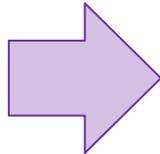
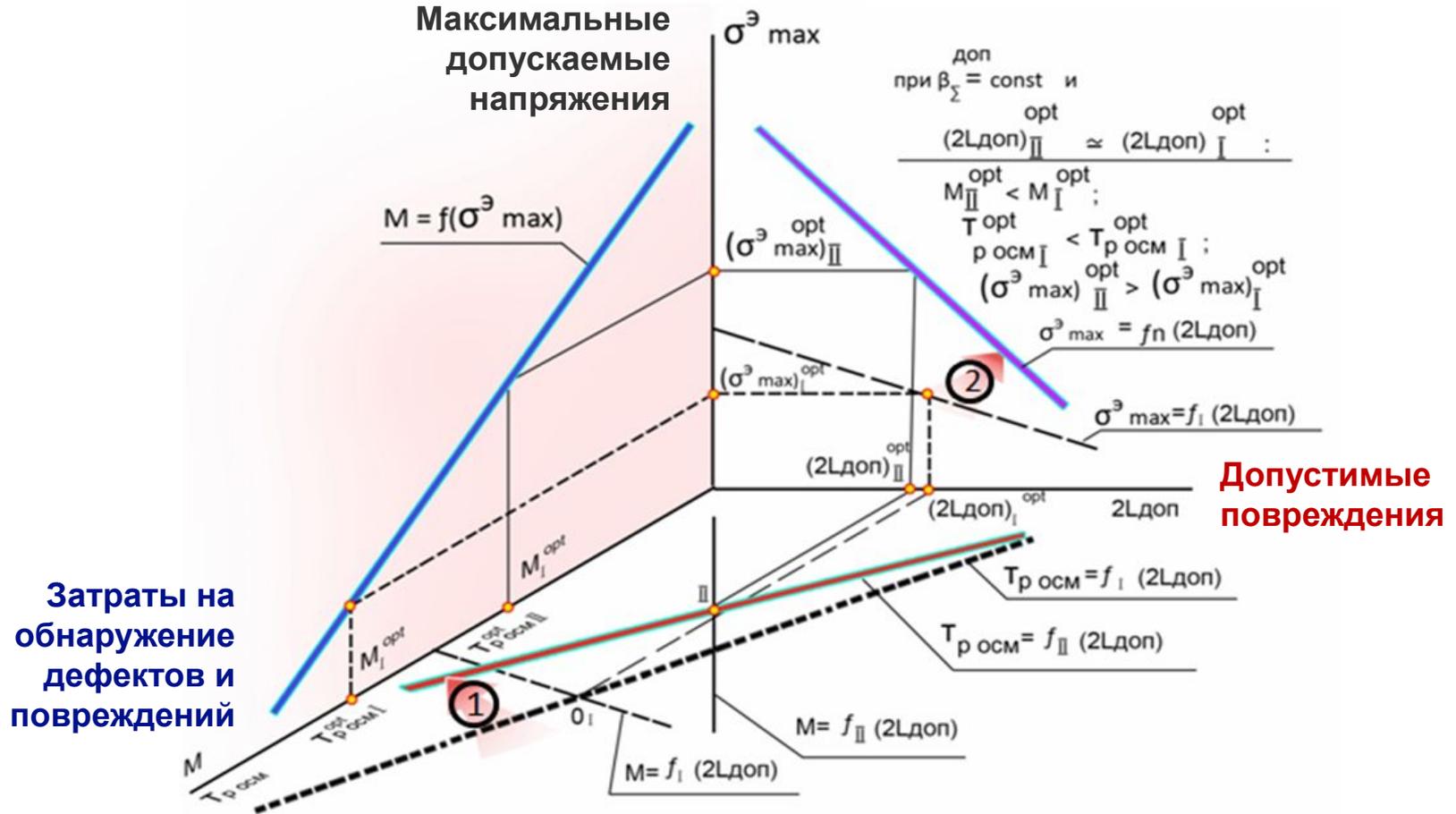


Разработка методов обоснования и установления соответствия отечественным и зарубежным сертификационным требованиям на основе внедрения методологии повышения весовой и экономической эффективности при обеспечении требуемого уровня безопасности парка силовых элементов планера самолёта, изготовленных из композиционных материалов

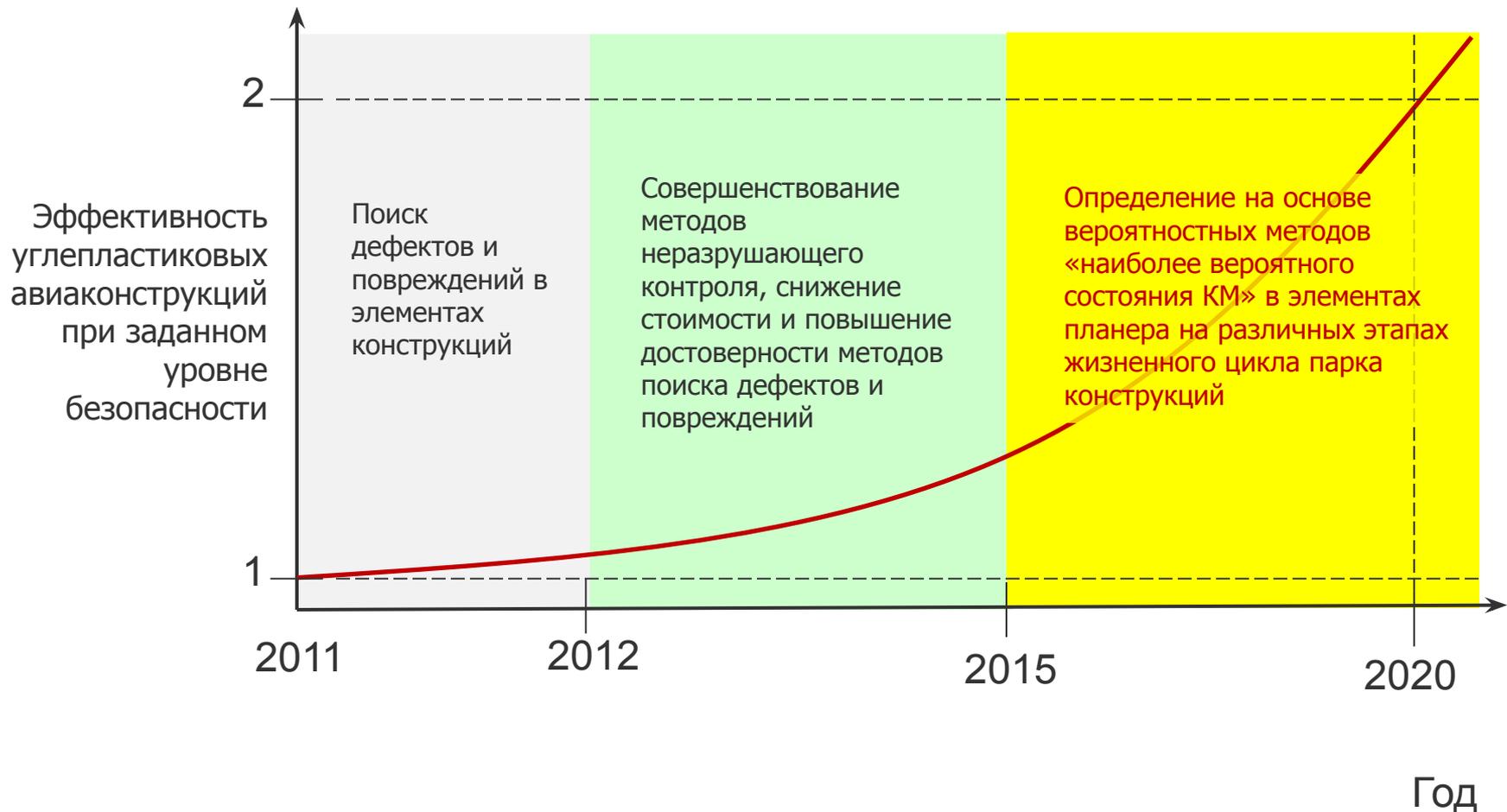


● **Введение**

- Цели
- Актуальность
- Задачи
- Направления исследований
- Создание рабочей группы



Перспективы повышения эффективности композитных авиаконструкций и реализации их конкурентных преимуществ



Обеспечение весовой и экономической эффективности высокоответственных конструкций из КМ при требуемом уровне безопасности

Обеспечение весовой и экономической эффективности конструкции из КМ при заданном уровне безопасности

Традиционный подход

- Борьба за повышение характеристик базовых материалов
- Отработка процессов производства без учёта стохастического характера реализации их параметров
- Детерминированный подход к определению диапазона допустимых отклонений параметров материалов и процессов

Опытное производство и малые серии



Отработка и «заморозка» техпроцесса

Серийное производство

Реализация неблагоприятного сочетания факторов, находящихся в допустимых пределах, приводящего к дефекту или повреждению



- Увеличение коэффициента безопасности
- Увеличения затрат на осмотры
- Увеличение затрат на ремонты

Низкая эффективность при обеспечении требуемого уровня безопасности («Чёрный алюминий»)

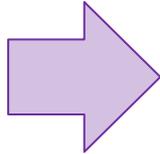
Инновационный подход

- Выбор и обоснование на основе вероятностных подходов рациональных свойств материала
- Выбор и обоснование на основе вероятностных подходов рациональных параметров технологических процессов
- Анализ на основе вероятностных подходов повреждаемости на всех этапах жизни конструкции

Учёт многофакторных сочетаний вероятных повреждений на всех этапах жизни изделия:
 свойства базовых материалов +
 производственные дефекты +
 эксплуатационные повреждения +
 эффективность мониторинга +
 особенности обслуживания +
 технологии ремонтов +

Определение «Наиболее вероятного состояния КМ» (обеспечение ничтожно малой вероятности критического повреждения для заданных условий производства и эксплуатации)

Обоснование дифференцированного подхода к определению коэффициента безопасности. Высокая эффективность при обеспечении требуемого уровня безопасности.

