

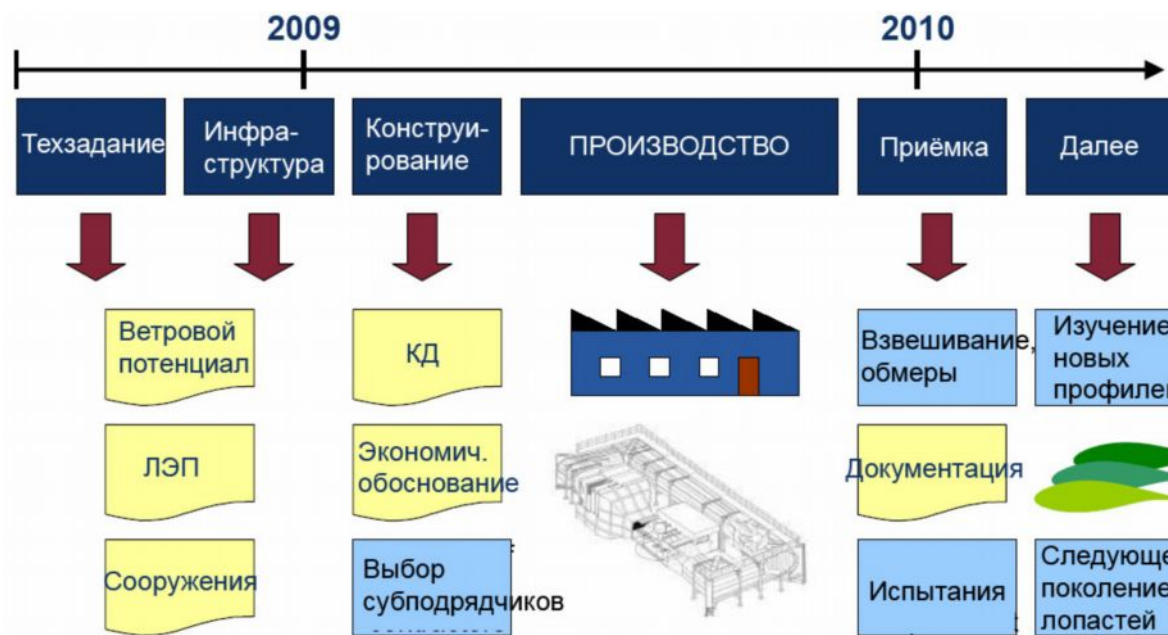
РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО



ЛОПАСТЕЙ ВЕТРОАГРЕГАТОВ

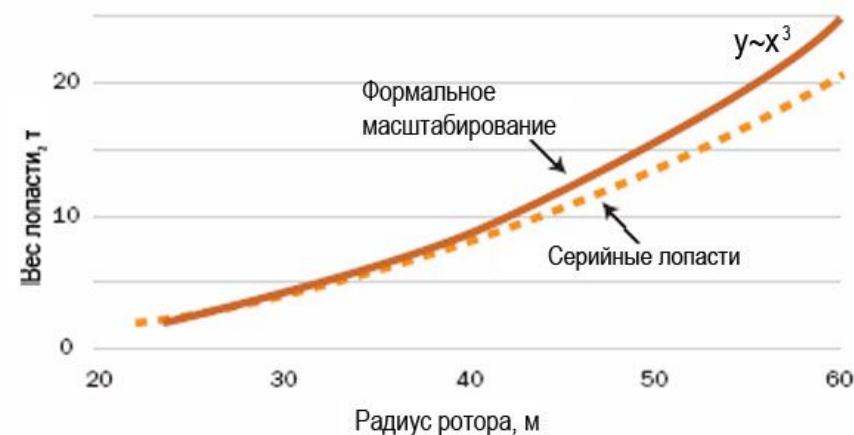
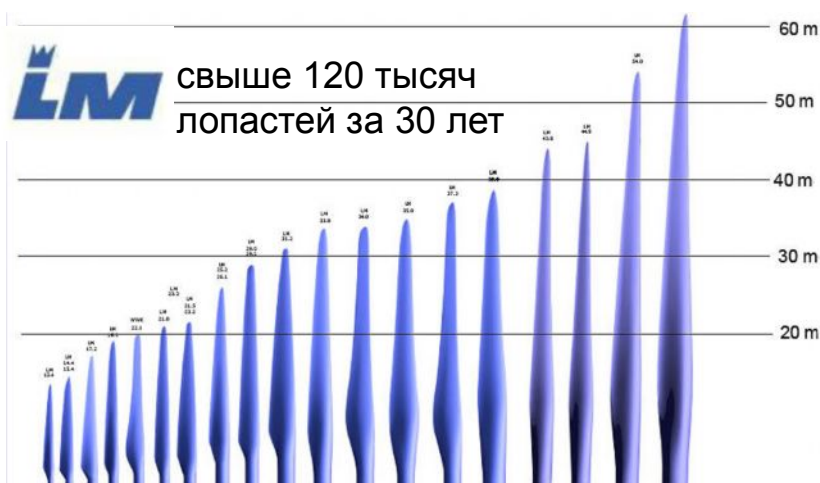
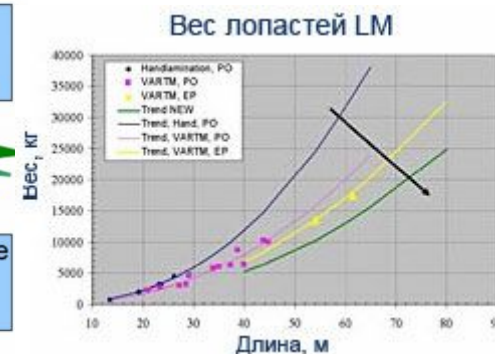
ООО ПОЛИТЕРМО
Москва, Можайское шоссе, д. 40
(+7 495) 994-81-88 martovskiy@drjet.ru

Многофакторная оптимизация лопастей ветрогенераторов



Integrated design of turbine rotors –
Lars Fuglsang, Head of Blade Design
Research, LM GLASFIBER A/S

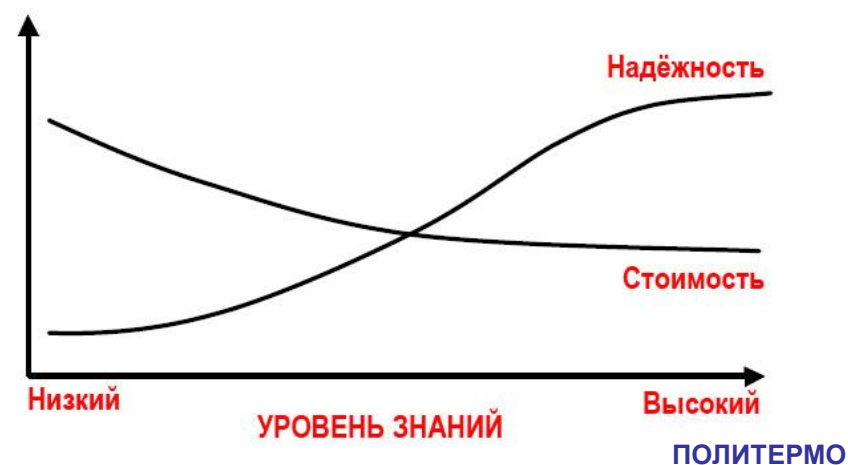
Parametric Modelling Of Large Wind
Turbine Blades –
Paul A. Bonnet, Geoff Dutton
Energy Research Unit STFC
Rutherford Appleton Laboratory,



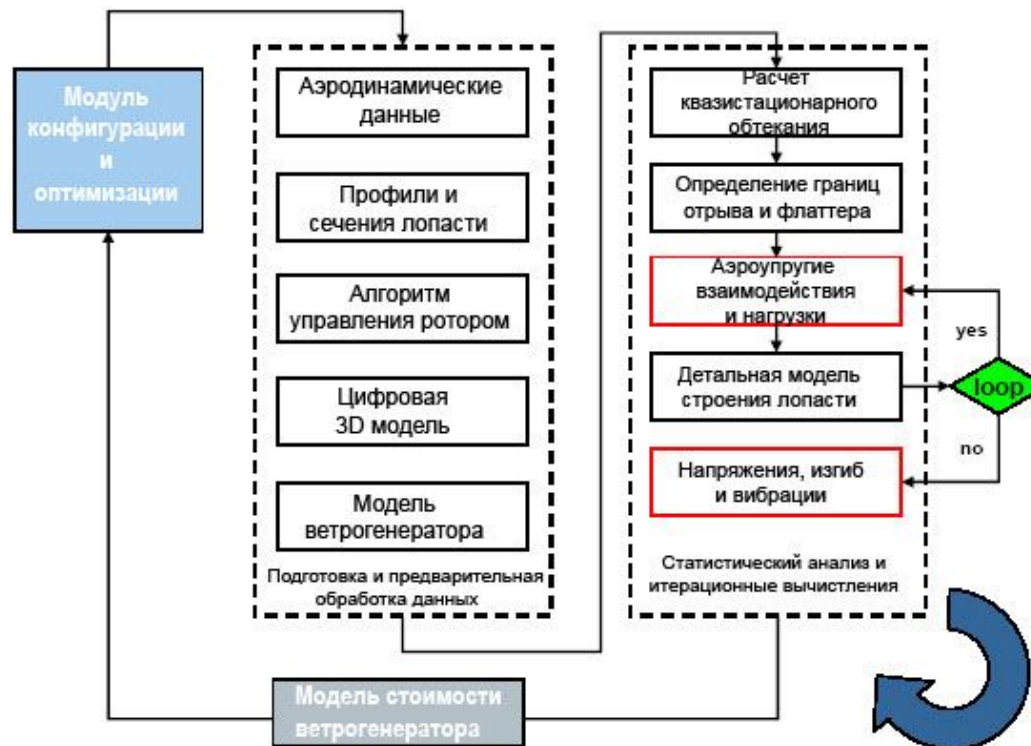
Структурная пирамида



Понимание того, как структура нижнего уровня задаёт характеристики структуры верхнего уровня, определяет экономическую эффективность разработки и надёжность лопастей.



