

О ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ КОМПЛЕКСНОЙ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ САМОЛЕТОВ ТРАНСПОРТНОЙ КАТЕГОРИИ: СОСТАВЛЯЮЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ

Известно, что создание самолета, как и любого сложного технического объекта, включает в себя ряд последовательно реализуемых этапов его жизненного цикла [1 – 2]:

- проектирование;
- постройка и испытание опытных экземпляров;
- разработка технической документации и техническая подготовка серийного производства;
- серийное производство и поставка самолета эксплуатирующей организации (заказчику);
- эксплуатация и модернизация самолета в процессе его эксплуатации;
- утилизация отработавших установленный срок (ресурс) самолетов.

Начальный этап создания самолета охватывает отрасль науки, включающей в себя фундаментальные, прикладные и экспериментальные исследования для решения проблем проектирования, конструирования, моделирования самолетов и их систем с учетом их производства и обеспечения жизненного цикла. Она включает в себя процесс разработки технической документации, которая обеспечивает возможность промышленного изготовления нового конкурентоспособного самолета, отвечающего заданным требованиям, и позволяет осуществить его надежную эксплуатацию в заданных условиях. Целью инженерного проектирования является разработка и создание новых, ранее не существующих объектов, процессов или систем.

Подробно методологические основы общего проектирования отечественных самолетов транспортной категории изложены в [2]. Укрупненную принципиальную схему разработки проекта воздушного судна (ВС), вытекающую из этой информации, можно представить в виде рис. 1.

Создание конкурентоспособных на рынке продаж и услуг отечественных гражданских самолетов транспортной категории (ТК), первый этап которого обусловлен разработкой его проекта, представляет собой сложную комплексную проблему, включающую в себя ряд принципиальных составляющих, основные из которых показаны на рис. 2.