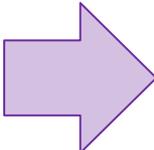


- Введение
- **Цели**
- Актуальность
- Задачи
- Направления исследований
- Создание рабочей группы

Цели работы

Разработка методов обоснования и установления соответствия отечественным и зарубежным сертификационным требованиям российских самолётов транспортной категории с крылом из КМ с учётом:

- реализации на этапах проектирования и конструирования последних достижений в области конструктивно-технологических решений, моделей прогрессирующего разрушения и вероятностных методов оценки безопасности парка конструкций
- реализация при их серийном производстве не имеющих аналогов в мире автоматизированных безавтоклавных технологий (вакуумной инфузии)
- реализация экспертных систем обработки и анализа данных на основе мониторинга состояния КМ при производстве и в эксплуатации

- Введение
- Цели
-  • **Актуальность**
- Задачи
- Направления исследований
- Создание рабочей группы



ТОиР

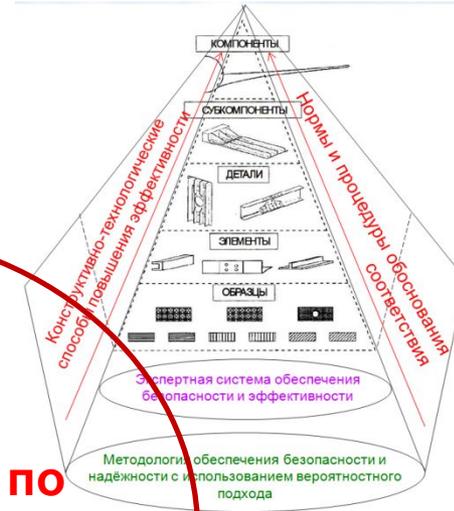


Эксплуатация

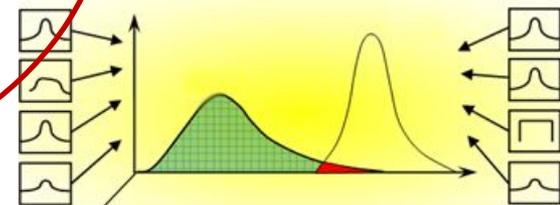


Производство

«Real-time» БД по расчётным характеристикам

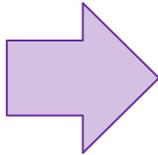


Building Block в инновационной постановке



Экспертная система прогноза безопасности ProDeCompoS

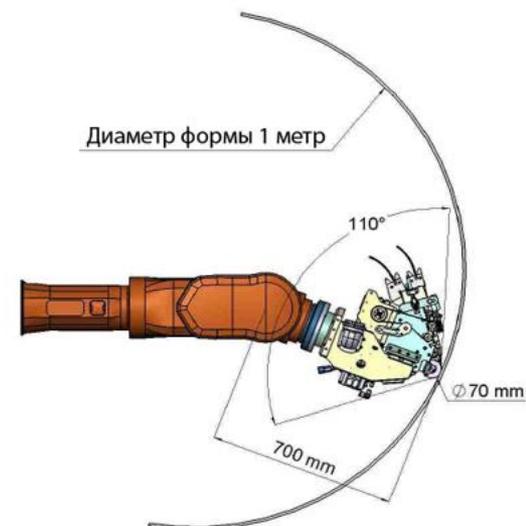
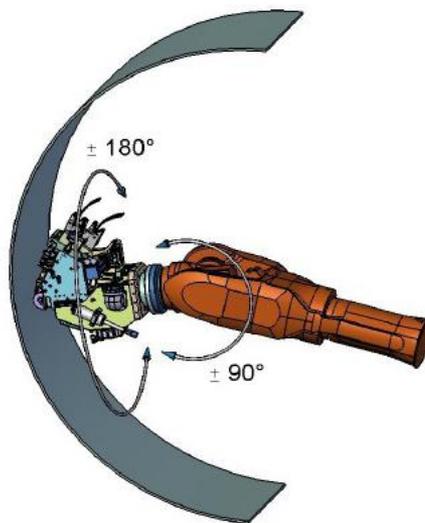
- Введение
- Цели
- Актуальность
- **Задачи**
- Направления исследований
- Создание рабочей группы



Задачи работы

- Разработка расчетно-экспериментальных методов обоснования технологических параметров автоматизированных безавтоклавных технологий, обеспечивающих снижение повреждаемости КМ в процессе производства и уровня разброса упруго-прочностных характеристик авиаконструкций из КМ
- Разработка на основе анализа повреждаемости КМ при производстве и эксплуатации методики формирования баз данных по расчетным характеристикам, характеризующим элементы планера из КМ, с целью их использования для прогноза безопасности и эксплуатационной технологичности парка авиационных конструкций с применением вероятностного подхода
- Разработка вероятностной методологии расчетного обоснования уровня безопасности парка авиаконструкций из КМ, учитывающей многофакторные сочетания вероятных повреждений композитных элементов планера (свойства базовых материалов + производственные дефекты + эксплуатационные повреждения + эффективность мониторинга + система наземного обслуживания + программа ремонтов + и т.д.) на основе анализа комплексной базы данных, наполняющейся в реальном времени по результатам мониторинга конструкции в условиях производства и эксплуатации и обеспечивающей возможность постоянного повышения достоверности используемых моделей прогноза прочности и ресурса

- Введение
- Цели
- Актуальность
- Задачи
- Направления исследований
 - ❖ **Определение «наиболее вероятного состояния КМ» с использованием расчетно-экспериментальных методов исследования технологических параметров автоматизированных безавтоклавных технологий**
 - ❖ Разработка на основе анализа повреждаемости КМ на всех этапах жизненного цикла методики формирования базы данных по расчетным характеристикам, характеризующим «наиболее вероятное состояние КМ»
 - ❖ Разработка вероятностной методологии расчетного определения уровня безопасности парка авиаконструкций из КМ, учитывающей многофакторные сочетания вероятных повреждений
- Создание рабочей группы



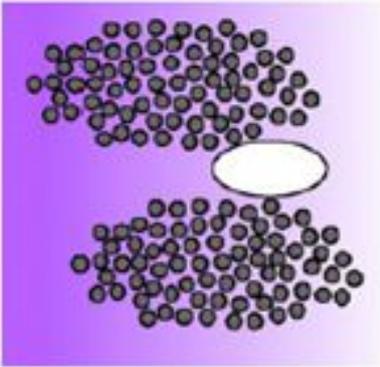
Разработка расчетно-экспериментальных методов исследования технологических параметров автоматизированных безавтоклавных технологий, обеспечивающих определение **«наиболее вероятного состояния КМ»**

Взаимодействие процессов при вакуумной инфузии

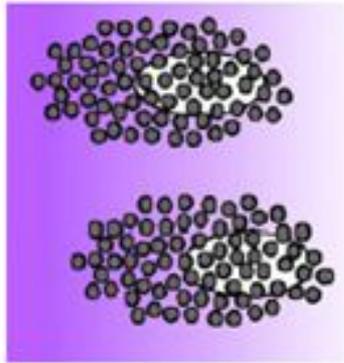




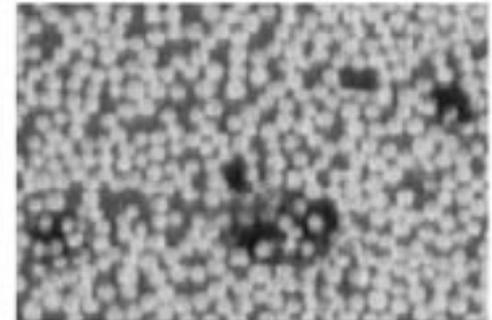
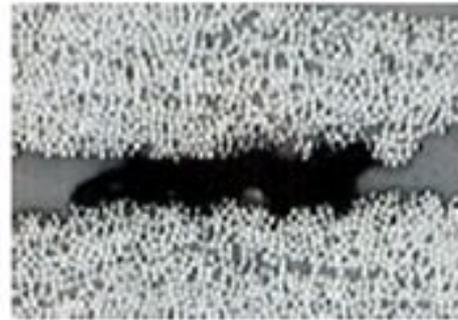
- К причинам наличия пористости в конечной детали относят:
- воздушные включения в связующем,
 - утечки в мешке и соединениях,
 - усадку связующего,
 - образование в ходе отверждения побочных летучих продуктов,
 - воздушные включения в ровинге между филаментами и между ровингами.



Макропора



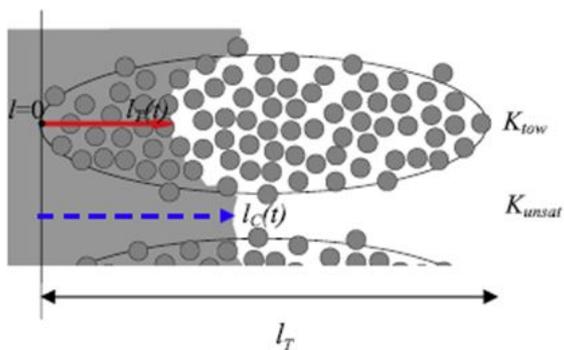
Микропора



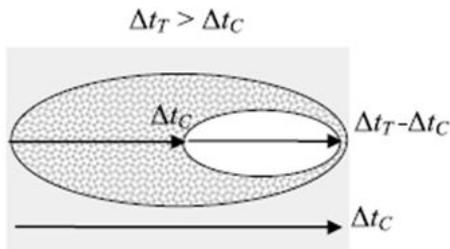
Механизм образования пор у фронта пропитки

В каналах между ровингами преобладает вязкий поток, а в каналах между филаментами – течение за счет капиллярного давления, скорость которого обратно пропорционально диаметру канала.

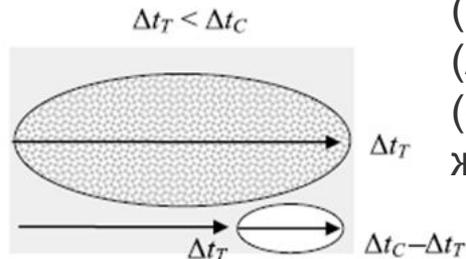
При инфузии порообразование является следствием взаимодействия этих процессов.