Математическое моделирование



Переменные:

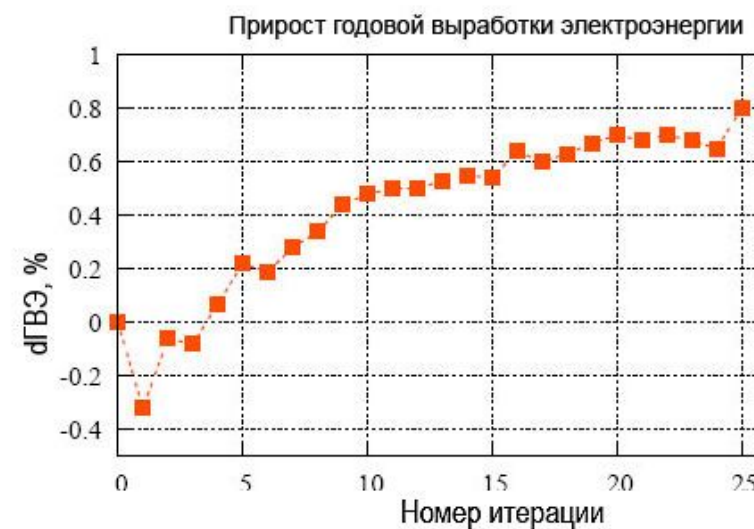
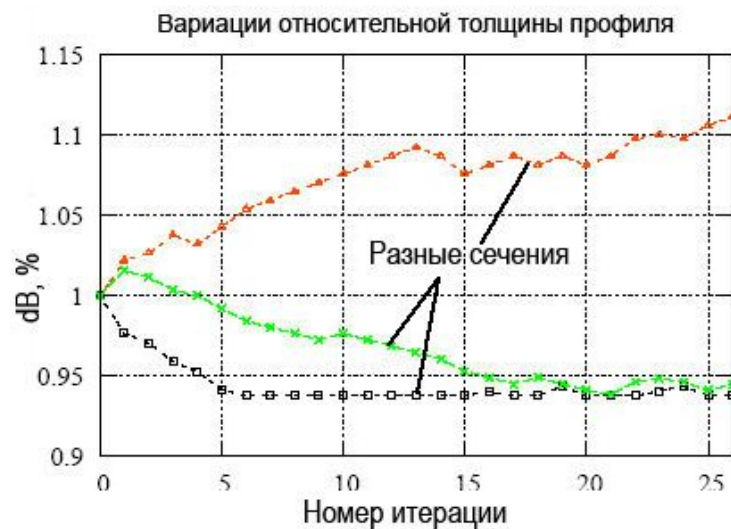
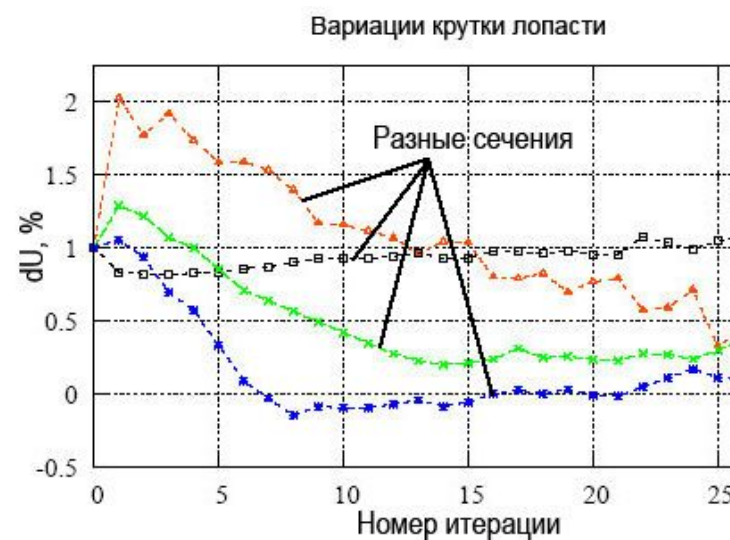
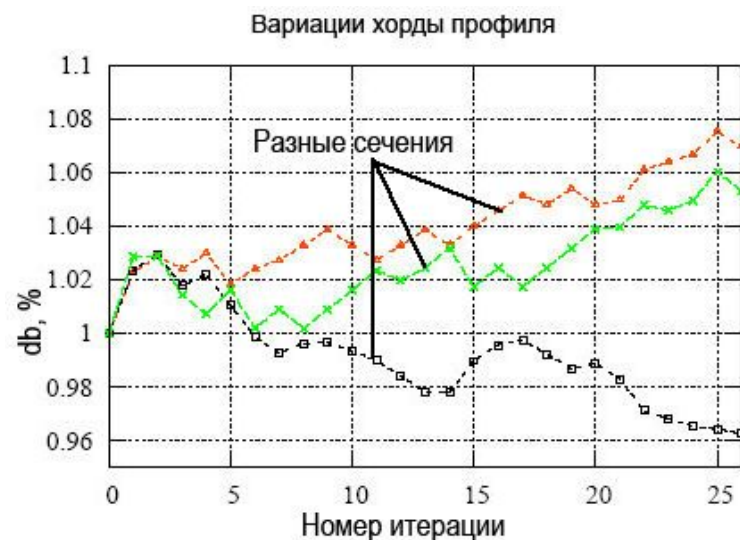
- профиль
- длина лопасти
- хорда, толщина, крутка
- алгоритм управления
- конструкция башни
- угол установки оси колеса
- угол конуса
- прогиб и начальный изгиб

Граничные условия:

- предельные нагрузки на компоненты агрегата
- усталостная прочность деталей
- предельные отклонения формы
- границы отрыва и флаттера
- скорость конца лопасти
- диапазон частот вращения

ЦЕЛЬ: экономически оптимальная лопасть

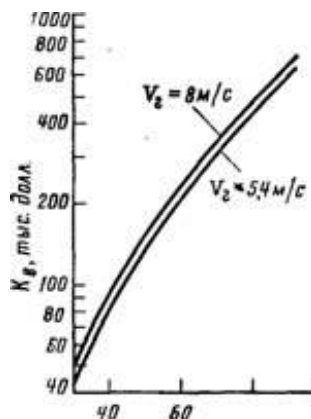
Вариации параметров



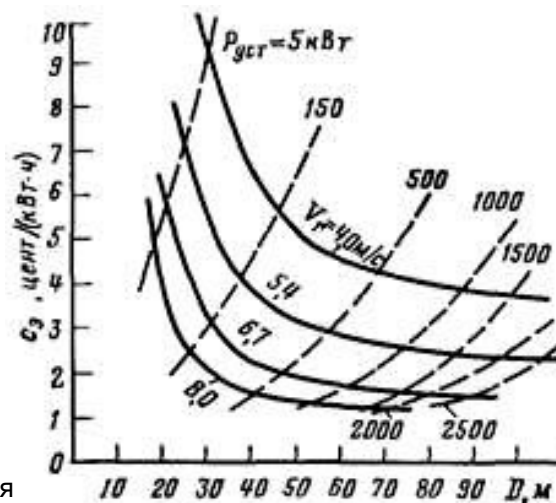
Механическая прочность лопасти достигается вариациями хорды и толщины профиля в разных сечениях; одновременно обеспечивается максимальная аэродинамическая эффективность в широком диапазоне режимов работы ветроагрегата.

Модель стоимости ветроагрегата

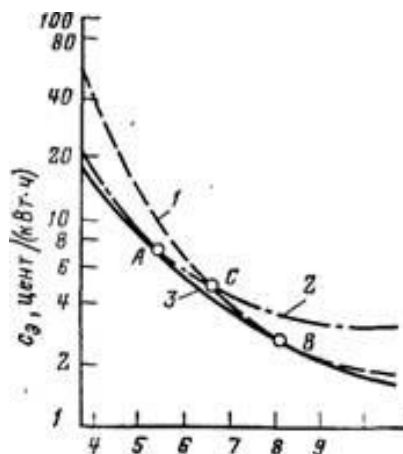
Пример оценки стоимости ВЭУ
General Electric мощностью 1 МВт



Зависимость стоимости ветроколеса от его диаметра D для $V_{г} = 8,0$ и $5,4$ м/с



Зависимость стоимости энергии, производимой ВЭУ, от диаметра ветроколеса D при разных среднегодовых скоростях ветра



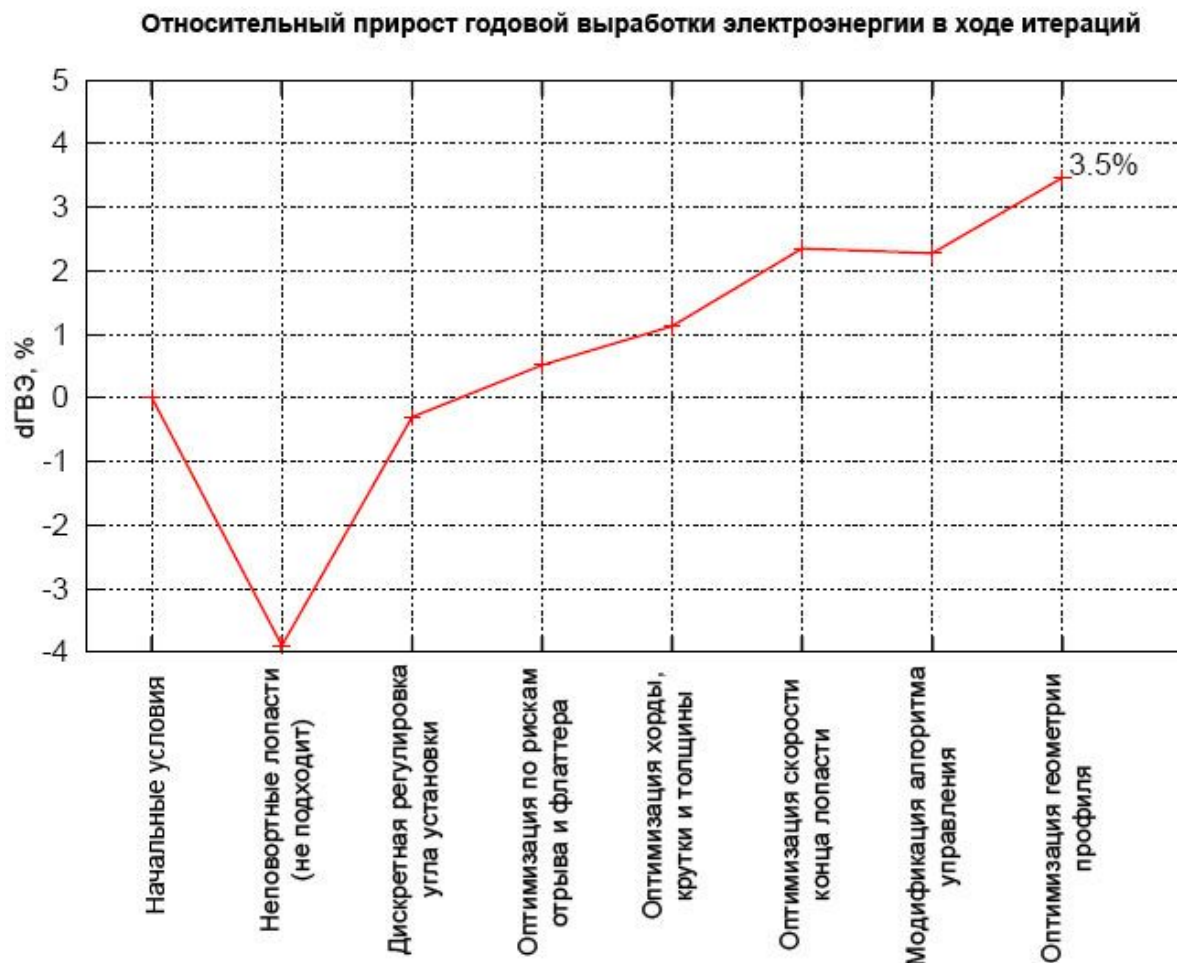
Зависимость стоимости энергии от $V_{г}$:
1 — при использовании ВЭУ, оптимальной для $V_{г} = 8,0$ м/с;
2 — то же для $V_{г} = 5,4$ м/с;
3 — при использовании обеих установок



