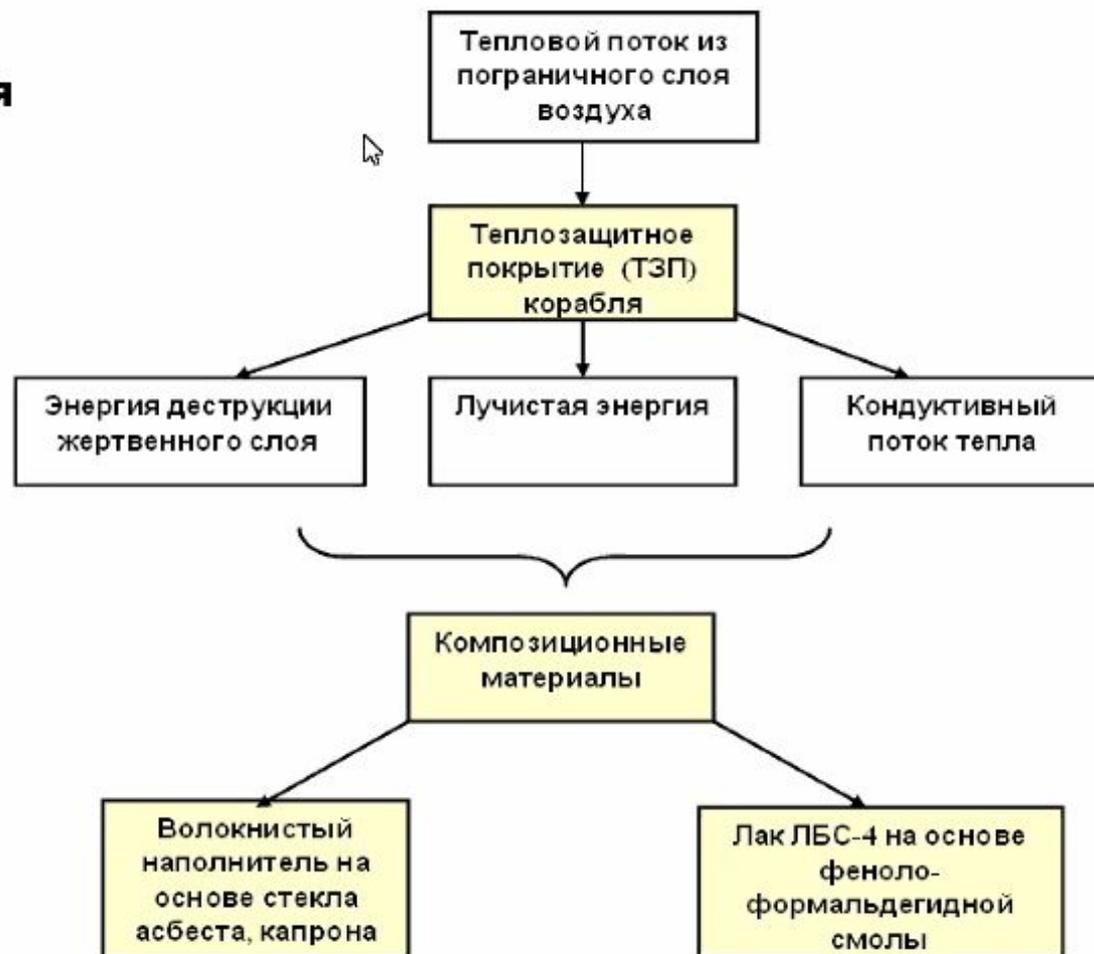


Лекция Тарасова от
26.11.2020

1. Организация абляционной теплозащиты космического корабля

Схема абляции теплозащитного покрытия



Композитные теплозащитные конструкции, освоенные серийным производством

Армирующий наполнитель

Структура вязально-прошивных полотен

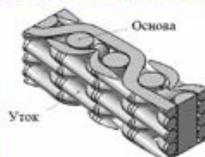
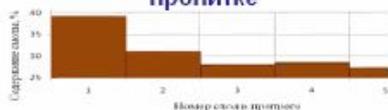