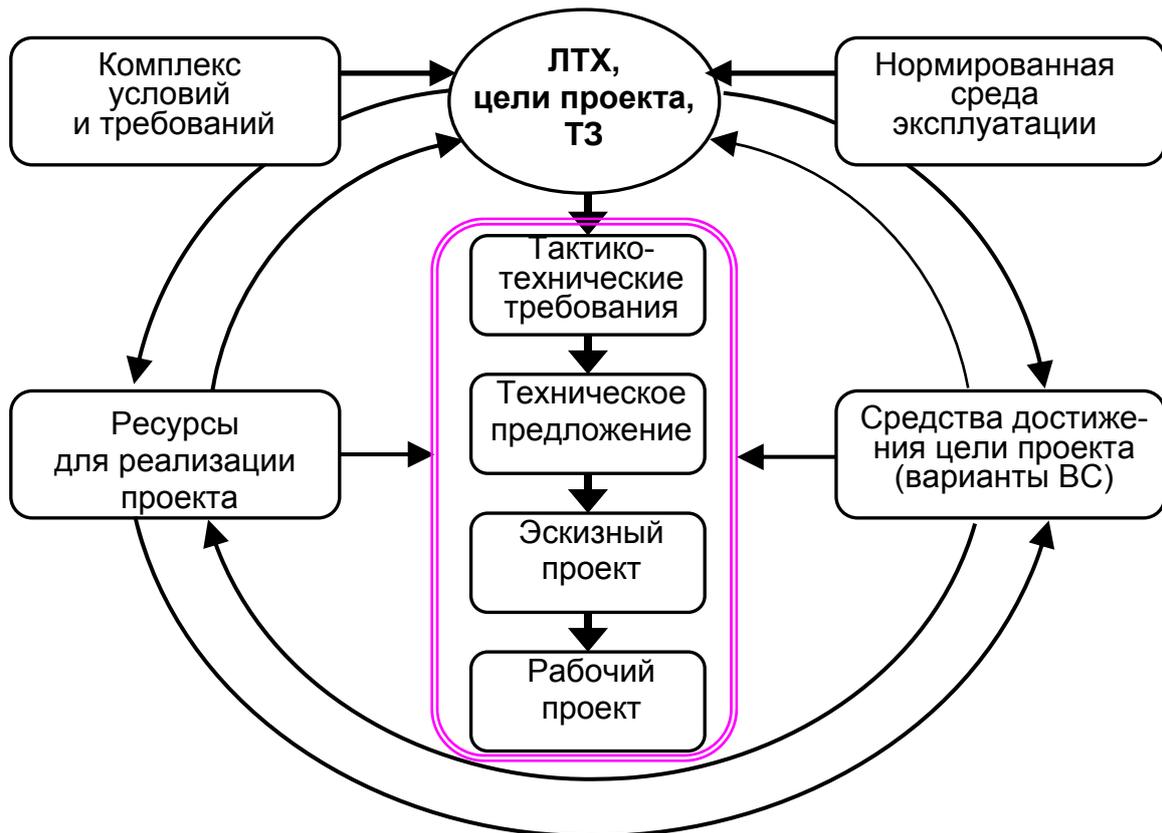


Рисунок 1 – Укрупненная принципиальная схема разработки проекта ВС ТК



Рисунок 2 – Основные составляющие комплексной проблемы реализации проекта ВС ТК

Каждая из этих составляющих в свою очередь является также достаточно сложной проблемой, включающей в себя ряд задач, многие из которых в настоящее время решены на высоком современном научном уровне и подкреплены обоснованными практическими рекомендациями. Однако многие из не менее важных задач, обеспечивающих эффективную поддержку той или иной составляющей в решении комплексной проблемы создания ВС ТС, решены не достаточно полно и требуют дальнейших исследований.

К такой категории задач относятся и задачи обоснованного эффективного выбора конструкционных материалов для агрегатов ВС ТК и взаимосвязанные с ними задачи синтеза конструктивно-силовых схем (КСС) агрегатов и конструктивно-технологических решений (КТР) узлов, деталей и соединений. Принципиальная блок-схема декомпозиции (дифференциации) этого сектора составляющих комплексной проблемы показана на рис. 3.