Влияние среднегодовой скорости ветра $V_{г}$ на стоимость энергии, производимой ветроустановкой

Наименование	Цена, долл.
Ветроколесо	157810
в том числе	
две лопасти	68945
втулка	88865
Башня	99680
Узел ориентации с приводом	52090
Система передачи момента	110150
Электрическая система	79740
Система управления	11630
ВЭУ в целом	511100
Строительство и монтаж	24625
ИТОГО	535725

Итерационные вычисления

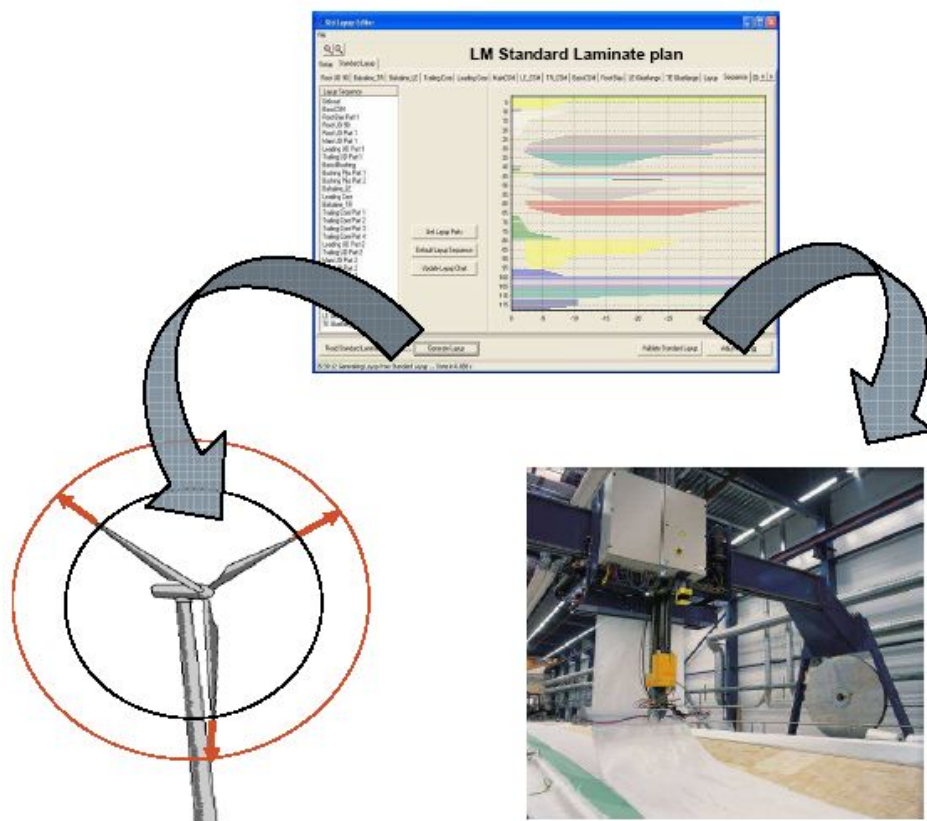


Расчёты аэроупругих взаимодействий требуют параллельных вычислений на нескольких многоядерных рабочих станциях.

При оптимизации по десяти параметрам продолжительность вычислений на каждой итерации составляет десятки минут.

На каждом шаге требуется 20-25 итераций для достижения надёжной сходимости результатов.

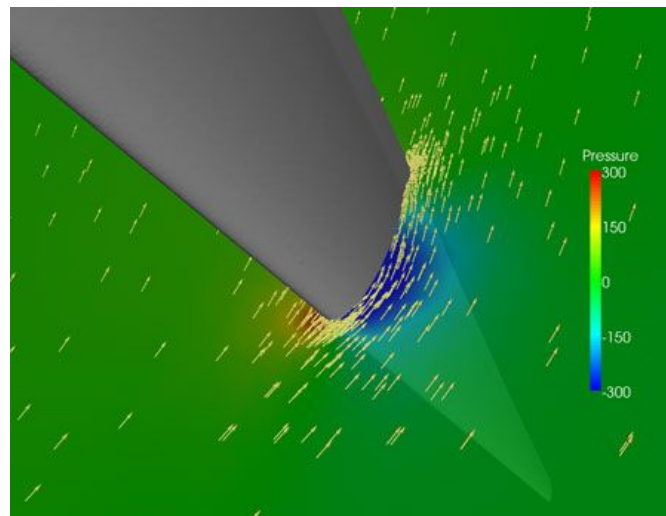
Технологичная и надёжная лопасть



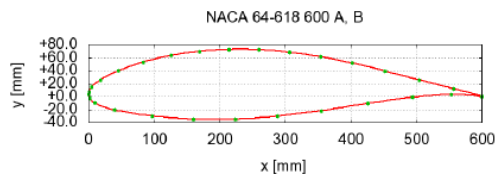
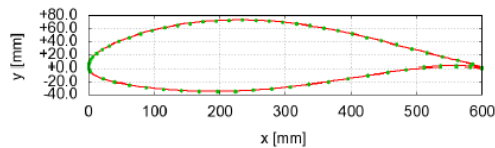
Система автоматического проектирования использует стандартный план укладки ламината, что одновременно обеспечивает технологичность конструкции и оптимальную прочность и надёжность.

Повышение эксплуатационных и механических характеристик без усложнения и удорожания конструкции – вот результат настоящей **многофакторной оптимизации**.

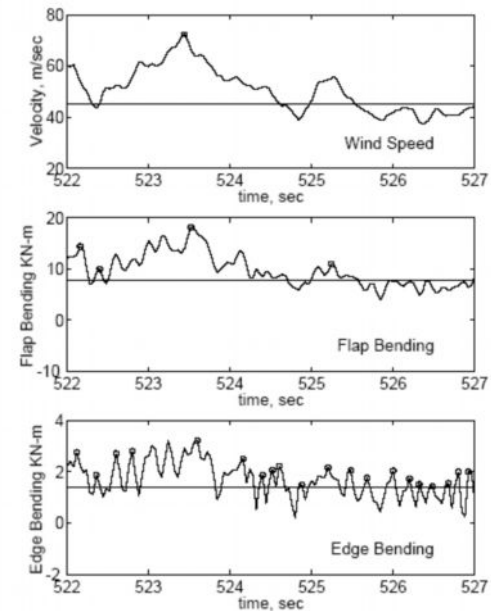
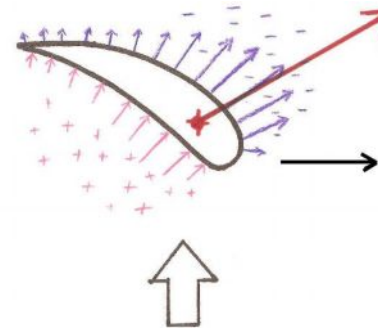
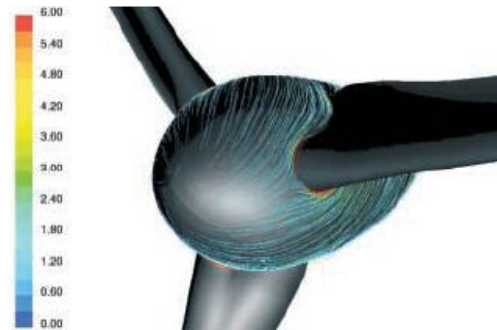
Аэродинамический расчет



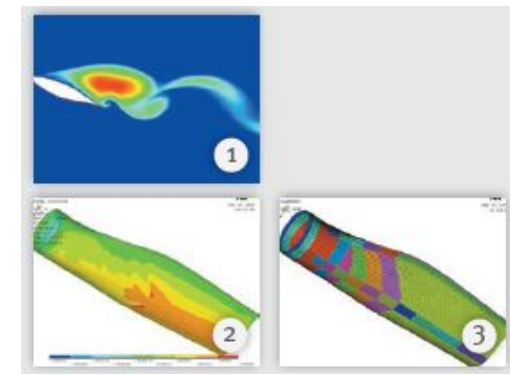
NACA 64-618 600 C



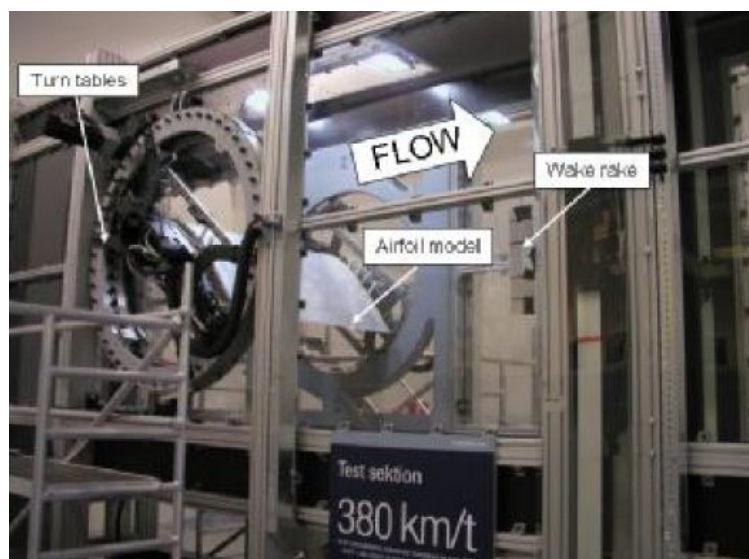
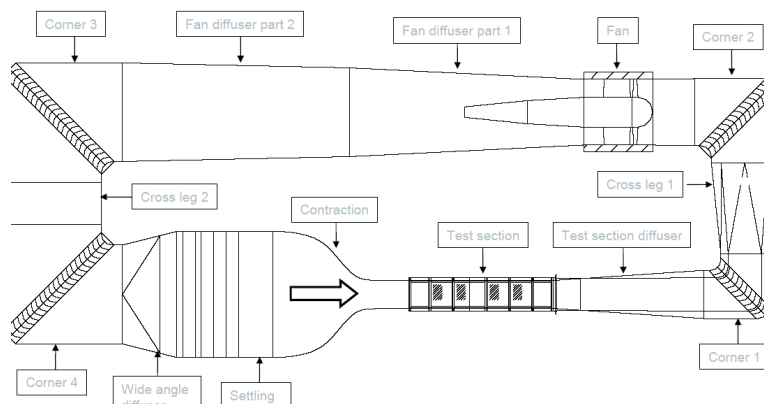
NACA 64-618 600 A, B



1. Аэродинамический расчёт колеса в осесимметричном приближении
2. Выбор и оптимизация профиля, минимизация профильных и концевых потерь
3. Численное моделирование обтекания лопасти на типовых и на наиболее опасных переходных режимах
4. Определение моментов ветроколеса и силы лобового давления
5. Расчёт аэродинамических характеристик ветроагрегата
6. Аэроакустический расчёт; снижение шума лопасти и агрегата.