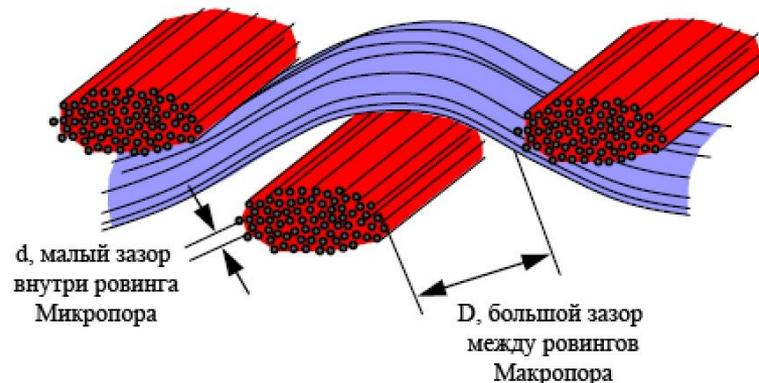
(a)



(b)



(c)

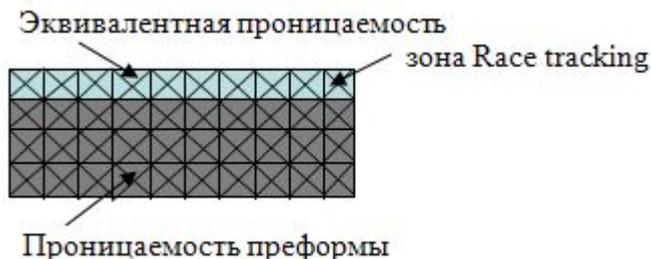


Структура
 текстильного наполнителя

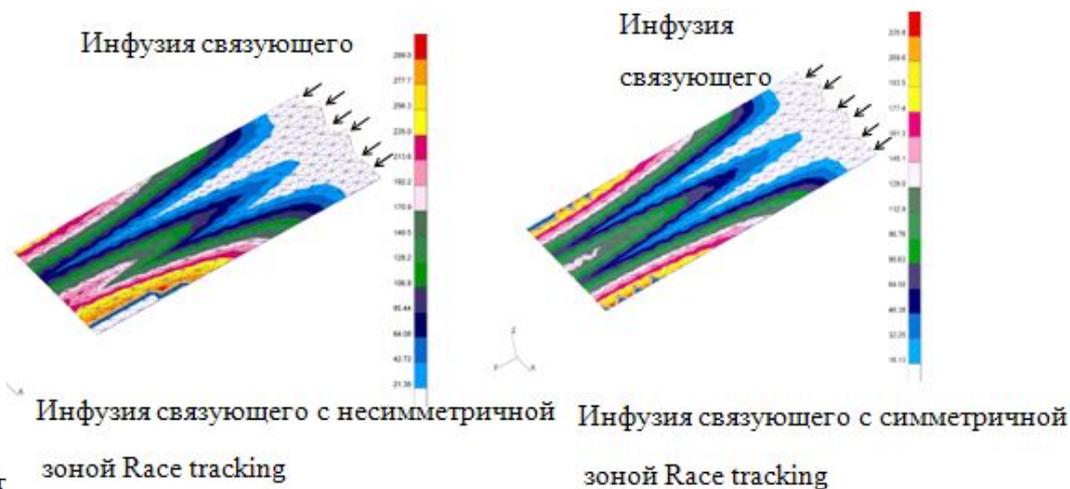
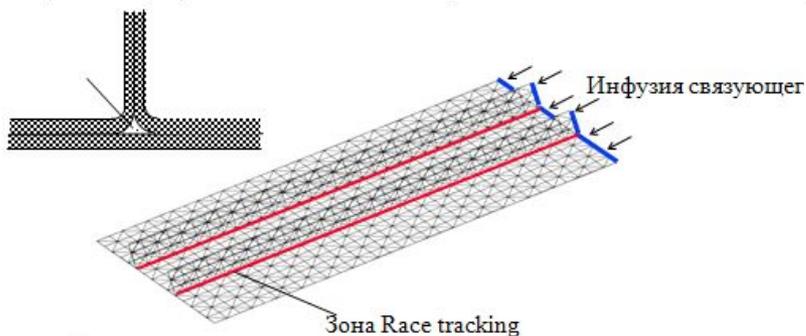
Схематичное изображение пропитки связующего. Два разных потока в между ровингами и филаментами
 (b) Воздушные включения внутри жгута ($\Delta t_T > \Delta t_C$: пора в микропоре).
 (c) Воздушные включения между жгутами ($\Delta t_T < \Delta t_C$: пора в макропоре)

Термин 'Race-tracking' используется для описания деформации фронта потока связующего из-за локального повышения проницаемости преформы. Race-tracking может возникнуть по краям, в углах и других сложных частях формы.

Для моделирования Race-tracking воздушные каналы и другие зоны с высокой пористостью в полости формы представляют в модели конечных элементов с помощью групп элементов, проницаемость которых выше, чем у элементов преформы объемной заготовки. Этот метод называют методом «эквивалентной проницаемости».



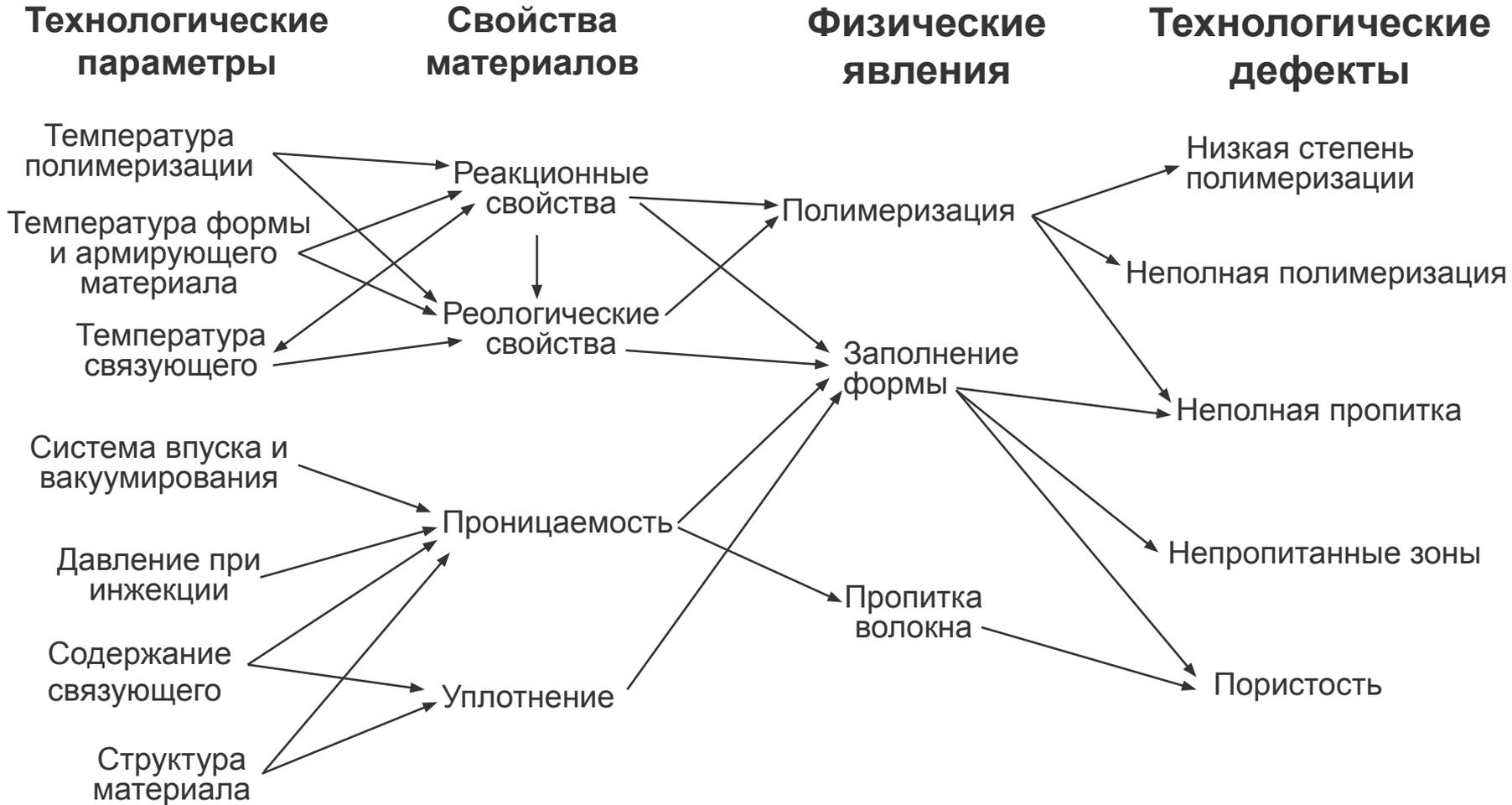
T-образный профиль с зоной Race tracking

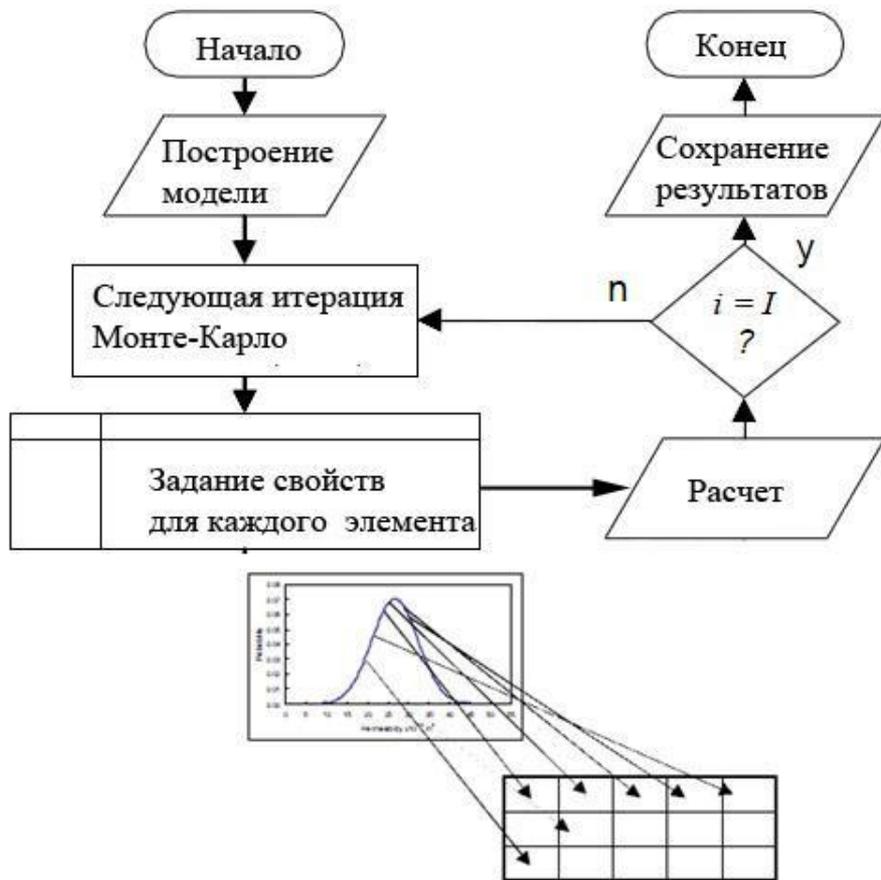


Для аналитической оценки эквивалентной проницаемости можно использовать следующее уравнение

$$k_{eq} = \frac{h^3 + 4h^2\sqrt{k_x} + 6hk_x}{12(\sqrt{k_x} + h)}$$

k_{eq} – это эквивалентная проницаемость в зоне Race tracking, k_x – проницаемость преформы, h – высота канала или гидравлический диаметр