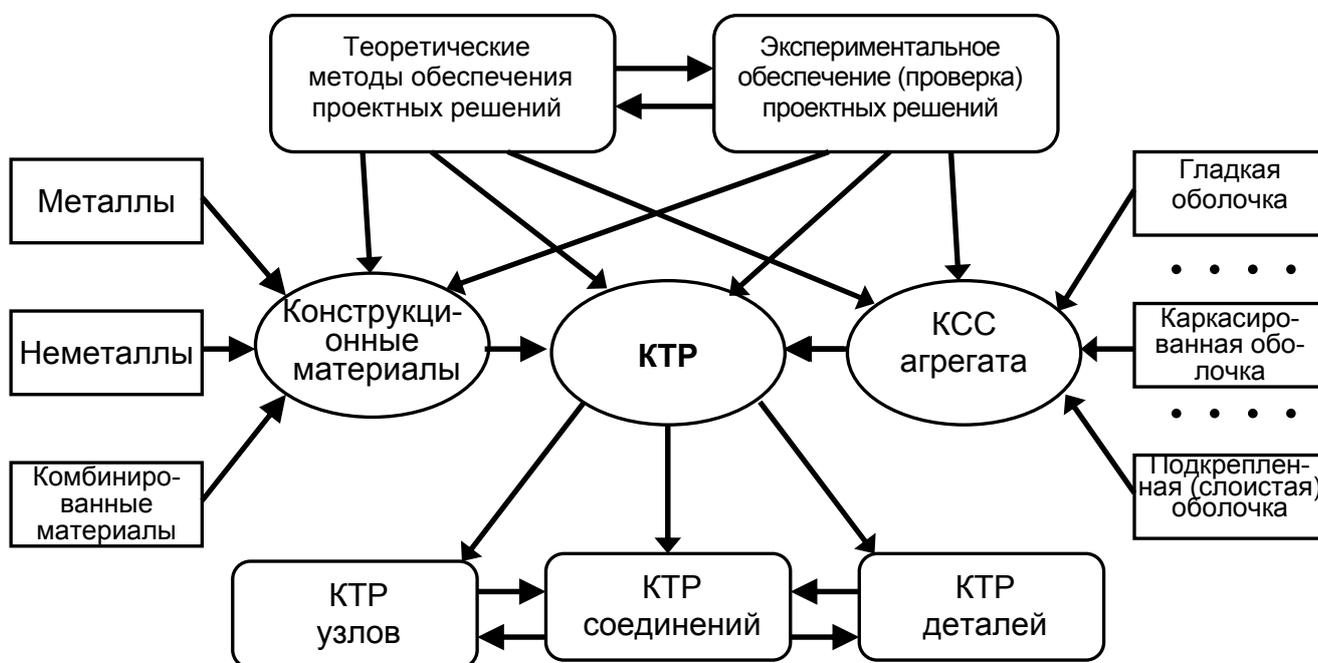


Рисунок 3 – Принципиальная блок-схема декомпозиции принятия проектных решений

Создание современных отечественных ВС ТС конкурентоспособных на мировом рынке продаж и услуг, как следует из анализа основных составляющих комплексной проблемы реализации их проектов (рис. 2), неразрывно связано с высоким массовым совершенством агрегатов при доминирующих требованиях безопасности, экологии, экономичности и комфорта.

Вопросы, подлежащие решению проблемы безопасности и надежности в проекте многоаспектны и многосвязны как между собой, так и с вопросами других составляющих комплексной проблемы.

В качестве примера можно отметить ряд наших исследований влияния параметров среды эксплуатации на внезапную разгерметизацию отсека пассажирского самолета на математической модели, учитывающей статические, динамические и импульсные составляющие потока, при реализации которой впервые получены основные уравнения предельного давления на перегородки и предельные значения силовых воздействий [3 – 5], обеспечивающие безопасность эксплуатации пассажирских ВС, а также результаты исследований другого аспекта безопасности пассажиров, связанного с их травмобезопасностью [6]. Отметим, что исключительно важную роль безопасности полетов отмечал еще Генеральный конструктор О.К. Антонов [7].

Создание современной авиационной техники в Украине характеризуется усилением конкуренции на мировом рынке авиационных транспортных услуг. Конкуренция предъявляет высокие требования к качеству самолетов, способствует разработке и созданию самолетов, удовлетворяющих перспективным требованиям и запросам покупателя в авиационных перевозках, обеспечению технического уровня совершенства вновь создаваемого самолета, превосходящего уровень лучших зарубежных и отечественных самолетов аналогичного класса на основе новых концепций, изобретений и научно-технических решений по аэродинамике, весовому совершенству, силовой установке, прочности, живучести и ресурсу, управлению, системам самолета, комплексу бортового и наземного оборудования, производственной и эксплуатационной технологичности, надежности и безопасности.

При этом необходимо обеспечить экономию материальных, энергетических, финансовых, трудовых, интеллектуальных, информационных и временных ресурсов, необходимых для реализации процесса создания и функционирования самолета на всех стадиях его жизненного цикла: маркетинга, проектирования, производства, испытаний, модификации, сертификации, сбыта, эксплуатации, сервисного обслуживания, ремонта и утилизации.

Важную роль в решении этих проблем играют информационные и компьютерные интегрированные технологии проектирования авиационной техники, анализа, производства и управления проектом. Широкое внедрение их в промышленность при создании технических систем позволит сохранить статус Украины как индустриального государства путем сохранения и развития рынков сбыта, увеличения объема производства, национального дохода и налоговых поступлений [8 – 10].

