

*Поступила в редакцию 05.09.2011.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Е. Гайдачук,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*