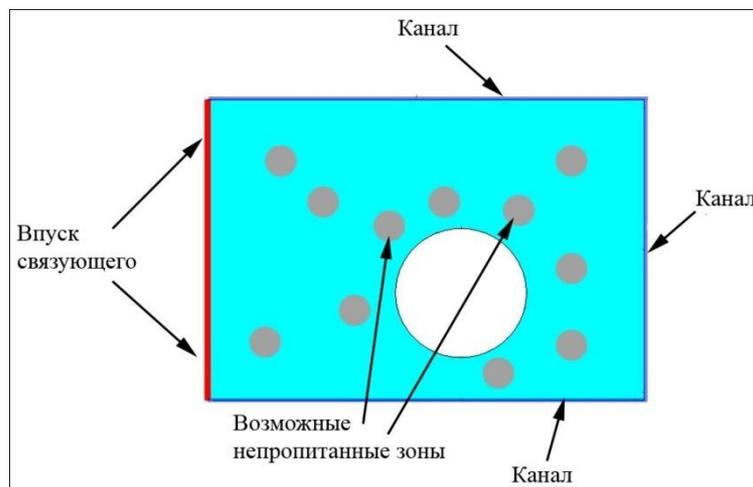
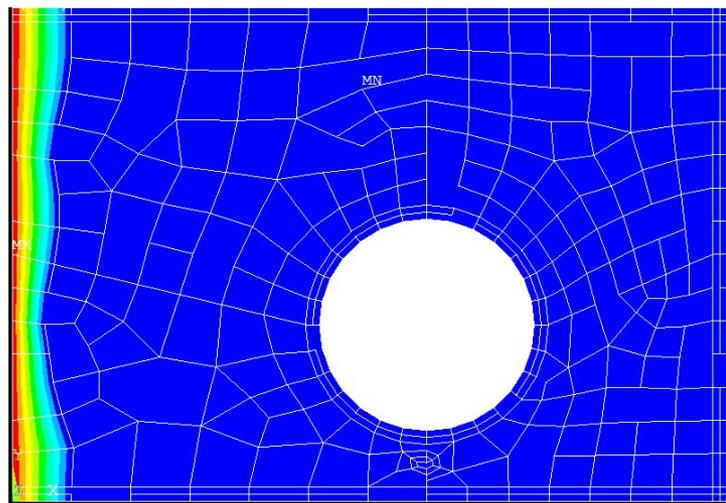
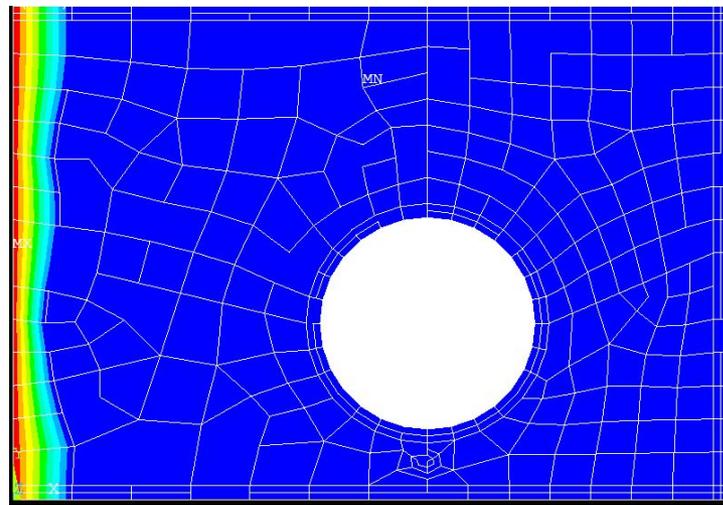
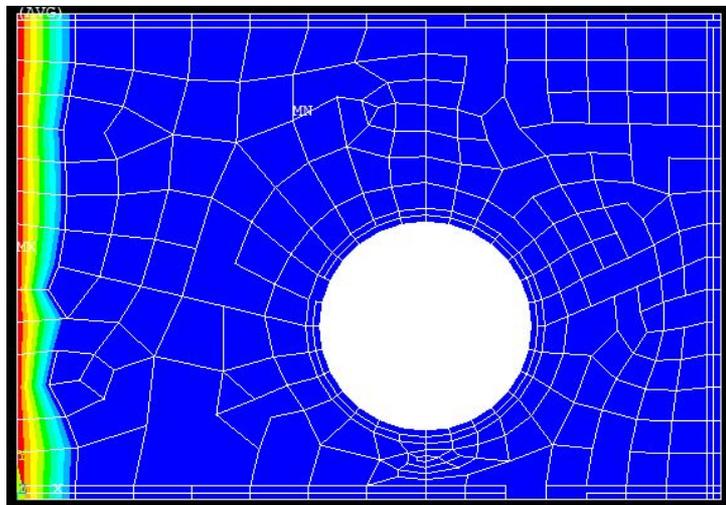




Алгоритм моделирования с учетом вариации данных

Свойства материалов

	Среднее [10^{-12} м^2]	Отклонение [10^{-12} м^2]
Проницаемость канала	57000	28000 (50%)
Проницаемость преформы	144	29 (20%)



ФАКТОРЫ	ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ	ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ
<p>Ударные воздействия</p> <ul style="list-style-type: none"> • Энергия удара • Форма и материал поражающего объекта • Структура композиционного материала 	<p>Данные для оценки повреждаемости при ударе:</p> <p>Низкоскоростные удары (повреждаемость при наземных работах)</p> <p>Среднескоростные удары (град, удар птицы, разрыв покрышки)</p>	<p>Данные при эксплуатации</p> <p>Экспертные оценки</p>
<p>Технологические факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Технологические режимы (давление при пропитке, температура) • Свойства материалов (проницаемость, химическая и термическая усадки, реакционная способность) 	<p>Данные для оценки дефектности при изготовлении:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Пористость • Непропитанные зоны • Расслоения • Свиленатость • Неравномерная полимеризация • Температурная деструкция 	<p>Данные по материалам от поставщиков</p> <p>Входной контроль материалов</p> <p>Технологические инструкции</p> <p>Выходной контроль изделий</p>

ФАКТОРЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ	ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ	ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ
<p>Повреждаемость при производстве: Закон Дарси для моделирования пропитки. Уравнение теплопроводности и кинетики полимеризации. Уравнения механики сплошных сред в термо-вязко-упругой постановке.</p>	<p>Описание возникновения пористости и непропитанных зон Неравномерная полимеризация, температурная деструкция. Поводки, расслоения, свилеватость при полимеризации и остывании</p>	<p>Данные по материалу от поставщиков Входной контроль материалов Технологические инструкции</p>
<p>Повреждаемость при эксплуатации: Уравнения движения. Определяющие соотношения для слоистых КМ. Критерии прочности. Модели контактного взаимодействия.</p>	<p>Низкоскоростные удары (повреждаемость при наземных работах) Среднескоростные удары (град, удар птицы, разрыв покрышки)</p>	<p>Данные по материалу от поставщиков Данные при эксплуатации Экспертные оценки</p>

ФАКТОРЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ	ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ	ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ
<p>Технологические дефекты: Пористость</p> <p>Пустоты и расслоения</p>	<p>Микромеханический подход к оценки влияния на жесткость, модели Budiansky and O'Connell и Rubin and Jerina. Модели оценки прочности: Nielsen и Mar-Lin Модели расслоения Chai and Babcock и Kassapoglou. Численное моделирование МКЭ при пространственном расположении расслоений модель VCCT</p>	<p>Данные по материалом от поставщиков Входной контроль материалов Технологические инструкции</p>
<p>Повреждаемость при эксплуатации: Сквозные пробоины. Трещины. Расслоения.</p>	<p>Сквозные пробоины: двухпараметрическая модель Трещины: Модель Mar-Lin</p>	<p>Данные при эксплуатации Экспертные оценки</p>

- Введение
- Цели
- Актуальность
- Задачи
- Направления исследований
 - ❖ Определение «наиболее вероятного состояния КМ» с использованием расчетно-экспериментальных методов исследования технологических параметров автоматизированных безавтоклавных технологий
 -  ❖ **Разработка на основе анализа повреждаемости КМ на всех этапах жизненного цикла методики формирования базы данных по расчетным характеристикам, характеризующим «наиболее вероятное состояние КМ»**
 - ❖ Разработка вероятностной методологии расчетного определения уровня безопасности парка авиаконструкций из КМ, учитывающей многофакторные сочетания вероятных повреждений
- Создание рабочей группы

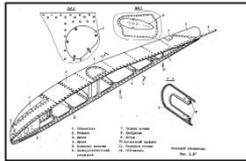
Создание системы анализа безопасности авиаконструкций в реальном времени

Предполётные и
послеполётные
осмотры



Встроенные системы
мониторинга нагрузок,
деформаций и
повреждений

КД по
парку ВС



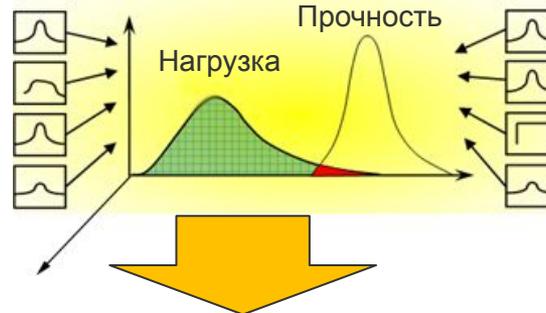
Методология сбора и анализа в реальном времени данных по повреждаемости на жизненном цикле (Real-Time БД)

Методики расчётного
анализа

Распределения характеристик повреждаемости: энергии, зоны, размеры, вероятности (Альбом Ударов)