В качестве частного примера дифференциации комплексной проблемы создания отечественных ВС ТС может служить наша работа [11], в которой разработан метод интегрированного проектирования и компьютерного моделирования фюзеляжа гражданского самолета с помощью интегрированных систем CAD/CAM/CAE/PLM, апробированный при создании мастер-геометрии и аналитических эталонов элементов кон-

струкции фюзеляжа гражданского самолета. Этот метод является основой для создания методик разработки конструкторско-технологической документации элементов и сборных узлов самолета с учетом нормативных документов, регламентирующих проектирование ВС ТК [12].

Дальнейший анализ основных составляющих комплексной проблемы реализации проекта ВС приводит к необходимости более детального рассмотрения категории задач, связанных с сектором составляющих этой проблемы в важнейшем звене их дифференциации для принятия проектных решений, каким является синтез эффективных КТР в рамках обоснованного выбора КСС агрегата и конструкционного материала на основе взаимосвязанных блоков, содержащих теоретические методы обеспечения проектных решений и систему экспериментальной их поддержки (рис. 3).

Результаты многочисленных исследований отечественных и зарубежных ученых и научных коллективов, в особенности последнего десятилетия, выявили их безальтернативную ориентацию на широкое внедрение в современных ВС ТК полимерных композиционных материалов (ПКМ), интенсивно распространяющееся с КТР малоответственных и средненагруженных узлов и деталей агрегатов планера на высоконагруженные конструкции, предопределяющие несущую способность и ресурс всего ВС ТК.

В огромном потоке информации, связанной с этим аспектом, определенное место занимают и наши работы [13 – 23], опубликованные в последнее десятилетие. Так, в работах [13 – 16] исследованы закономерности упругого деформирования слоистого стеклопластика, армированного тканью сатиновой структуры, в широком диапазоне низких температур. Анализируется влияние различных экспериментальных методик на точность определения характеристик упругости слоистых ортотропных материалов. Изучена эффективность математических моделей для вычисления параметров жесткости и податливости тканых композиций исходя из геометрии и механических свойств их составляющих.

Исследование деформирования эпоксидного стеклопластика в работе [14] позволили сделать вывод о возможности его использования в широком интервале низких температур при отсутствии ограничений на параметры жесткости. Понижение температуры испытаний до 77 К приводит к увеличению модуля сдвига в плоскости армирования почти на 100%. Модули продольной упругости изменяются в меньшей степени (на 15 - 20%). Однократное охлаждение стеклопластика до 77 К приводит к увеличению его прочности на 6 - 15%.

Предложенные модели расчета жесткости и податливости слоистых композиций, армированных тканями, позволили достаточно эффективно прогнозировать такие параметры, как модули упругости сдвига и коэффициент Пуассона E_1 , E_2 , G_{12} и ν_{12} исходя из геометрии и механических характеристик составляющих компонентов. Остальные харак-

теристики ортотропного тела вычисляются только из результатов соответствующих опытов.

В [17] отмечается, что в последние несколько десятилетий доля применения ПКМ для создания авиационных конструкций неуклонно растет. Такие элементы конструкции планера самолета, как обтекатели шасси, зализы крыла, управляющие поверхности на крыле, различные крышки негерметичных люков, уже, как правило, изготавливаются из ПКМ. Одновременно с внедрением композиционных материалов в авиации активно идет процесс внедрения в практику методов компьютерного моделирования и технологической подготовки производства на основе единого аналитического эталона изделия (модели полного электронного определения изделия). Отмечается, что несмотря на то, что проблемам моделирования авиационных конструкций с помощью CAD/CAM/CAE систем посвящено довольно много публикаций, все аспекты и нюансы создания моделей полного электронного определения изделий, изготавливаемых из композиционных материалов, до конца еще не проработаны. Поэтому целью проводимых работ являлась отработка на практике методики моделирования изделий из ПКМ, а также создание модели полного определения панели хвостовой секции фюзеляжа, выполненной из композитов.