Лобовой теплозащитный экран



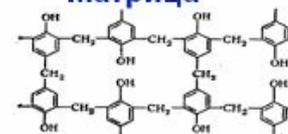
Теплозащитная оболочка корпуса СА

Доля ФФС при однократной пропитке



+

Матрица



Пространственная сетчатая структура резольной ФФС

Основные требования к свойствам ТЗП

Параметр	ТСП-Ф	ПКТ-11К-ФЛ
Плотность, г/см ³	1,35 - 1,7	1,15 - 1,4
Степень поликонденсации, %	не менее 94	не менее 90
Водопоглощение, %	не более 4,5	не более 6
Прочность при изгибе, МПа	не менее 78	не менее 39,2
Усадка, %	0,3 - 0,5	не более 0,3
Содержание смолы, %	не менее 28	не менее 30

Специализированное подразделение по производству ТЗП

Укрупненная блок-схема технологии изготовления ТЗП



Решенные проблемы российской КОСМОНАВТИКИ

Пилотируемый космический
корабль «Союз»



Орбитальный корабль «Буран»



Возвращаемый аппарат ПТК «Федерация»



ТЗП на основе волокон
(стеклянных, асбестовых,
капроновых) и ФФС

ТЗП на основе стеклосотового
каркаса заполненного феноло-
формальдегидной смолой,
стеклянными волокнами и
микросферами

Недостатки традиционных технологических решений:

- Длительность традиционной капиллярной пропитки лаком ЛБС-4 составляет 30 суток и соизмерима с жизнеспособностью лака.
- По традиционной технологии пропитки и сушки количество смолы в заготовке теплозащиты составляет величину 28-30%, а желательно, чтобы перед автоклавной обработкой было 35-40%. Этого можно добиться только на базе многократной пропитки.
- Согласование давления и температуры в автоклаве при обработке заготовки осуществляется эмпирически, что требует больших затрат средств и времени.
- Использование воздуха в качестве рабочей среды автоклава в присутствии паров спирта и фенола представляет пожарную опасность, а также может вызывать термоокислительную деструкцию материала в отдельных зонах теплозащиты.

Цель работы: Снизить затраты на изготовление ТЗП и повысить его качество на базе совершенствования технологии и технологического оборудования

Задачи исследования:

- научное обоснование технологических режимов многократной пропитки-сушки заготовки теплозащиты из условия обеспечения доли смолы на уровне 35-40% и создание оборудования для снижения времени пропитки. (плакаты 9-13).
- создание автоклавного комплекса, использующего азот в качестве рабочей среды, и научно обоснованное согласование технологического воздействия на заготовку ТЗП температуры и давления в реакционной камере (плакаты 14-17);
- Разработка рекомендаций по применению результатов исследований в производстве теплозащитных покрытий (плакаты 18-22).

Работа выполнена по Госконтракту № 351-8625107 в рамках
Федеральной космической программы 2006 – 2015гг.

2. Принудительная пропитка многослойных пористых заготовок для теплозащиты СА

Объем связующего (по Дарси)

$$g_{CB} = \frac{K_D}{\eta_c} \frac{\Delta P}{l} S t$$

S – площадь канала для подачи связующего

η_c -вязкость жидкости

K_D -коэффициент Козени

Δp -перепад давления

l -путь жидкости при пропитке

t - время пропитки

Данные однократной пропитки

Полотно ПВП - КТК	
Пористость	54,6%
Содержание лака	44,8%
Расчет доли ФФС	33,3%
Опытная доля ФФС	29,4%