Экспертная система ProDeComoS

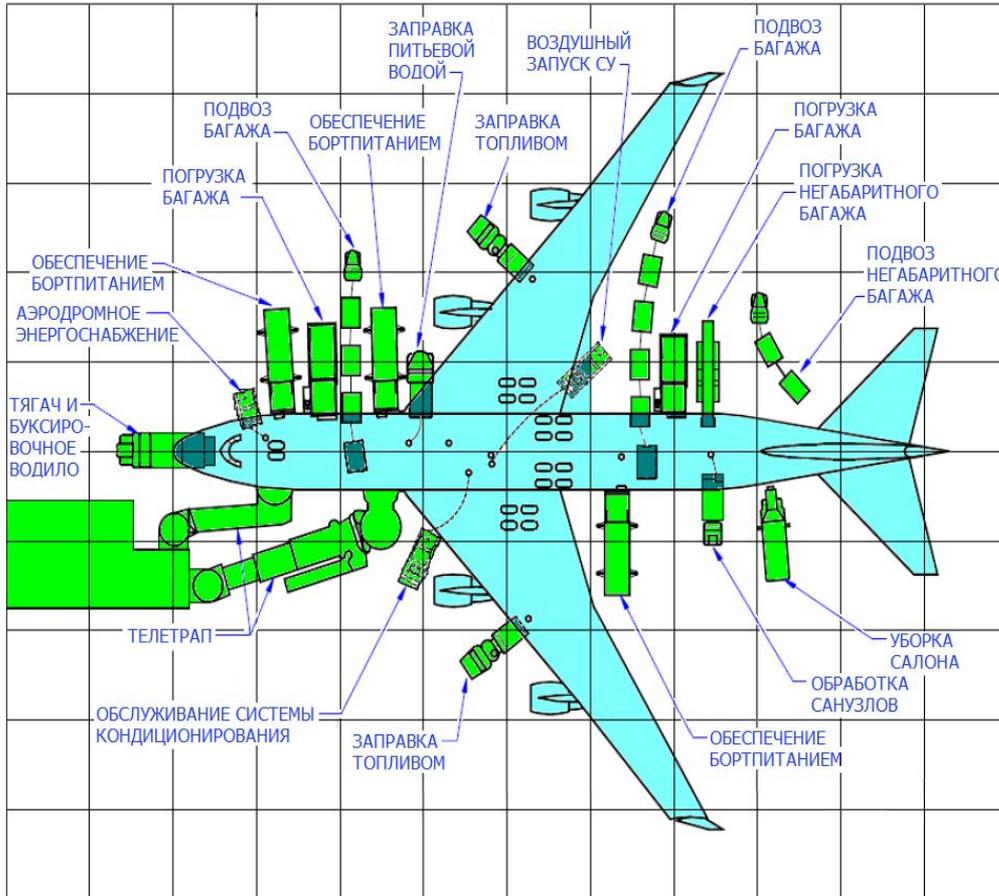
Учёт многофакторных сочетаний нагрузок, вероятных повреждений, системы ПЛГ в т.ч.:
свойства базовых материалов +
производственные дефекты +
эксплуатационные повреждения +
эффективность мониторинга +
особенности наземного обслуживания +
программа ремонтов +



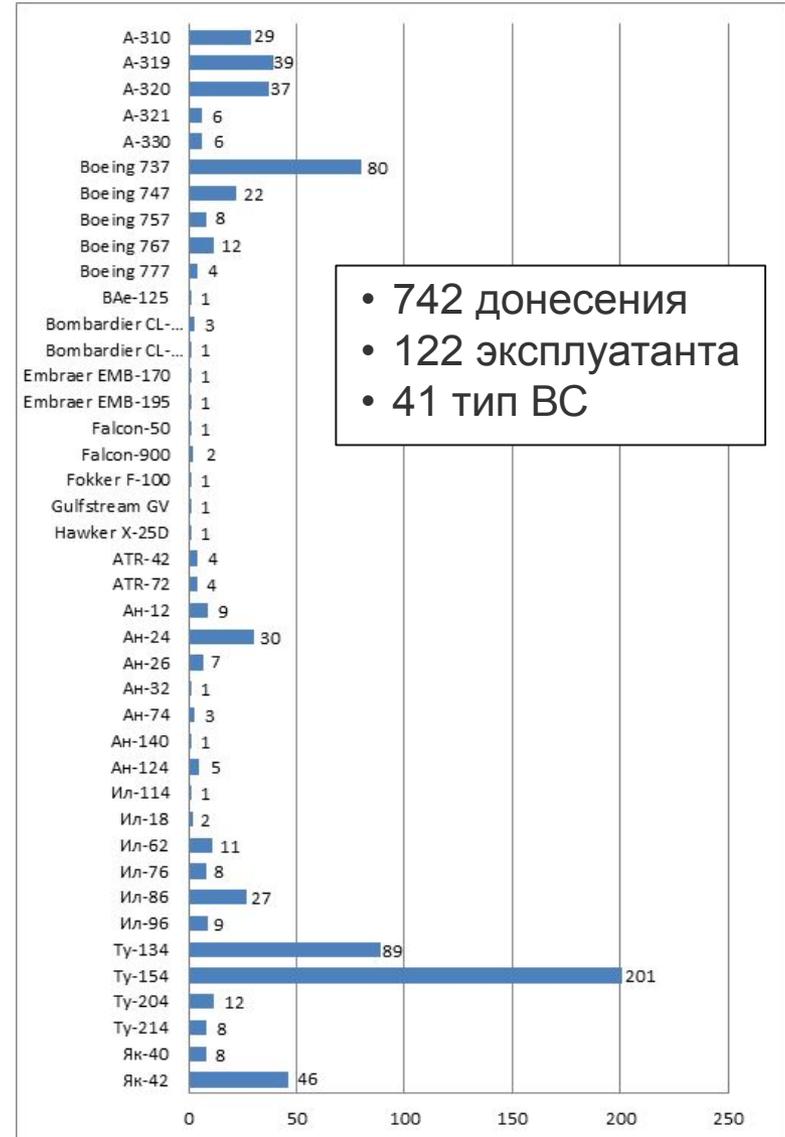
Постоянное повышение
достоверности используемых
моделей прогноза прочности и
ресурса

**Оценка безопасности парка ВС с
элементами планера из ПКМ**

Повреждаемость ВС при наземном обслуживании



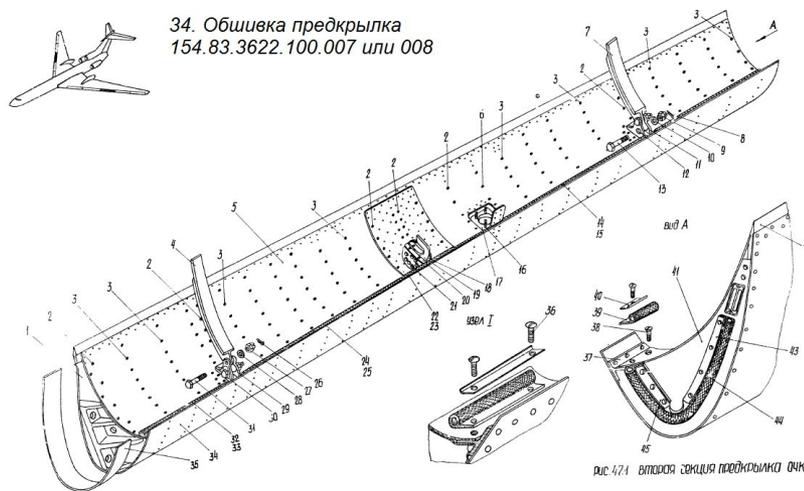
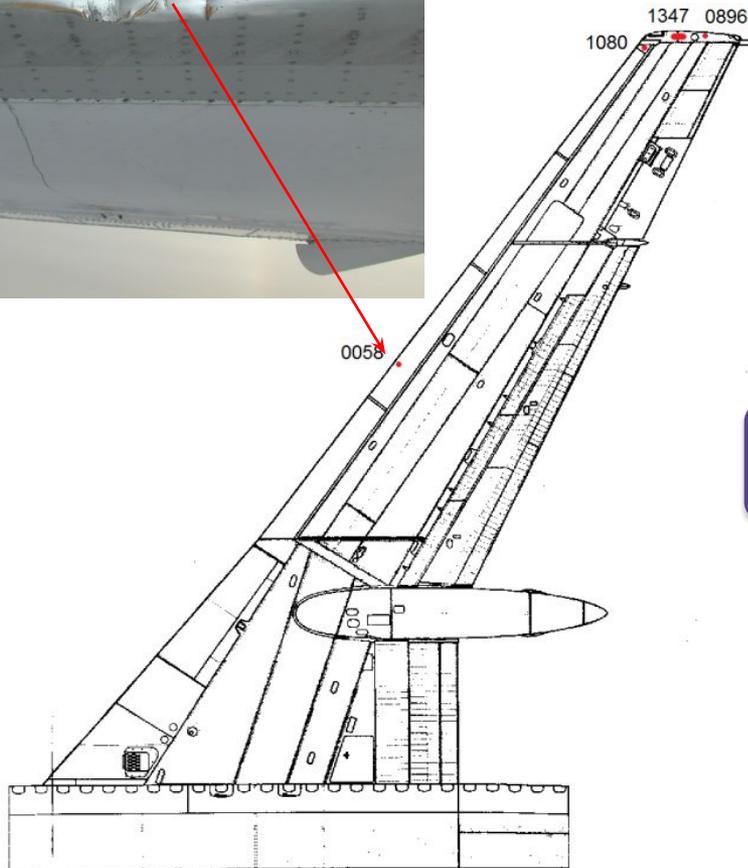
Источники повреждений при наземном обслуживании



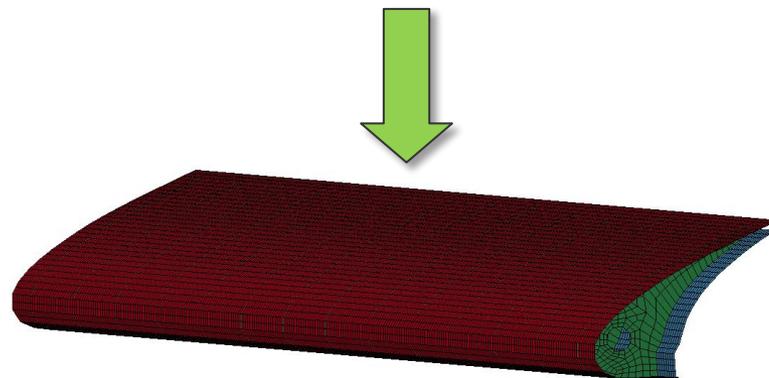


Восстановление энергии ударного воздействия (по вмятинам на крыльях Ту-154)

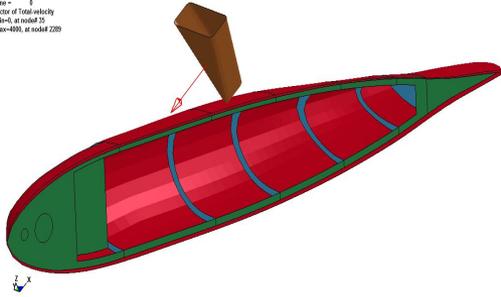
Повреждение предкрылка



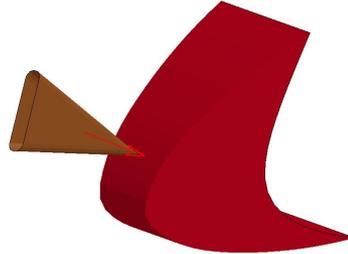
На основе найденной КД предкрылка Ту-154 построена конечно-элементная модель



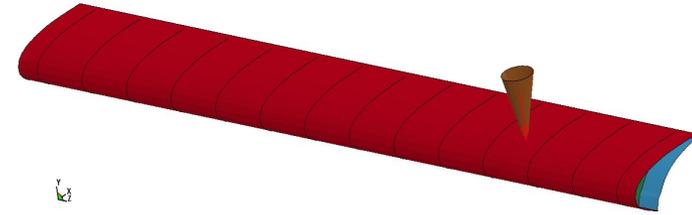
Time = 1
 Vector of Total velocity
 min=0, at node 20
 max=400, at node 2289