Итоговая модель отвечает ряду требований:

- сохранение сквозной параметризации для выполненных построений и полной ассоциативности как для всех элементов модели, так и для перекрестных ссылок между файлами;
- использование дерева сборки, полностью аналогичного структуре спецификации;
- базирование построений элементов панелей от мастер-геометрии хвостовой секции фюзеляжа.

В работе [18] проведен анализ применения конструкций из полимерных композитных материалов с различными конструктивно-технологическими решениями: каркасные конструкции; трехслойные конструкции с сотовым наполнителем; трехслойные панели и агрегаты с трубчатым наполнителем. Выявлены их недостатки и обосновано предложение замены сотовых конструкций на трубчатые путем выполнения сравнительных испытаний трубчатых и сотовых образцов панелей. По результатам исследований для совершенствования рекомендованы интегральные конструкции из ПКМ.

В [19] рассмотрены вопросы проектирования, прочности, технологичности, производства и эксплуатации агрегатов планера ВС ТК из ПКМ интегральной конструкции. На этапе проектирования проведена экспериментальная проверка выбранных КТР с моделированием негативного влияния среды эксплуатации. Отработаны различные КТР, в результате апробации которых разработано оснащение для изготовления интегральных композитных конструкций. Описаны результаты анализа со-

стояния агрегатов интегральных конструкций из ПКМ после их эксплуатации на протяжении более семнадцати лет.

Исследованные агрегаты из ПКМ представляются достаточно живучей системой благодаря рациональному распределению силовых функций между элементами конструкции и соответствующему выбору схем армирования для них, а также тому, что в конструкции предусмотрено наличие необходимого количества избыточных связей (диафрагм, узлов навески рулей).

Отмечается, что реализация концепции конструктивной интегральности потребовала не только новых технологических подходов, но и проведения значительного объема расчетно-исследовательских работ, нацеленных, в первую очередь, на развитие прикладных направлений строительной механики, изучающих поведение оболочек из слоистых анизотропных материалов и силовых соединений частей конструкции; выработку принципиальных подходов к обеспечению надежности и долговечности конструкции из композиционных материалов при воздействии всей гаммы эксплуатационных факторов.

На этапе проектирования проведена экспериментальная проверка выбранных конструктивно-технологических решений.

В [20] рассмотрены вопросы разработки методов поддержания летной годности конструкций из КМ с трубчатым наполнителем с учетом требований прочности, надежности и технологичности в условиях авиационно-технической (ремонтной) базы эксплуатанта ВС ТК. Отработаны несколько КТР по выполнению ремонтов, проведены экспериментальные работы по проверке выбранных конструктивно-технологических решений с учетом влияния окружающей среды. Сформирован комплект необходимого оборудования для проведения ремонтов панелей с трубчатым наполнителем в условиях эксплуатанта ВС ТК.

В работе [21] анализируется общая структура процесса проектирования. Выполнен обзор работ по проектированию конструкций из композиционных материалов. Рассмотрены методы и основной принцип проектирования конструкций из композитов. Продемонстрирована возможность реализации указанного выше принципа и методов проектирования на примере конструкции отсека вспомогательной силовой установки регионального пассажирского самолета Ан-148-100.

Рассмотренные выше примеры разработки и (или) совершенствования теоретических методов обеспечения проектных решений, связанных с синтезом эффективных КТР узлов и деталей агрегатов ВС ТК из ПКМ, далеко не охватывающий весь существующий сегодня их арсенал [22-25 и др.], убедительно свидетельствуют о том, что применение композитов обеспечивает более высокие летно-технические характеристики изделий при допустимом уровне используемых энергетических, финансовых и временных ресурсов за счет снижения массы и улучшения других эксплуатационных показателей.