Схема станда пропитки и практическая реализация

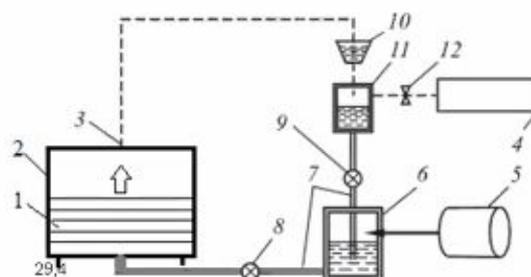
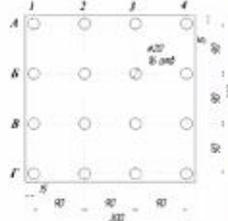


Схема забора проб



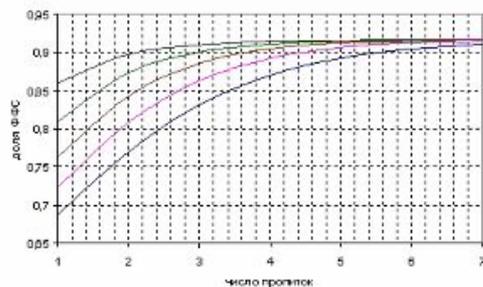
$\varepsilon = (18,3\%; 7,5\%; 9,6\%)$

Принцип увеличения доли феноло-формальдегидной смолы при многократной пропитке и вакуумной сушке заготовки ТЗП

Схема ступенчатого увеличения доли феноло-формальдегидной смолы (ФФС)



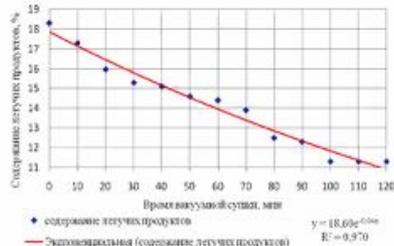
Динамика изменения доли ФФС от числа циклов пропитка-сушка



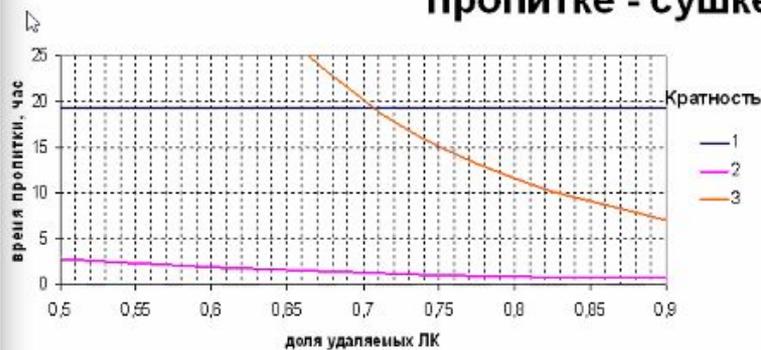
Модель удаления ЛК при сушке

$$W = 1 - e^{-\alpha t_S} \quad W - \text{доля удаленных ЛК}$$

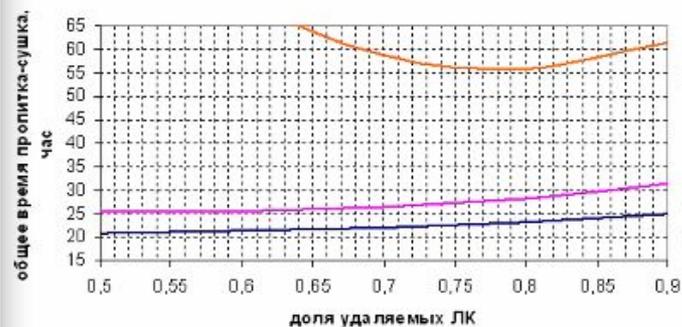
t_S - время сушки αt_S - приведенное время сушки