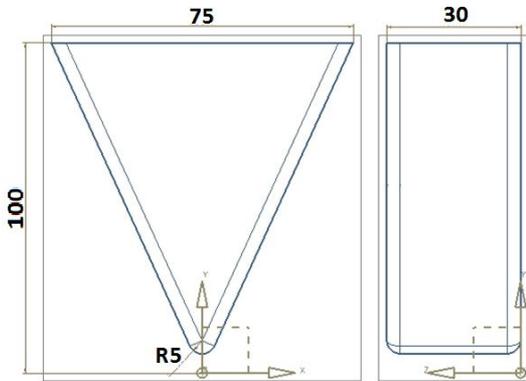
- Законцовка крыла
- Энергия удара 185 Дж



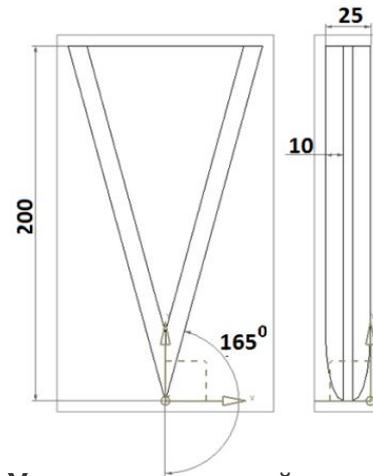
- Носок крыла
- Энергия удара 53 Дж



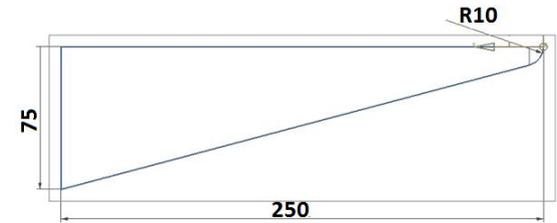
- Предкрылок
- Энергия удара 98 Дж



Ударник – плоский клин



Ударник – острый клин



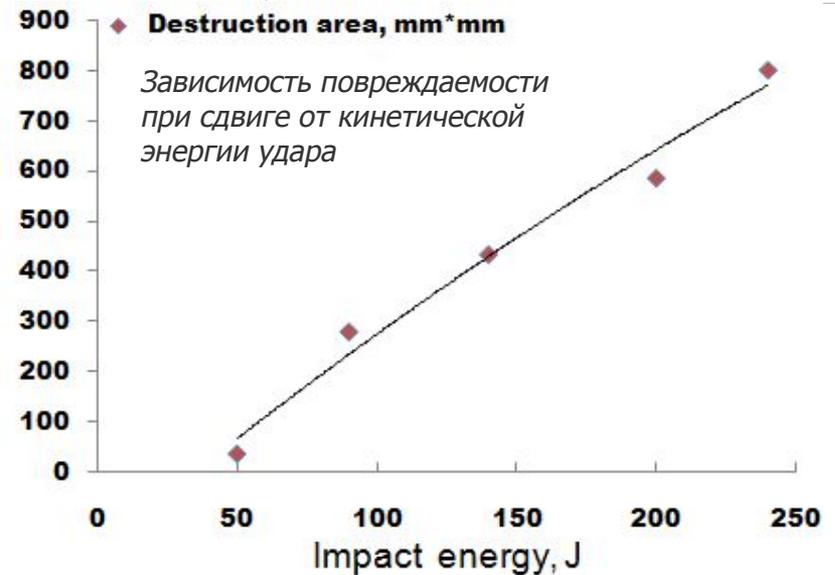
Конический ударник со сферическим навершием

Расчетный анализ повреждаемости кессона крыла из ПКМ методом прямого КЭ-моделирования ударного воздействия на выделенный участок кессона крыла (ВУК)

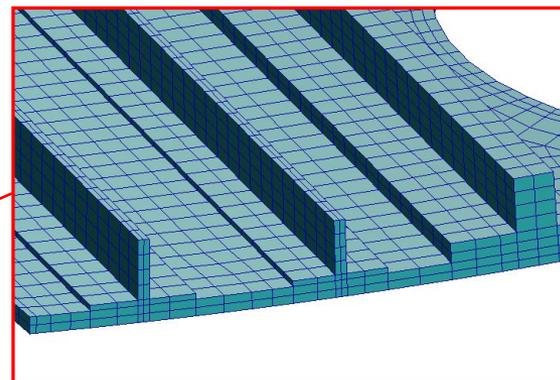
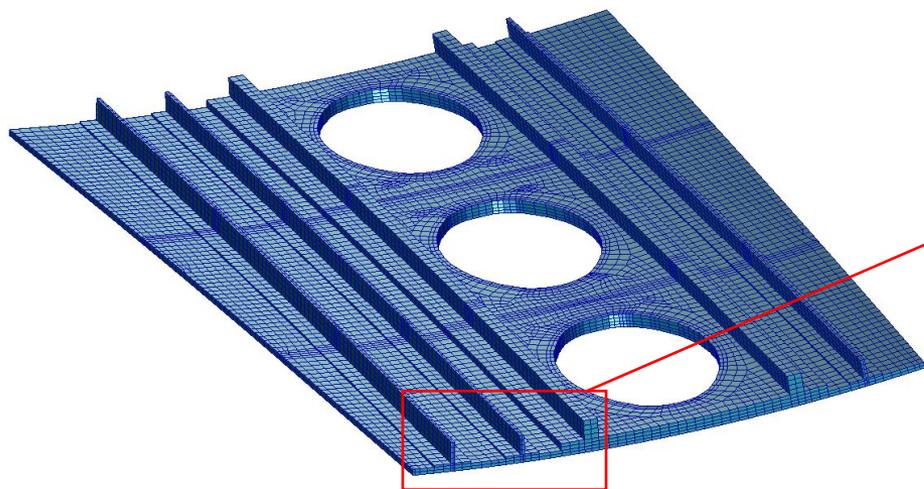
Положение ВУК относительно глобальной модели кессона

Конечно-элементная модель ВУК

- ВУК включает:
1. Фрагмент обшивки нижней панели крыла
 2. Фрагмент пояса лонжерона
 3. Фрагменты 10-го (3) и 11-го (4) стрингеров, ограниченные нервюрами 2 и 3



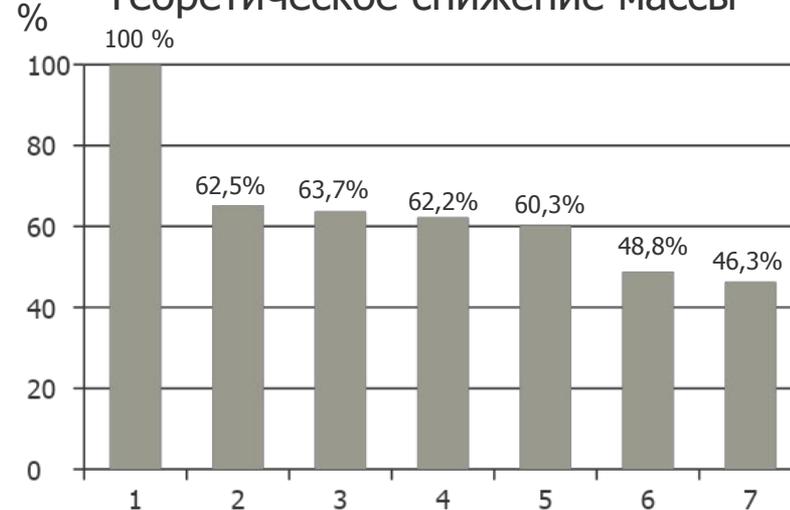
Конструктивно-технологические способы повышения эффективности нижних панелей крыла из углепластика путём снижения напряжений на краях люков



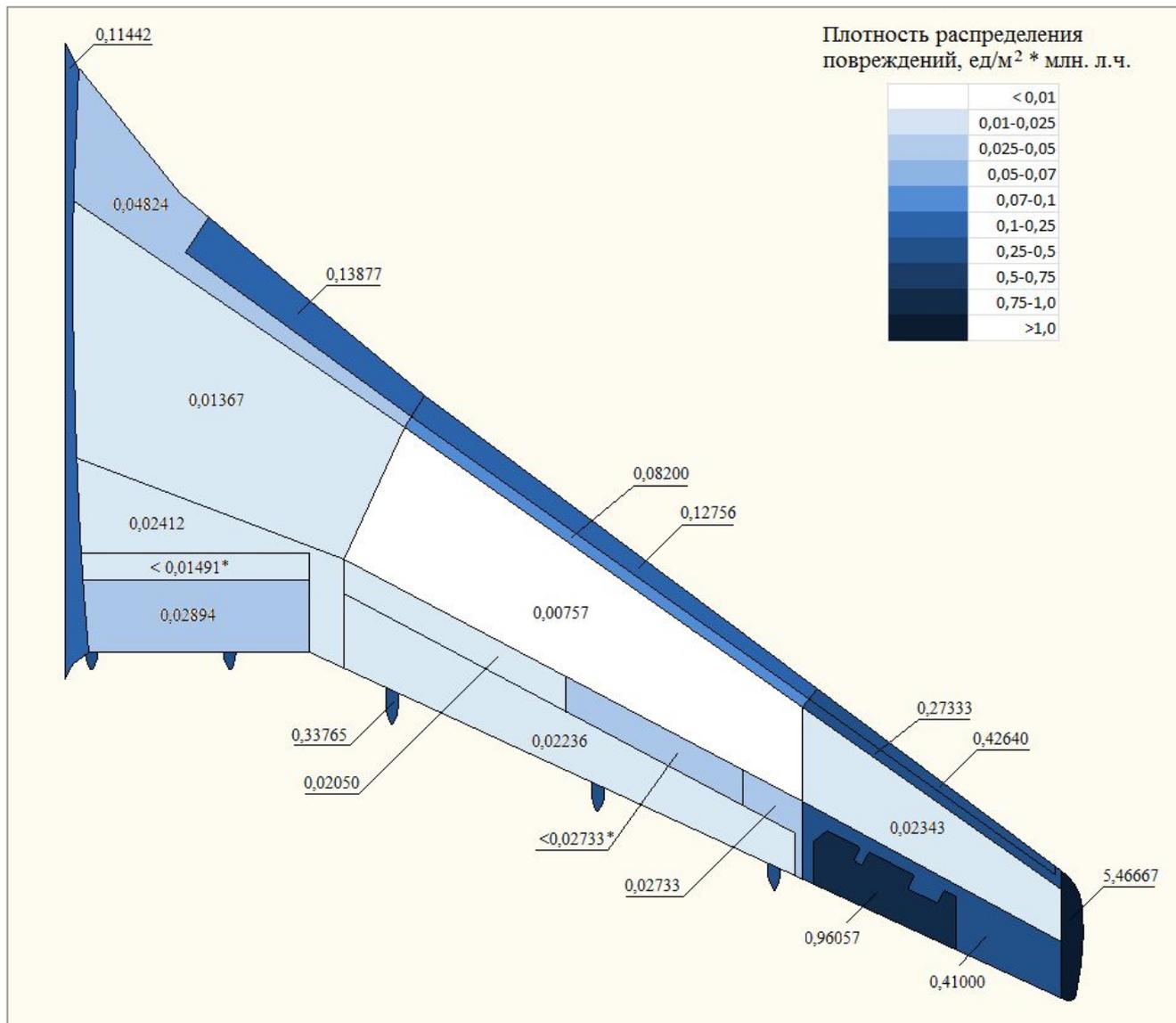
Конструктивно-технологический способ

Вариант	Уменьшенная толщина обшивки в районе отверстия	Разный материал обшивки и бимсов	Усиление ближнего бимса	Изогнутый бимс	Максимальное напряжение по Мизесу, МПа
1	-	-	-	-	471 (100%)
2	+	-	-	-	307 (65,2%)
3	+	-	+	-	300 (63,7%)
4	+	-	-	+	293 (62,2%)
5	+	-	+	+	284 (60,3%)
6	+	+	+	-	230 (48,8%)
7	+	+	+	+	218 (46,3%)