Эта роль ПКМ в проектировании агрегатов ВС ТК обусловлена высокими удельными характеристиками в направлении укладки армирующего материала и управляемой анизотропией свойств пакета. Наиболее полно эти свойства можно использовать в регулярных зонах конструкции, где силовые потоки однородны или квазиоднородны по сечениям и имеют определенное доминирующее направление. В переходных зонах, примыкающих к стыкам и соединениям, ПКМ уступает конструкционным металлам, что объясняется невозможностью обеспечения соответствия структуры пакета в локальных зонах условиям нагружения. В окрестности отверстий механических соединений композит проявляет низкую контактную прочность и межслойную прочность и другие нежелательные свойства [25 – 27].

Согласно сложившейся традиции и особенностям силовой конструкции ВС ТК самым распространенным типом соединения является механическое (болтовое, заклепочное, винтовое). Для расчета механических соединений на прочность традиционно используется система уравнений, в которой рассматривается не реальное напряженное состояние, а условное – нагрузки приведены к определенным площадям и полученные напряжения сравниваются с предельными экспериментально определенными значениями. Прочность соединения гарантируется в том случае, если для каждого из рассмотренных видов разрушения (разрыв в ослабленном сечении, смятие, срез крепежных элементов, срез ПКМ между рядами или до края детали) условные напряжения находятся в пределах допустимых значений. Практика проектирования механических соединений показала высокую эффективность данной концепции системы расчетов. Для обеспечения адекватности расчета разработаны и стандартизованы методы экспериментальной оценки предельных значений условных напряжений [25 – 27].

Накопленный опыт проектирования механических соединений деталей из композитов показал, что для обеспечения их адекватности при сохранении достаточной простоты «условных» расчетов необходимо существенно изменить экспериментальную базу расчетов на прочность в направлении учета структурных особенностей ПКМ и условий взаимодействия элементов соединения.

Конструкция агрегата ВС ТК содержит большое количество функциональных, технологических и эксплуатационных соединений, что в значительной степени ставит работоспособность конструкции в зависимость от качества проектирования соединений. Существенную роль в обеспечении качества проектирования соединений играют эксперименты, направленные на определение свойств элементов стыка и на подтверждение предсказанной (заложенной в проекте) несущей способности соединения (см. рис. 3).

В связи с все более широким применением ПКМ в ответственных элементах конструкций ВС ТК усиливаются и требования к эксперимен-

тальной базе. Существующая система экспериментов имеет ограниченное применение, так как не учитывает в полной мере особенности работы композитной детали в соединении. К этим неучтенным особенностям относятся анизотропия физико-механических свойств, отличие прочности на срез (от прочности на сдвиг), зависимость прочности на смятие от диаметра конструктивного элемента и структуры ПКМ и др. Таким образом, разработка системы экспериментального обеспечения расчетов механического соединения, которая максимально учитывала бы особенности работы ПКМ в окрестности отверстия, представляется весьма актуальной.

Целью системы экспериментального обеспечения и проверки проектных решений является повышение точности и достоверности расчета на прочность и проектирования механических соединений деталей агрегатов ВС ТК из композитов за счет разработки и реализации комплексной системы методов и средств определения прочности материалов на смятие, срез и межслойный сдвиг, а также коэффициентов концентрации напряжений и податливости крепежных элементов, максимально учитывающих характер нагружения элементов соединений.

Для достижения этой цели представляется необходимым решить следующие задачи:

- провести анализ существующих стандартов и других нормативных документов для определения условных характеристик элементов соединения с позиций их применимости для расчета на прочность и проектирования механических соединений агрегатов ВС ТК из композитов;

- разработать и апробировать методы и средства для определения прочности слоистых композитов на смятие с учетом анизотропии и последовательности укладки слоев по толщине, на основе чего для широко используемого на ГП «Антонов» углепластика синтезировать инженерные расчетные зависимости;

- предложить эффективные образцы и устройства для экспериментального определения прочности композита на срез и межслойный сдвиг, а по результатам исследований обосновать практические рекомендации для разработчиков;

- синтезировать методику и средства экспериментального определения коэффициента концентрации напряжений у просверленного отверстия в углепластике, позволяющие исследовать снижение несущей способности детали при ненагруженном и регламентировать нагруженном отверстии, что соответствует характеру распределения усилий в многорядном соединении;

- для расчета распределения усилий по рядам крепежных элементов механического соединения разработать экспериментальное обеспечение определения коэффициентов податливости с учетом характера нагружения.