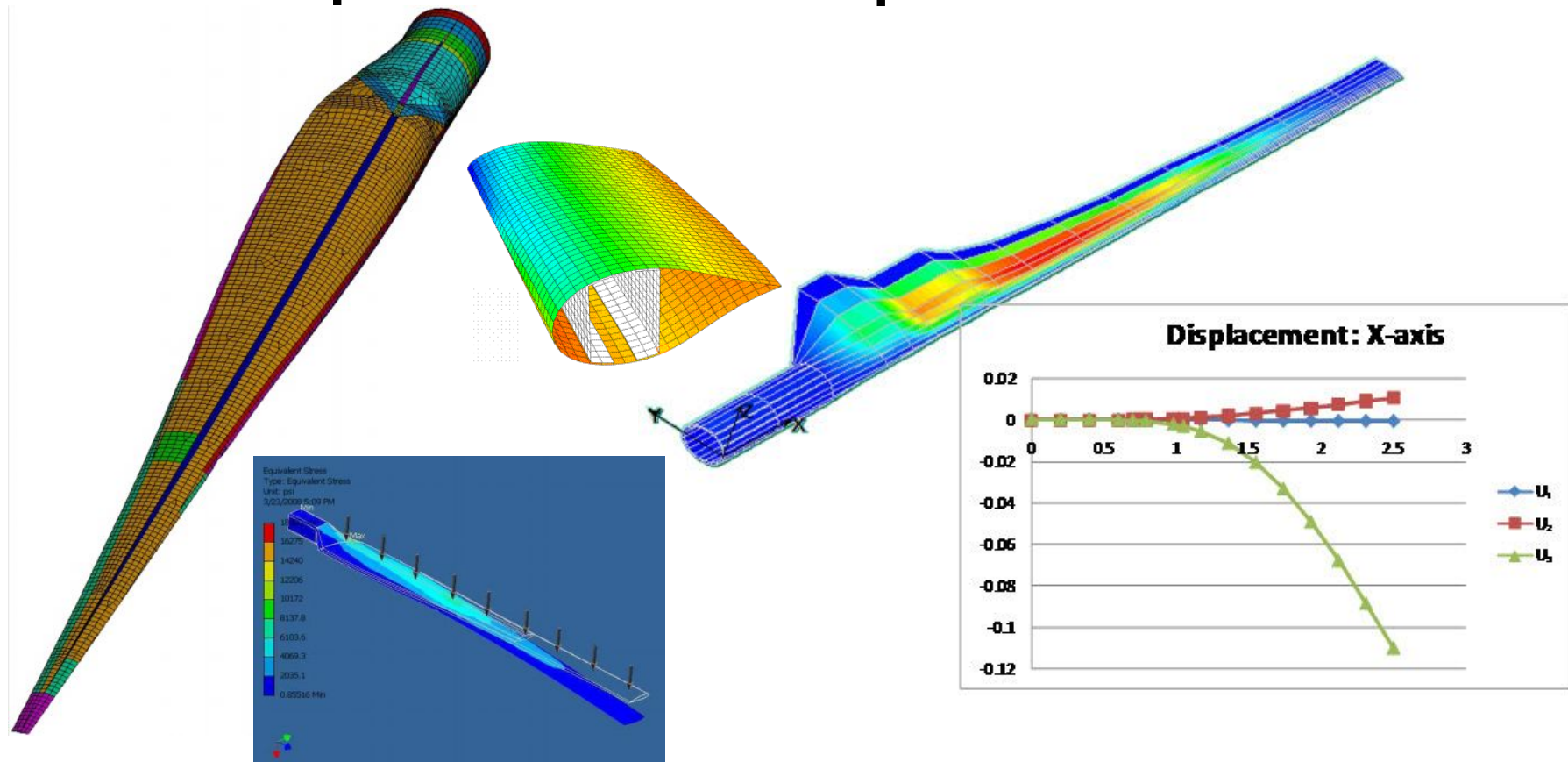


Аэродинамический эксперимент



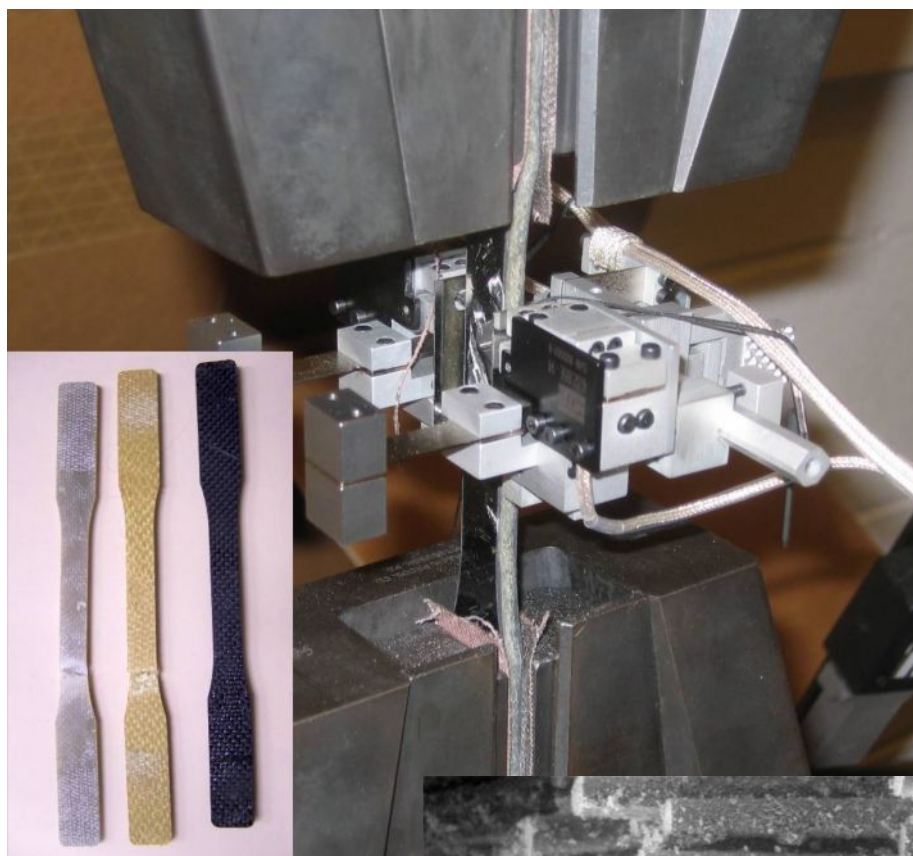
	Достоинства	Недостатки
Вычислительный эксперимент	Отсутствие масштабного фактора Низкая стоимость Быстрота получения результата	Вычислительные ошибки Конечная точность Ограничения моделей турбулентности
Аэродинамическая труба	Достоверность результатов Высокая точность Реальная шероховатость профиля и переходный пограничный слой	Влияние стенок канала и степени турбулентности Влияние масштаба (числа Рейнольдса) Высокая стоимость

Прочностные расчёты



1. Определение распределения жёсткости лопастей, необходимой для настройки частоты их собственных колебаний.
2. Определение пределов флаттера лопастей и их перемещений (отклонений от плоскости вращения) под действием аэродинамических, гравитационных и инерционных сил.
3. Уточнение угла конуса и угла установки оси ВК; расчёт минимального зазора между лопастью и башней.
4. Анализ динамического взаимодействия ветроколеса и башни, определение циклических нагрузок на лопасти ветроколеса.
5. Численное моделирование обтекания ВА на режимах, оказывающих наибольшее влияние на конструкцию ВК – пусковых, переходных при порывах ветра, при отключении нагрузки, аварийных.

Испытания образцов

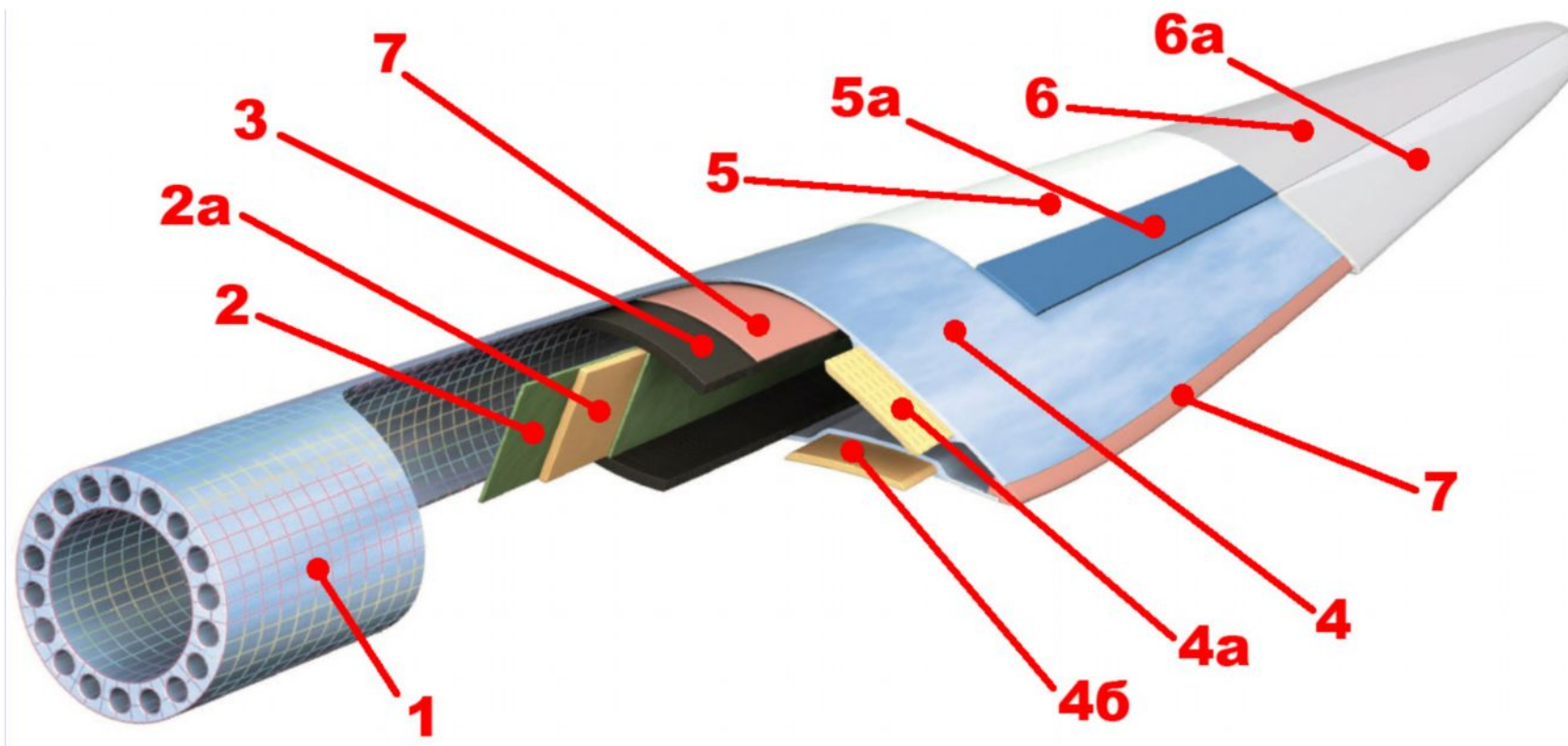


Определение механических свойств образцов ламината в диапазоне температур от -50 до +50°C.