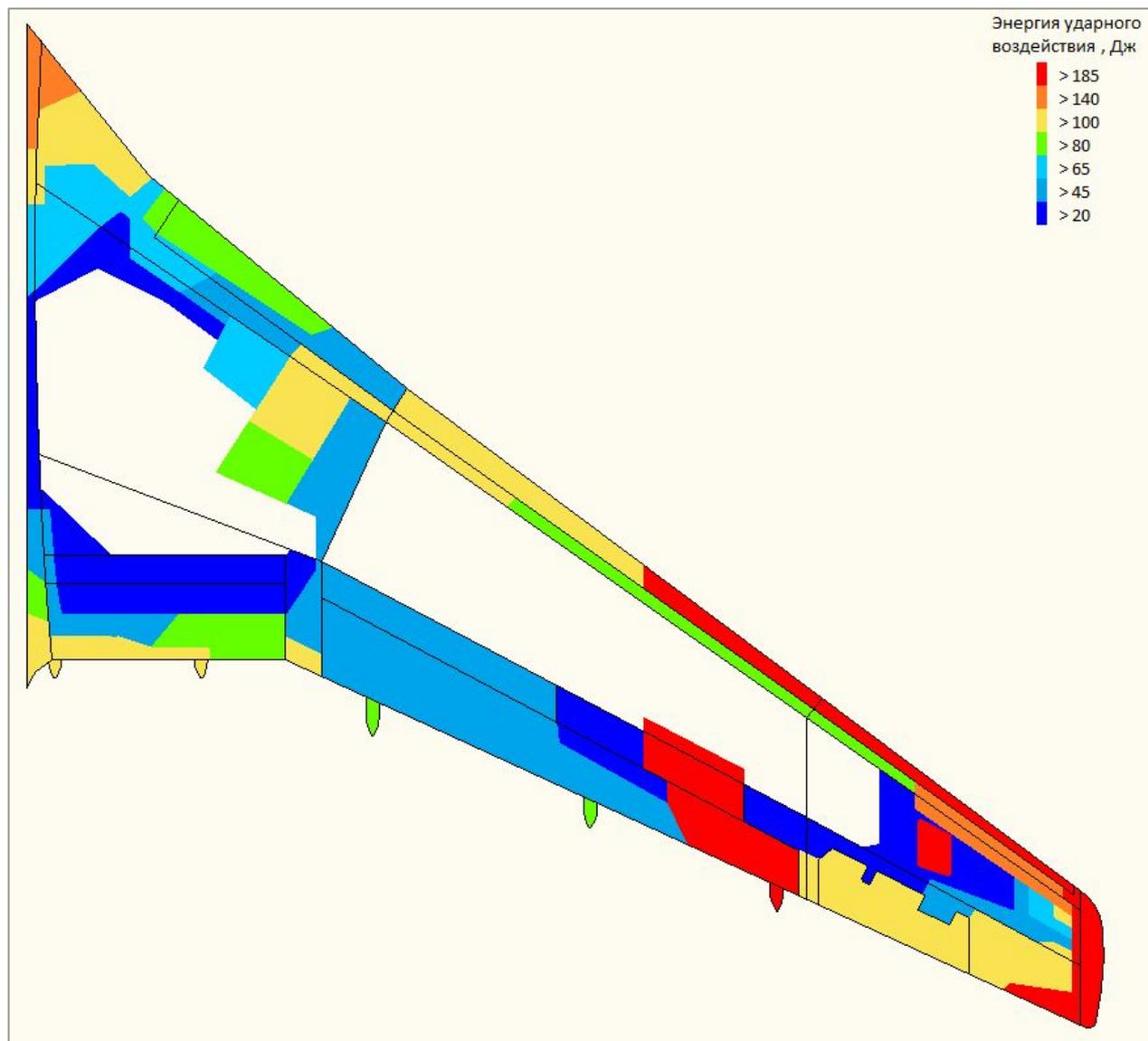
Теоретическое снижение массы



Плотность распределения повреждений по зонам крыла на 1 м² за 1 млн. лётных часов



Распределение энергий ударных воздействий по зонам крыла



- Введение
- Цели
- Актуальность
- Задачи
- Направления исследований
 - ❖ Определение «наиболее вероятного состояния КМ» с использованием расчетно-экспериментальных методов исследования технологических параметров автоматизированных безавтоклавных технологий
 - ❖ Разработка на основе анализа повреждаемости КМ на всех этапах жизненного цикла методики формирования базы данных по расчетным характеристикам, характеризующим «наиболее вероятное состояние КМ»
 -  ❖ **Разработка вероятностной методологии расчетного определения уровня безопасности парка авиаконструкций из КМ, учитывающей многофакторные сочетания вероятных повреждений**
- Создание рабочей группы

Применение вероятностного подхода для прогноза безопасности и определение коэффициентов надёжности

Различные формы разрушения

Прочность/жесткость = $f(T^\circ)$

Влажность = $f(\text{время})$

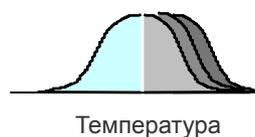
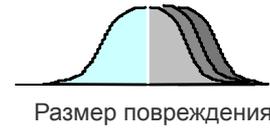
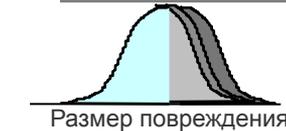
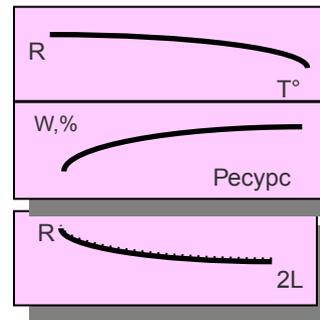
Остаточная прочность/жесткость = $f(\text{размер/тип повреждения})$

Вероятность обнаружения размер/тип повреждения)

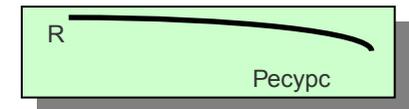
Максимальная нагрузка = $f(\text{время с повреждением})$

Спектр размеров/типов повреждения

Спектр температур



Деградация прочности/жесткости из-за климатических воздействий



Вероятность разрушения

Интервал между осмотрами, критерии качества ремонта, риск

Определение коэффициентов безопасности с использованием детерминистического и вероятностного подходов

условия
 производства и
 эксплуатации

модель
 повреждения и
 разрушения ПКМ

Воздействие окружающей среды:

- экстремальные спектры изменения факторов (t, P, влажность, УФ)
- циклы температуры, влагонасыщения
- молния и град

Коэффициенты безопасности:

- по остаточной прочности f_{Pc}
- по продолжительности развития повреждений – η_{nc}
- по снижению характеристик за срок службы – $f_{кл}$
- по числу спектра факторов окружающей среды – $\eta_{кл}$

Определение коэффициента безопасности:

Детерминистический:
 $K_H = f_{Pc} f_{Pc} f_{кл} \eta_{кл} = 2.19$

Вероятностный
 $K_H = 1.60$

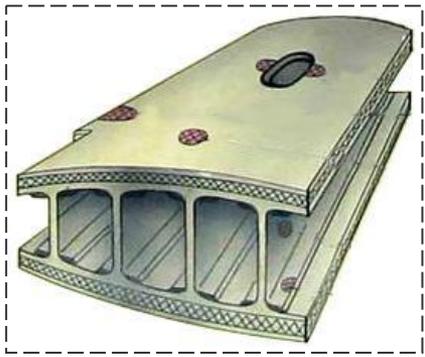
Требуемые характеристики:

- контролепригодности
- ремонтпригодности
- удельной трудоемкости обслуживания

Повреждаемость

- расчетные технологические дефекты
- интенсивности появления ударных воздействий
- особые случаи

Снижение массы на 37%



Летательный аппарат

Летательный аппарат

Информаци о ЛА Производитель Заводской номер Бортовой номер Дата выпуска	Производитель Туpoleв Илюшин Антонов ГСС
Туpoleв Ту-134 Ту-154 Ту-204/214	Илюшин Ил-86 Ил-96 Ил-114
Антонов Ан-24 Ан-72/74 Ан-124 Ан-140 Ан-148	ГСС SSJ-100

Описание повреждения

Описание повреждения

Повреждение Нарботка на момент происшествия Дата происшествия Фаза эксплуатации Фото/эскиз Описание Источник возникновения Характеристика повреждения Описание поврежденного элемента	Фаза эксплуатации Стоянка Разбег Полет Посадка Неустановленно
Источник возникновения Град Птица Посторонние предметы Инструменты Неустановленно	Характеристика повреждения Тип повреждения Размеры
Поврежденный элемент Название Место Размеры повреждения Толщина элемента Материал	Размеры Длина Ширина Глубина

Анализ повреждения

Анализ повреждения

Расчетные модели Композиционный материал Металл	Тип КЭ Solid Shell Cohesive
Результат	

Платформы



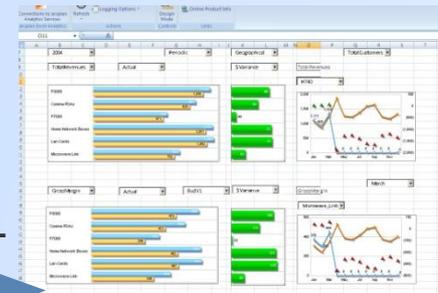
XML



API/XML



Прикладные программы



Аппаратная платформа сервера: 64-х битная система семейства системы Windows NT

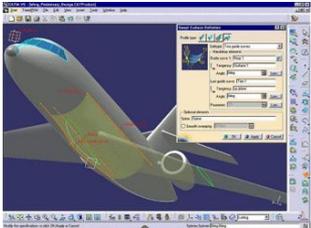
Аппаратная платформа клиента: любая (Windows, Linux, iOS, MacOS)

Язык программирования ПК: C++, Fortran, Python, R и др.