Выводы

1. Проведенная дифференциация (декомпозиция) комплексной проблемы создания отечественных гражданских самолетов транспортной категории позволила выделить основные составляющие этой проблемы.

2. Анализ принципиальной блок-схемы одного из важных секторов декомпозиции принятия проектных решений, взаимосвязывающей составляющие проблемы выбора эффективных конструкционных материалов, ориентированного на ПКМ, синтеза КСС агрегата и синтеза КТР агрегатов, узлов и деталей, позволил сформулировать основные требования к системе экспериментального обеспечения и проверки проектных решений для агрегатов ВС ТК из ПКМ и наметить основные задачи, обеспечивающие формирование этой системы.

Список использованных источников

1. Проектирование самолетов: учебник для вузов [Текст] / С.М. Егер, В.Ф. Мишин, Н.К. Лесейцев и др.; под ред. С.М. Егера. – М.: Машиностроение, 1983. – 616 с.

2. Кива, Д.С. Научные основы интегрированного проектирования самолетов транспортной категории: моногр. – Ч. 2 [Текст] / Д.С. Кива, А.Г. Гребеников. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2014. – 326 с.

3. Донник, В.Д. Исследование газодинамических процессов при внезапной разгерметизации отсека внутри фюзеляжа [Текст] / В.Д. Донник, А.З. Двейрин // Вестн. Нац. техн. ун-та Украины «Киев. политехн. ин-т». Машиностроение. – Вып. 46. – К., 2005. – С. 133 – 137.

4. Донник, В.Д. Внезапная разгерметизация отсека внутри фюзеляжа [Текст] / В.Д. Донник, А.З. Двейрин, С.А. Воропаев // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 34. – Х., 2007. – С. 29 – 35.

5. Донник, В.Д. Моделирование газодинамических и аэроакустических процессов при внезапной разгерметизации отсеков летательного аппарата [Текст] / В.Д. Донник, А.З. Двейрин // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 63. – Х., 2014. – С. 134 – 151.

6. Проектирование конструкции фюзеляжа и интерьера пассажирского самолета с учетом требований обеспечения травмобезопасности [Текст] / А.З. Двейрин, С.А. Воропаев, В.В. Мерзлюк и др. // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4(51). – Х., 2007. – С. 163 – 169.

7. Антонов, О.К. За безопасность полетов. Сборник материалов по борьбе с летными происшествиями [Текст] / О.К. Антонов. – К.: Киев. механ. з-д, 1972. – 158 с.

8. Бычков, С.А. Концепция развития компьютерных интегрированных технологий в процессе создания авиационной техники [Текст] / С.А. Бычков, А.Г. Гребеников // Технологические системы. – К.: УкрНИИАТ, 1999. – Вып. 1. – С. 60 – 67.

9. Кива, Д.С. Научные основы интегрированного проектирования самолетов транспортной категории: моногр. Ч. 3 [Текст] / Д.С. Кива, А.Г. Гребенников. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2014. – 376 с.

10. Король, В.Н. Компьютеризация авиационного производства [Текст] / В.Н. Король // Информационные технологии в машиностроении. – К.: Техніка, 2001. – С. 98 – 104.

11. Метод интегрированного проектирования и компьютерного моделирования фюзеляжа гражданского самолета с помощью интегрированных систем CAD/CAM/CAE/PLM /А.Г. Гребеников, А.З. Двейрин, Ю.Н. Геремес, А.М. Гуменный // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 30. – Х., 2006. – С. 10 – 30.