- циклическая усталость
- эрозионная стойкость
- климатические испытания
- ускоренные ресурсные испытания.

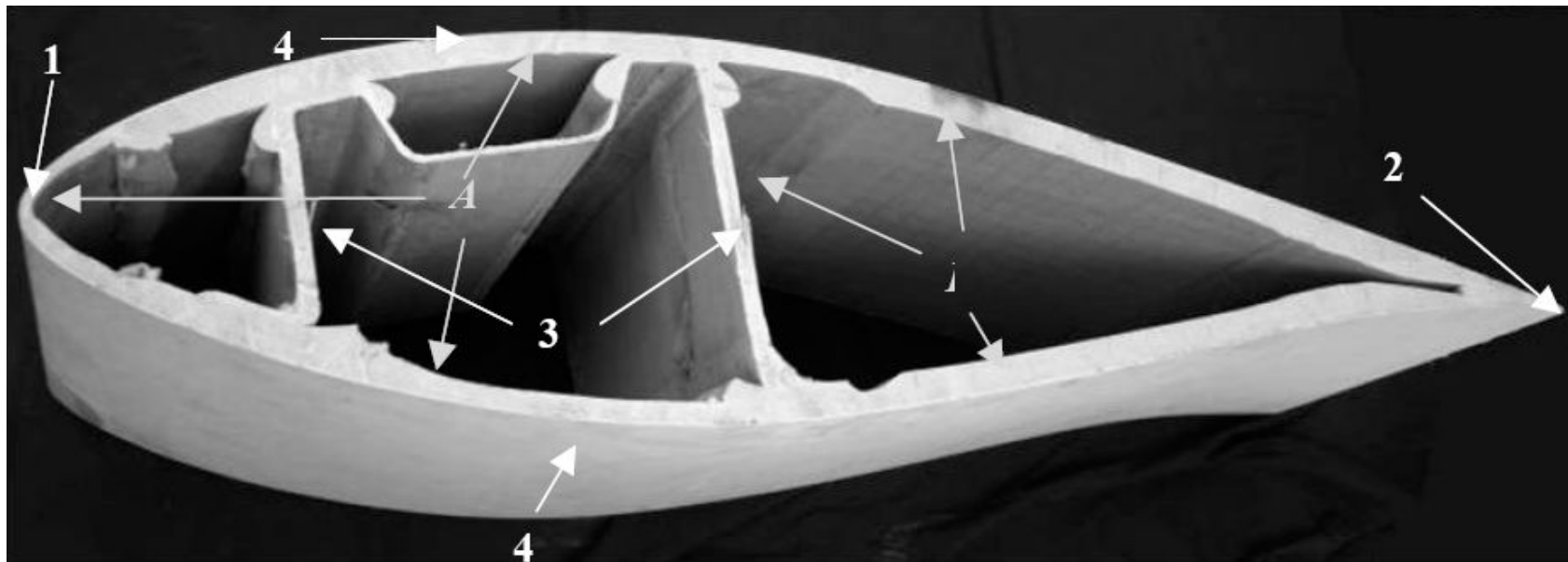
Лопасть ветрогенератора



- 1. Хвостовик (препрег, инфузия)
- 2. Сетка
- 2а. Пенополиуретановые соты
- 3. Лонжерон (стеклоуглепластик)
- 4. Обшивка (препрег, инфузия)
- 4а. Оболочка (инфузия)

- 4б. Оболочка (препрег)
- 5. Грунтовка (гелькоат)
- 5а. Вуаль
- 6. Полиуретановый лак
- 6а. Эпоксидный гелькоат
- 7. Связующая паста (адгезив)

Лопасть в разрезе

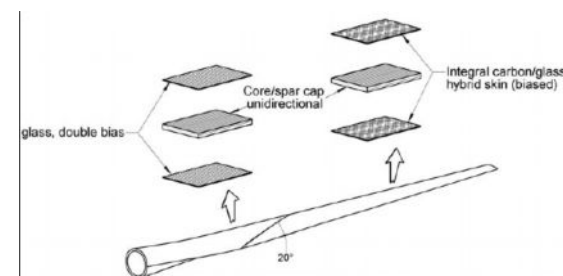
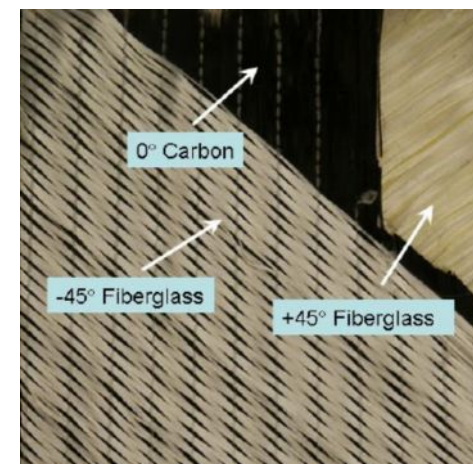
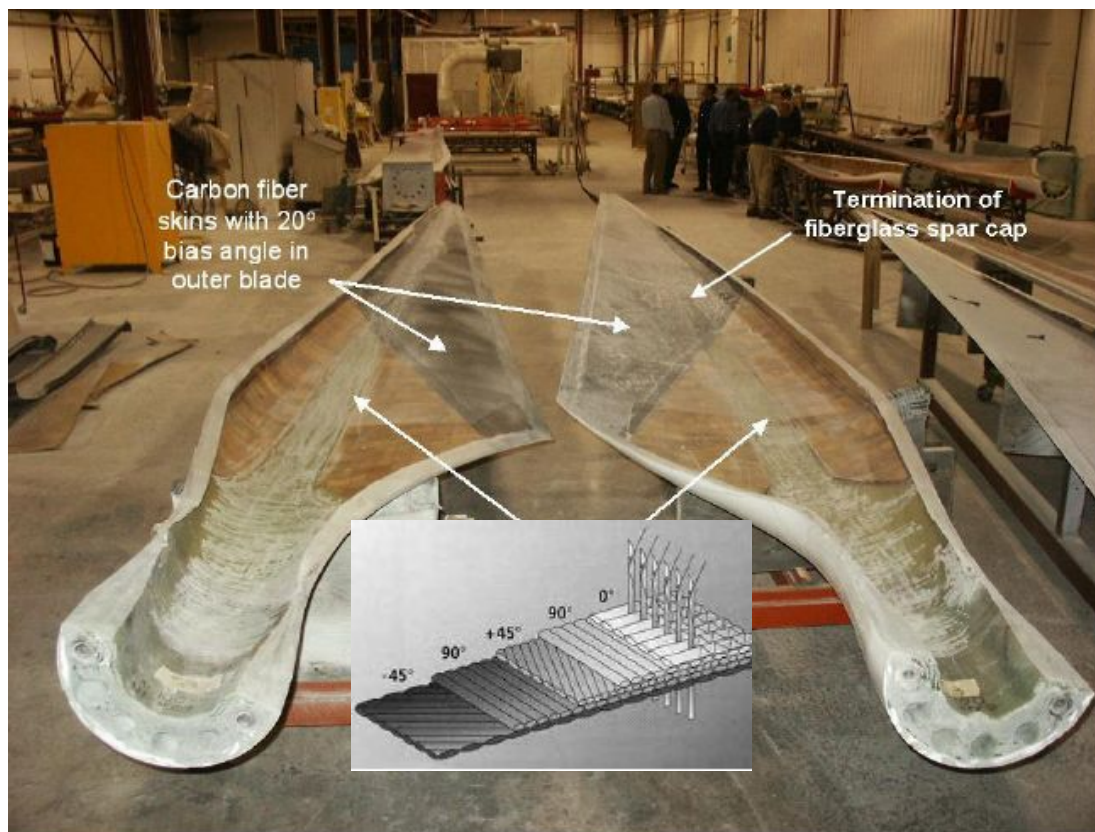


Типичное сечение лопасти ветрогенератора

Сверху – спинка профиля (сторона разрезания), снизу – сторона давления.

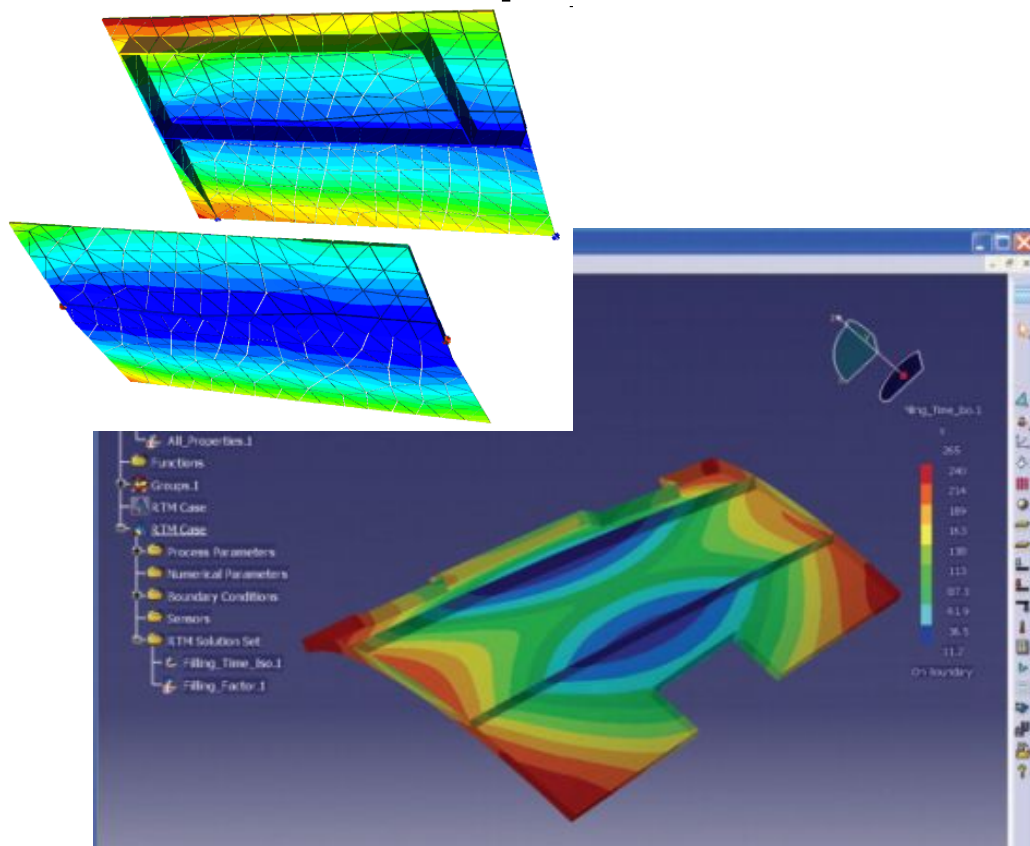
1 – передняя кромка; 2 – задняя кромка; 3 – лонжероны, придающие лопасти жёсткость и служащие для склейки оболочек 4. Оболочки изготовлены из стеклоуглепластика (А); ламинат с целью снижения веса содержит пластины из бальзы или пенопласта (В).