База данных: MySQL, Oracle

Особенности: интерфейс программирования приложений (API) ProDeCompoS, защита данных, обмен данными и результатами расчетов между прикладными программами и сервером ProDeCompoS с помощью API/XML

Проектирование

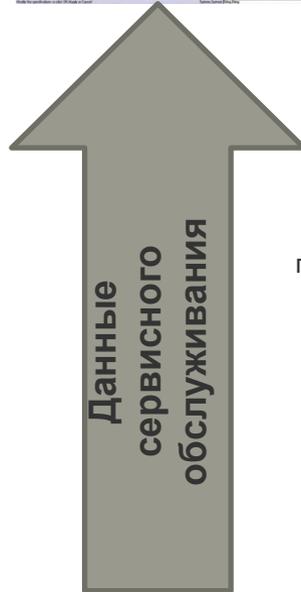
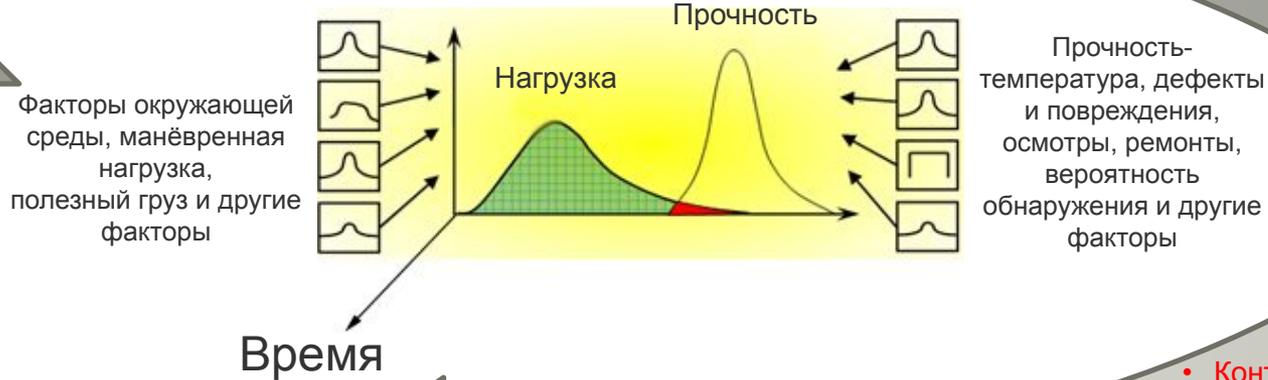


- Образцы
- Элементы
- Детали
- Субкомпоненты
- Компоненты



Сертификация

Вероятностная оценка риска



Готовность флота

- Проверка и ремонт
- Жизненный мониторинг
- Описание допустимых дефектов
- Контроль качества

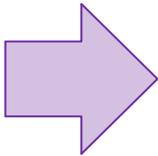


Производство



Эксплуатация и ремонт

- Введение
- Цели
- Актуальность
- Задачи
- Направления исследований
- **Организационно-технические рекомендации по созданию рабочей группы в обеспечение сертификации самолета с композитным крылом**



- Технология автоматизированной выкладки сухого волокна совместно с вакуумной инфузией не использовалась ранее ни одним авиапроизводителем
- Необходимость использования методологии повышения весовой и экономической эффективности композитного крыла при обеспечении требуемого уровня безопасности
- Отсутствие стратегии («Road Map») создания и внедрения требуемых методов неразрушающего контроля композитных конструкций в процессе производства и эксплуатации
- Отсутствие стратегии («Road Map») создания и внедрения требуемых методов ремонта композитных элементов планера

Проблемы, осложняющие валидацию российского сертификата типа в FAA и EASA

- Отсутствия соглашения о взаимном признании Сертификата Типа между FAA и AP МАК в части композиционных материалов
- Отсутствие опыта FAA и EASA в области сертификации элементов планера, изготовленных методом вакуумной инфузии
- Отсутствие центров компетенции, способных выполнять экспертизу в области авиаконструкций, изготовленных методом вакуумной инфузии, а также внедрения методологии повышения весовой и экономической эффективности композитного крыла при обеспечении требуемого уровня безопасности

Система разработки и валидации методов обоснования и установления соответствия требованиям сертификационного базиса

Обучение персонала методам ремонта и контроля конструкций КМ (SRM)



Создание методов обоснования в сотрудничестве с научно-исследовательскими центрами компетенций

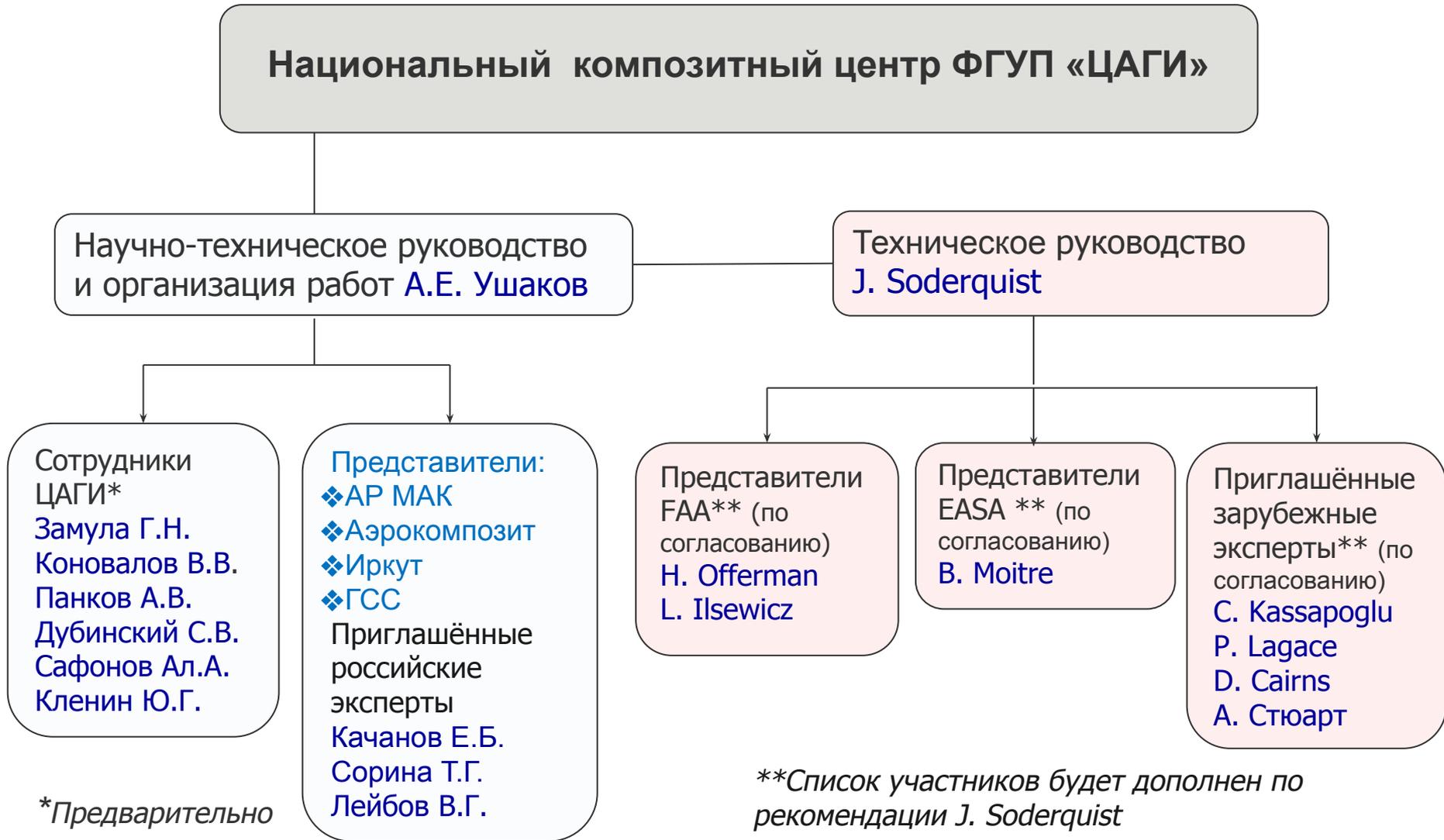
Методы обоснования и установления соответствия требованиям сертификационного базиса

Валидация методов в FAA и EASA и в виде отраслевых технических документов: рекомендаций, инструкций и руководств



CMH-17
COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK

Апробация методов и технических решений на форумах CMH-17



- ❖ FAA Structures Designated Engineering Representative (DER) with authorized area of delegated functions in Composite Materials and Processes & Damage Tolerance
- ❖ Has been involved in the certification of more than 70 aircraft, certificated under FAA Parts 23, 25, 27, and 29, employing composite materials in primary structure
- ❖ FAA Chief Scientific and Technical Advisor for Advanced Composite Materials
- ❖ Member of FAA's Senior Advisory Composite Committee
- ❖ Responsible for advanced composite material training, structural certification consultation, and national research program planning
- ❖ Editorial Board Member of the Journal of Composites Materials
- ❖ Worked on many of the significant aircraft and spacecraft development programs in the 1960's and 1970's.

- **Henry Offerman**, Designated Engineering Representative of FAA, USA
- **Bruno Moitre**, ENAC (Italian Civil Aviation Authority) Program Manager, EASA member, Italy
- **Christos Kassapoglu**, TU Delft, former certification engineer of composite aircrafts (Starship, e.t.c.), Netherlands
- **Andrei Stuart**, Gulfstream Aerospace Corporation, expert in probabilistic approach, USA
- **Larry Ilsewicz**, Chairman of CMH-17, Designated Engineering Representative of FAA, USA – *to be confirmed*

- Сформулировать предложения по созданию и обеспечению функционирования международного консорциума по сертификации самолёта транспортной категории с цельнокомпозитным крылом и сформировать перечень предлагаемых участников консорциума, включая представителей FAA и EASA
- Подготовить для рассылки и организовать обсуждение с членами рабочей группы сертификационного базиса для самолёта транспортной категории с цельнокомпозитным крылом
- Подготовить предложения по применению вероятностных подходов при сертификации самолёта транспортной категории и организовать обсуждение данной темы в рамках заседания СМН-17 («Probabilistic Day»)