12. Кива, Д.С. Научные основы интегрированного проектирования самолетов транспортной категории: моногр. Ч. 1 [Текст] / Д.С. Кива, А.Г. Гребеников. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2014. – 439 с.

13. Кучер, Н.К. Анализ деформирования и расчет жесткости и податливости слоистых тканых композитов [Текст] / Н.К. Кучер, А.З. Двейрин, М.П. Земцов // Вестн. Нац. техн. ун-та Украины «Киев. политехн. ин-т». Машиностроение. – Вып. 44. – К., 2003. – С. 47 – 51.

14. Модели деформирования и прочность композиционных материалов сатиновой структуры [Текст] / Н.К. Кучер, М.П. Земцов, А.З. Двейрин и др. // Надежность и долговечность машин и сооружений: междунар. науч.-техн. сб. – № 2(23), 2004. – С. 62 – 68.

15. Характеристики упругости слоистых тканых стеклопластиков [Текст] / Н.К. Кучер, А.З. Двейрин, М.П. Земцов и др. // Проблемы прочности: междунар. науч.-техн. журнал. – № 6(372), 2004. – С. 26 – 32.

16. Деформирование слоистых стеклопластиков, армированных тканью сатинового переплетения, при комнатной и низких температурах [Текст] / Н.К. Кучер, А.З. Двейрин, М.Н. Заразовский и др. // Механика композитных материалов. – Т. 40, № 3, - 2004. – С. 341 – 354.

17. Моделирование панелей хвостовой части фюзеляжа, выполненных из композиционных материалов, при помощи систем CAD/CAM/CAE [Текст] / Д.С. Кива, Ю.В. Попов, А.З. Двейрин и др. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии:

сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 27. – Х., 205. – С. 31 – 41.

18. Двейрин, А.З. Анализ эффективности внедрения интегральных конструкций с трубчатыми элементами из полимерных композиционных материалов [Текст] / А.З. Двейрин, Е.В. Майорова // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4(68). – Х., 2011. – С. 65 – 77.

19. Король, В.Н. Создание агрегатов самолетов из композиционных материалов – новые подходы, интегральные решения [Текст] / В.Н. Король, А.З. Двейрин, Е.Т. Василевский // Технологические системы: науч.-техн. журнал. – К. – №4(57). – 2011. – С. 32 – 35.

20. Кива, Д.С. Методы ремонта агрегатов планера самолетов из композиционных материалов с трубчатым наполнителем [Текст] / Д.С. Кива, А.З. Двейрин, Е.Т. Василевский // Технологические системы: науч.-техн. журнал. – К. – №2(63). – 2013. – С. 57 – 64.

21. Проектирование агрегатов фюзеляжа самолета из композитов [Текст] / А.З. Двейрин, В.А. Костюк, Я.О. Головченко и др. // Технологические системы: науч.-техн. журнал. – К. – №1(2). – 2014. – С. 38 – 42.

22. Тарнопольский, Ю.М. Особенности расчета деталей из армированных пластиков [Текст] / Ю.М. Тарнопольский, А.В. Розе. – Рига: Зинатне, 1969. – 274 с.

23. Композиционные материалы: справ. [Текст] / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др; под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.

24. Бычков, С.А. Проектирование и конструктивно-технологические решения балок и лонжеронов из композиционных материалов: учеб. пособие [Текст] / С.А. Бычков, Я.С. Карпов, А.А. Мудрый. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1997. – 85 с.

25. Воробей, В.В. Соединения конструкций из композиционных материалов [Текст] / В.В. Воробей, О.С. Сироткин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 168 с.

26. Карпов, Я.С. Проектирование деталей и агрегатов из композиционных материалов: учебник [Текст] / Я.С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2010. – 768 с.

27. Карпов, Я.С. Соединение деталей и агрегатов из композиционных материалов: учеб. пособие [Текст] / Я.С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2006. – 359 с.

Поступила в редакцию 15.09.2014.

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