Материалы и структура композита

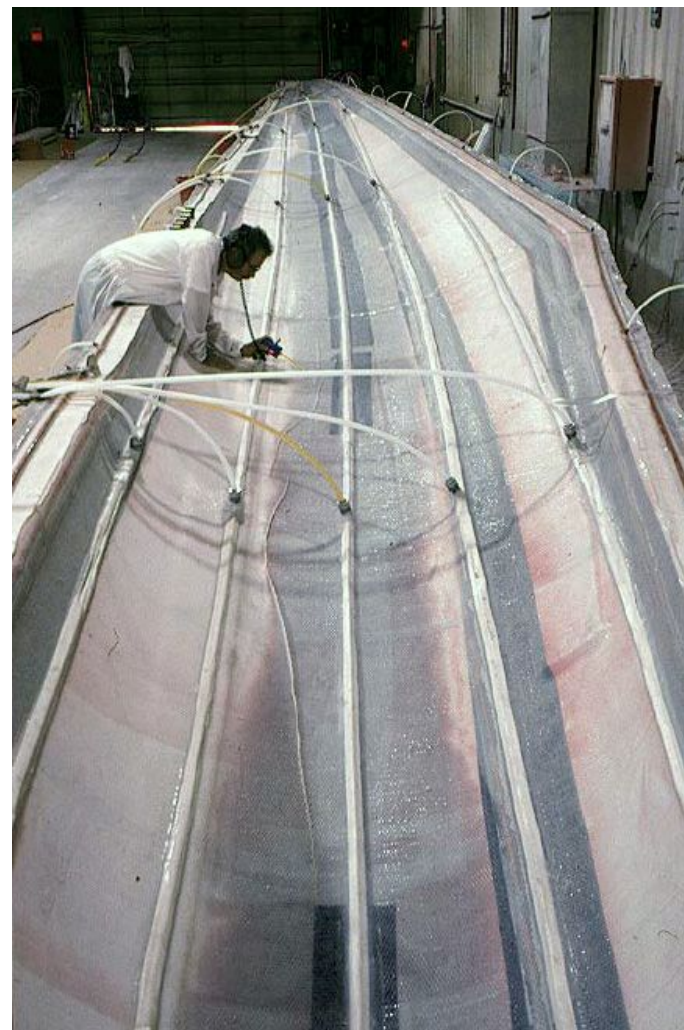


- Моно- и мультиаксиальные стеклоуглеткани – высокая прочность на растяжение
- Комбинированные армирующие материалы – высокая жёсткость, подавление крутильных колебаний и флаттера
- Пенополиуретан, сотовые плиты, бальза – лёгкость конструкции, подавление резонансных изгибных колебаний

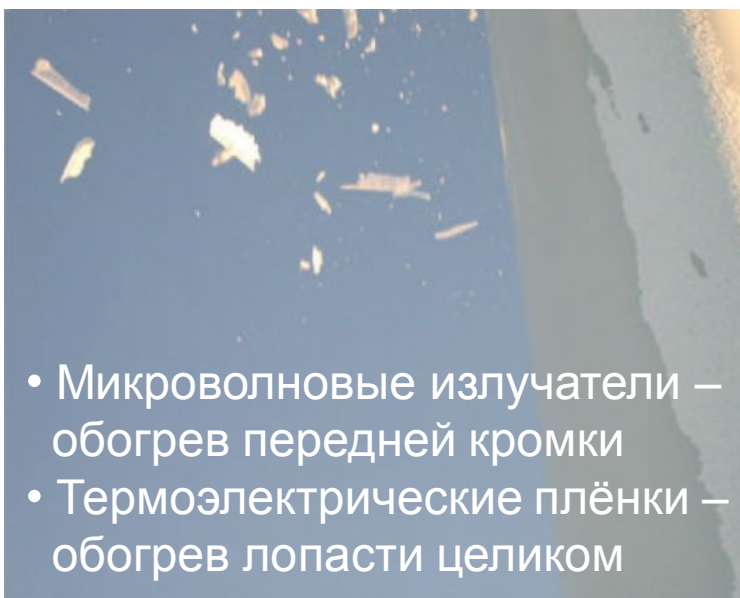
Моделирование вакуумной пропитки



- Численное моделирование пропитки под вакуумом
- Оптимизация структуры ламината
- Оптимизация технологических режимов
- Экспериментальная отработка методики



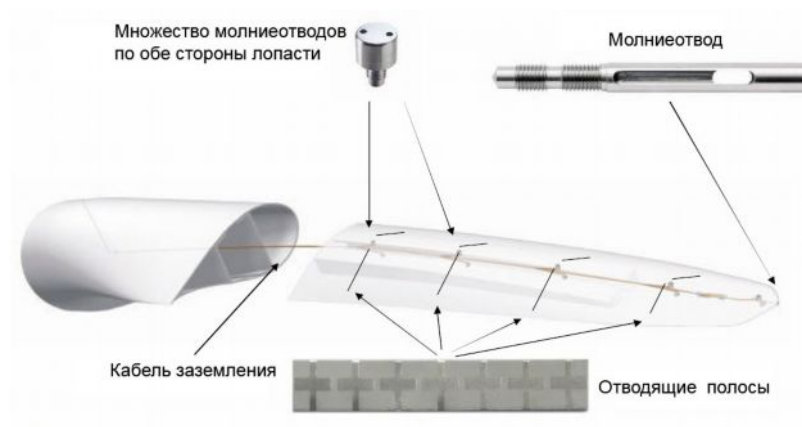
Обогрев лопастей



- Микроволновые излучатели — обогрев передней кромки
- Термoeлектрические плёнки — обогрев лопасти целиком



Молниезащита



Без молниеотводящих полос



Полосы установлены

• Надёжная молниезащита лопастей



- Предотвращение образования конденсата
- Заземлённые чехлы над оборудованием
- Оптическая связь в системе управления
- Мониторинг и аварийная автоматика

Требования к производству



- Отапливаемые цеха площадью в тысячи кв.м
- Класс взрывоопасности производства - В-I
- Взрывозащищённое оборудование
- Мощная общая и местная вентиляция
- Очистка воздушных выбросов и промстоков
- Аттестованный персонал



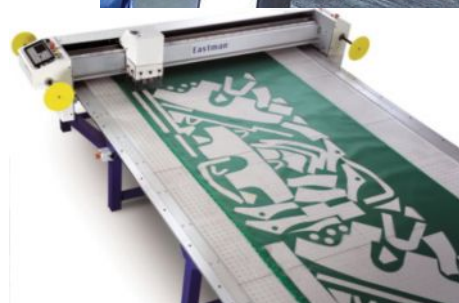
Современное оборудование



Обогреваемые матрицы



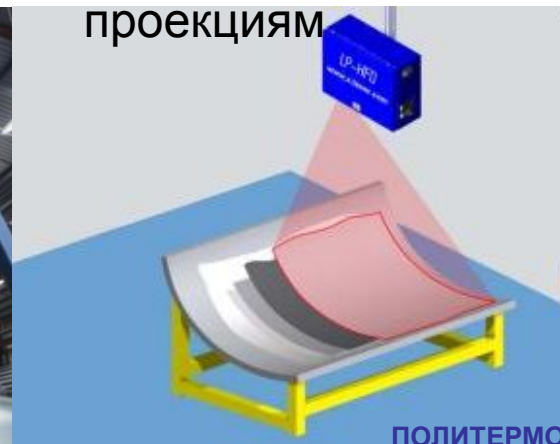
Цифровой раскрой материала



Укладка по лазерным проекциям



Автоматизированная подача армирующих материалов



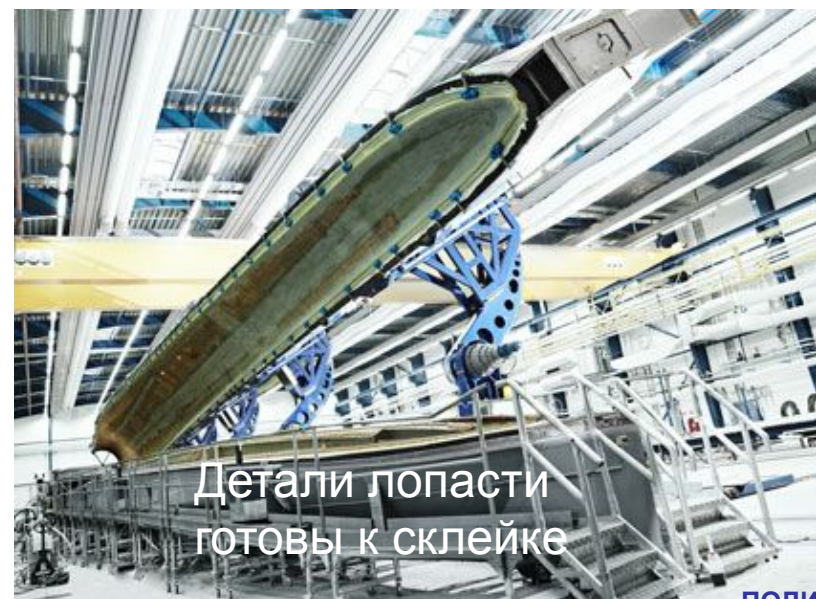
ПОЛИТЕРМО

Дозирующие насосы для смолы

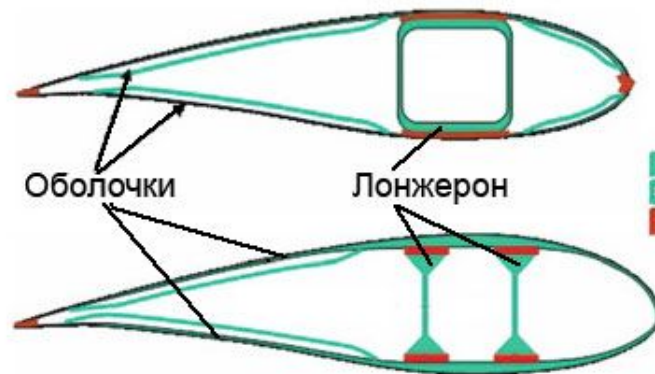


- Подача смолы для пропитки лопасти
- Расход – тонны и десятки тонн в час
- Регулирование расхода в широком диапазоне
- Высокая точность дозирования
- Стабильное соотношение компонентов
- Подогрев смолы до заданной температуры
- Автоматическая работа по программе
- Забор сырья из контейнера или трубопровода
- Мобильность
- Взрывобезопасность