Зависимость затрат времени при многократной пропитке - сушке



Время пропитки пространства между нитями



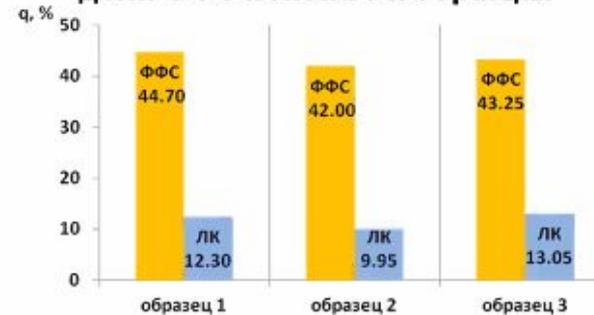
Общее время многократной пропитки-сушки

Оптимальная часть удаляемого спирта – 75...80%

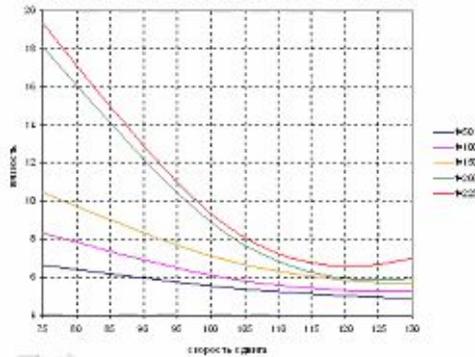
Результаты испытания предложенной технологии 3-х трехкратной пропитки-сушки заготовок ТЗП

Технологический режим 3-х кратной пропитки-сушки		
Параметр	Пропитка	Сушка
Температура, С	20...25	20...25
Давление, МПа	0,08	0,095
Время, час	0,5	1

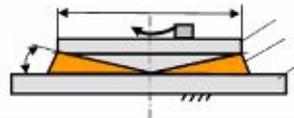
Результаты изменения доли ФФС и ЛК на 3-х образцах



Влияние скорости сдвига



$$\dot{\gamma} \sim u \sim \Delta P$$



Автоклавная обработка ТЗП космического корабля

Схема нагрева и движения азота

Известно
условие

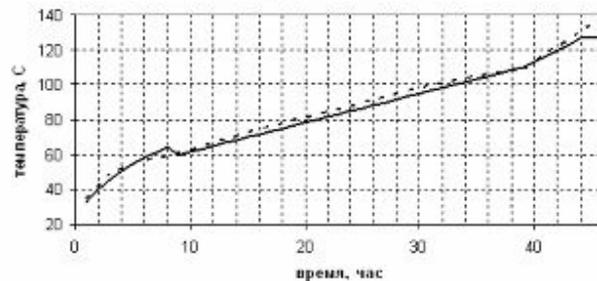
$$\dot{T} < \frac{const}{\delta_0}$$



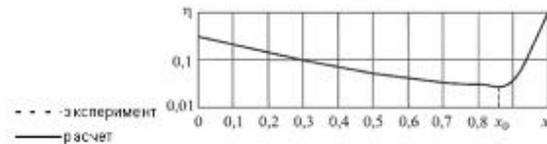
Нужно найти

$$P(t)$$

Температура



Вязкость



$$\chi = \Delta T / \Delta T_m$$

4. Модель уплотнения стенки ТЗП и вытеснения излишков связующего ЛБС-4 при автоклавной обработке

Основы: Закон Дарси для течений в телах с пористостью Π под давлением Δp

$$\frac{d \ln \delta}{dx} = - \frac{2K_k^* \Delta T_m \Delta p}{R^2 + 2RH \dot{T} \eta^*(x)}$$

Начало нагрева

Момент подачи давления

Момент сброса давления

Окончание нагрева

0

θ

t_k

1

x

Температурная область минимальной вязкости связующего

Область соответствия долей связующего и наполнителя в ТЗП

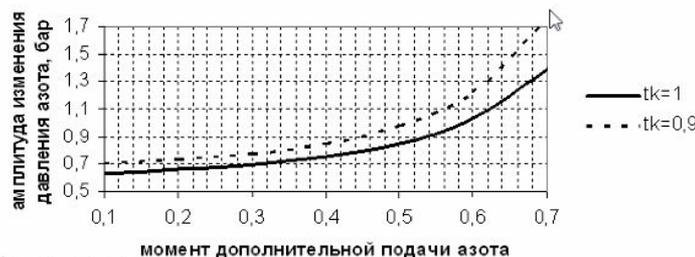
$$K_k = \frac{C_D d_n^2 \Pi^3}{\bar{l} 16 (1 - \Pi)^2}$$