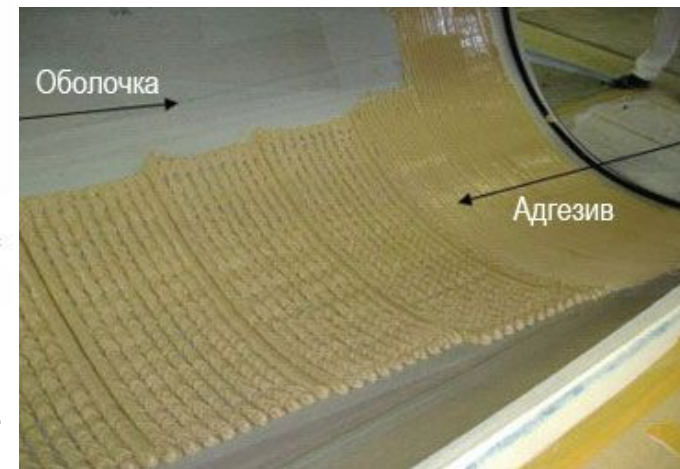
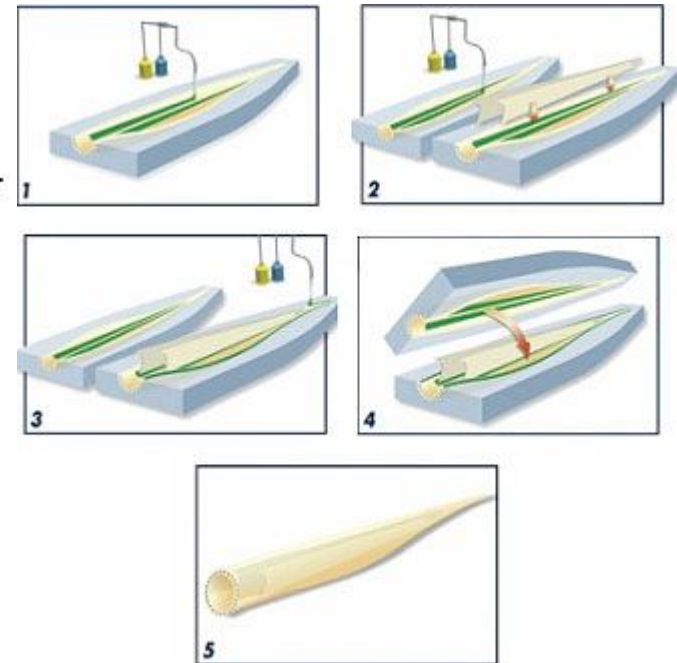
Механизированные формы



Склейка лопасти



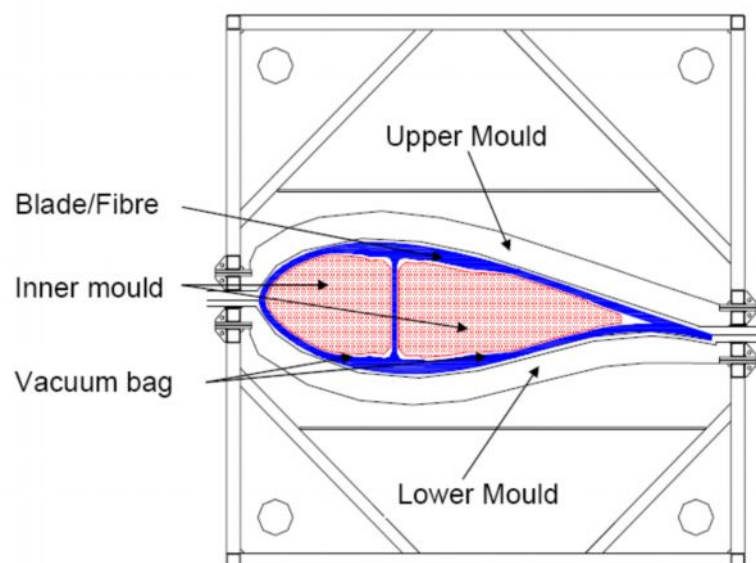
Сплошной ламинат
Сэндвич
Склейка



Для лопасти длиной 40 м требуется около 400 кг полиуретанового адгезива, который наносится 40-45 минут. 15 минут требуется для соединения деталей, а полное отверждение происходит за 4 часа при температуре 70-80°C.

Новые технологии

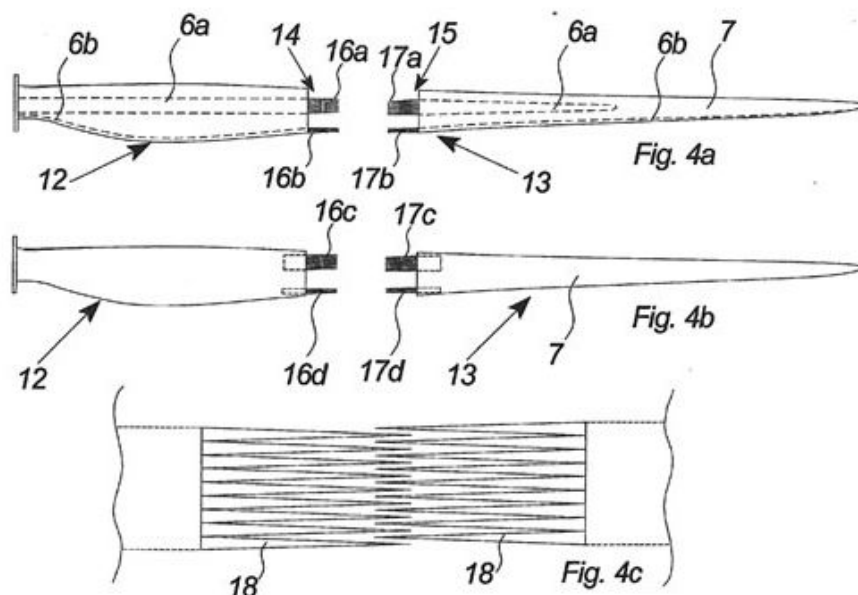
ЛОПАСТИ SIEMENS



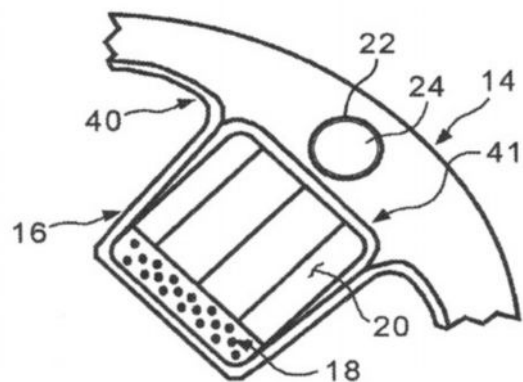
- цельные лопасти без швов и клеевых соединений
- одностадийный процесс
- один комплект оснастки
 - внутренняя эластичная модель
 - две обогреваемые матрицы
- вакуумная пропитка эпоксидной смолой
- температурная полимеризация
- вакуумирование и извлечение эластичной модели
- безопасность, минимальная эмиссия
- минимальный отход материалов



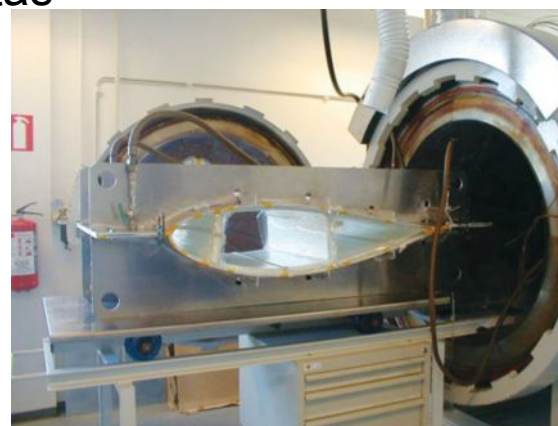
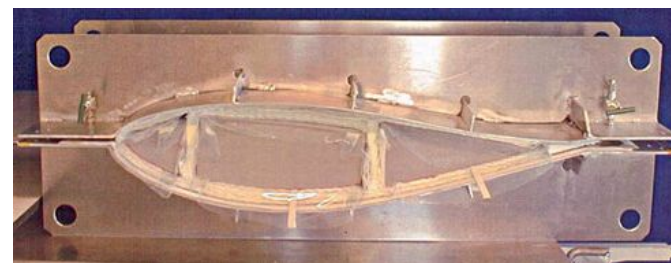
Новые технологии



Склейка секционных лопастей Vestas



Заделка обогревателей и датчиков в оболочку лопасти



Вакуумное горячее прессование цельной лопасти из композита с полипропиленом

ПОЛИТЕРМО

Окраска и полировка



- Высокая эрозионная стойкость
- Устойчивость к ультрафиолету
- Низкая адгезия
- Превосходный глянец
- Малые потери на трение

Взвешивание, испытания, дефектоскопия



Взвешивание и
балансировка



Статические
прочностные
испытания



Ресурсные виброиспытания:
20 лет эксплуатации –
за 3,5 месяца



Обязательные
разрушающие испытания



Фотомонтаж:
изгиб лопасти
на испытательном
стенде

Транспортировка



Сборка и монтаж ветроколеса



The first module with the main carrier.



The rear section of the nacelle cover.



The disc rotor follows assembly of the stator.

Assembling the E-112 at Egeln.



The hub being lifted by both cranes.



A rotor blade before being mounted on site.



Blade assembly observed from the nacelle.



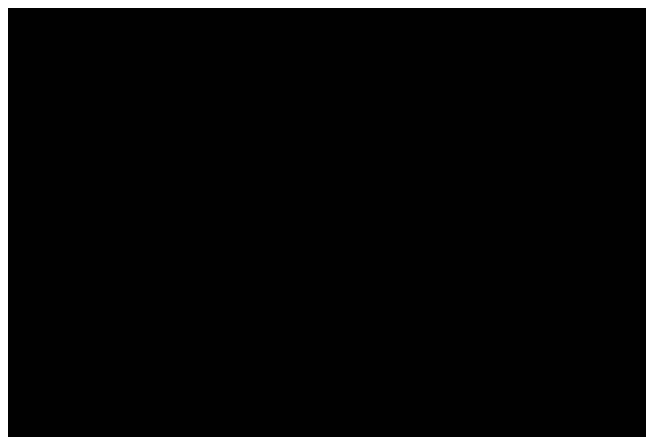
The spinner completes the form of the nacelle.



The first rotor blade is lifted.

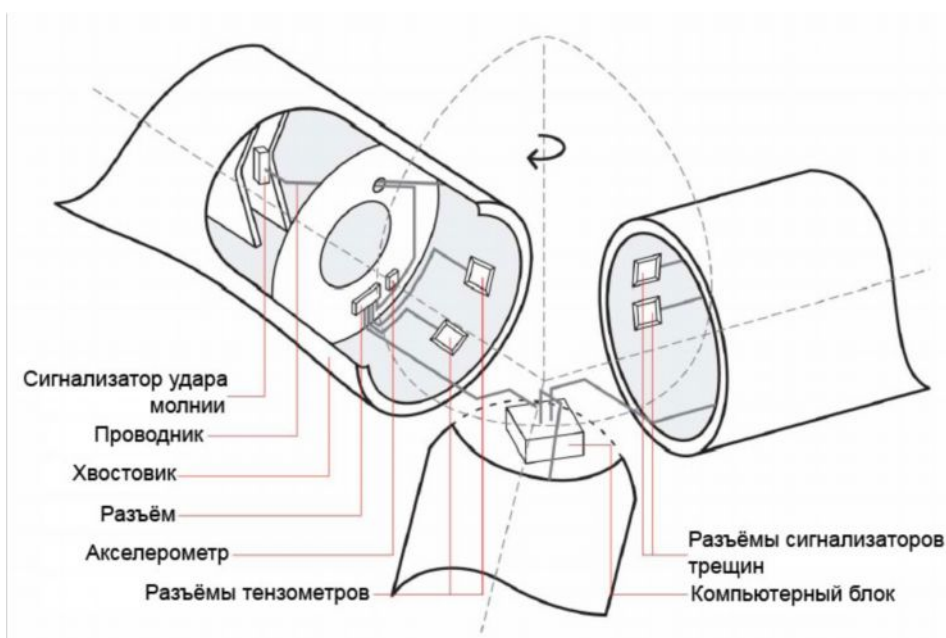
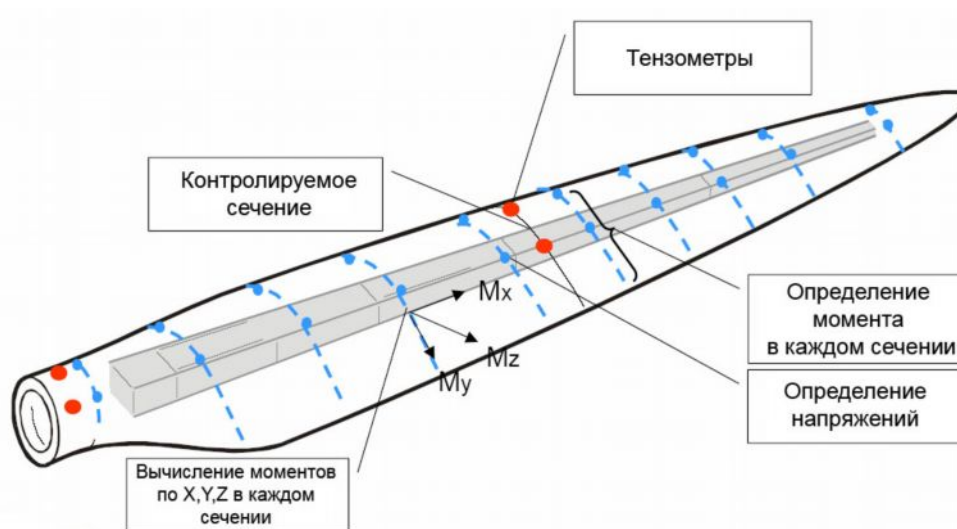


The second rotor blade is in place.



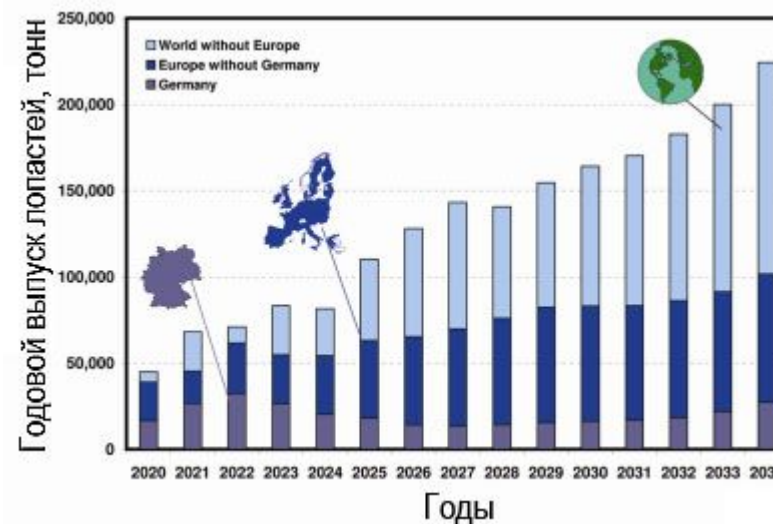
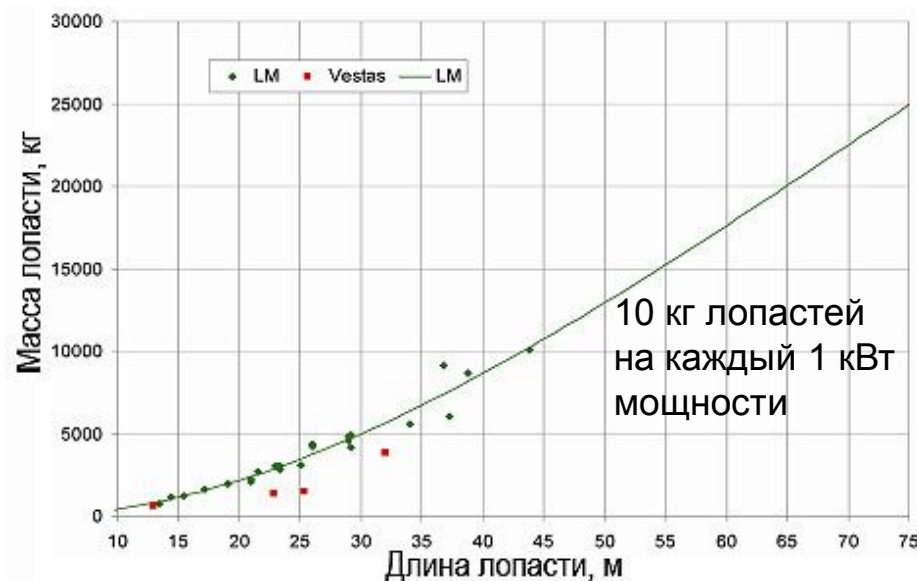
Монтаж 3 МВт агрегата WinWind – 4 мин видео

Диагностика и обслуживание



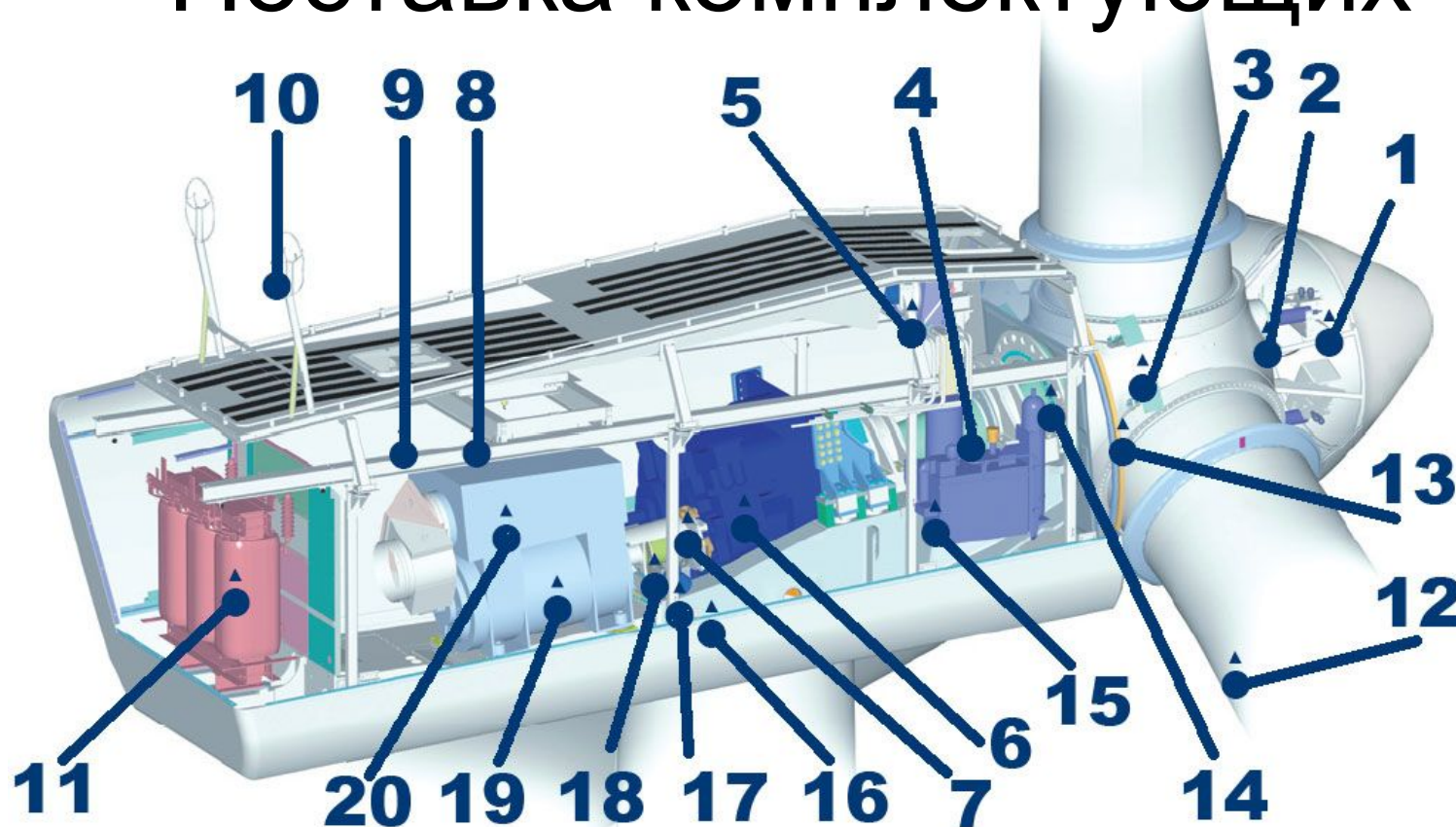
Утилизация лопастей

© ReFiber ApS



- пиролиз с получением горючих газов и положительным выходом энергии
- переработка неорганических отходов
- наполнители, теплоизоляция, строительные материалы

Поставка комплектующих



1 – контроллер ступицы
2 – цилиндры поворота лопастей
3 – ступица
4 – втулка (ступица) ветроколеса
5 – главный вал
6 – редуктор
7 – дисковый тормоз
8 – тельфер
9 – блок управления
10 – анемометр

11 – трансформатор
12 – лопасть
13 – подшипник лопасти
14 – стопорный механизм
15 – маслоагрегат
16 – фундамент
17 – сцепление
18 – дисковая муфта
19 – генератор
20 – холодильник