- коэффициент Козени $C_D=0,5$, $d_n=0,2$ мм - диаметр нитей

$$K_k^* = K_k \frac{R}{R+H}$$

η^*_0 - начальная вязкость связующего, $\eta^*(x)$ - нормированная вязкость

$$\Delta p = \frac{\ln \frac{\alpha_0}{\alpha_s}}{\frac{2K_k^* \Delta T_m}{(R^2 + 2RH)\dot{T}\eta_0^*} \left\{ \frac{\exp \beta_T t_k}{\beta_T b} \left[1 - \frac{a}{\beta_T} (\beta_T - t_k) \right] - \frac{\exp(\beta_T \theta)}{\beta_T b} \left[1 - \frac{a}{\beta_T} (\beta_T \theta - t_k) \right] \right\}}$$



Связь давления P с моментом начала опрессовки изделия θ

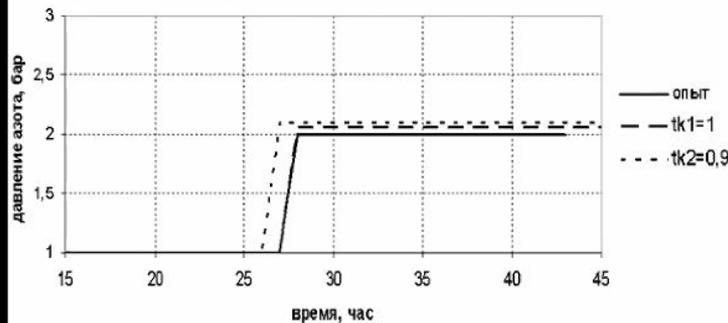
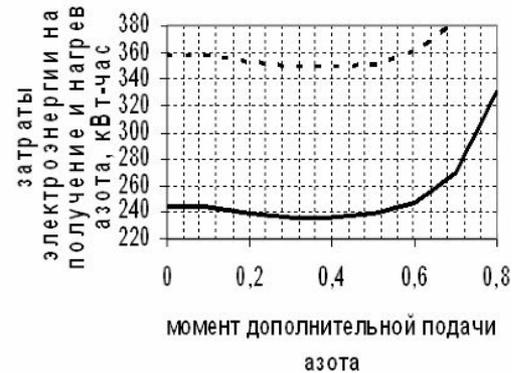
5. Выбор закона изменения давления на основе минимизации расхода электроэнергии на производство азота и нагрев технологической системы

Алгоритмы автоклавной обработки:

I-Экономичный



II-Прогрессивный



Сравнение эмпирически отработанных рекомендаций с результатами оптимизации затрат

6. Научно – практические результаты диссертации: создание оснащения и отработка технологии пропитки

1. Спроектирована и изготовлена опытно- промышленная пропиточная установка и камера высокого давления

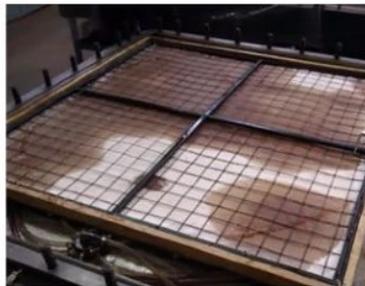


2. Отработана технология 3-х кратной вакуумной пропитки-сушки :

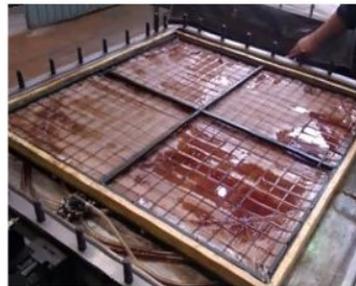
№ перехода	Наименование технологического перехода	Технологические параметры	
		Давление, МПа	Время, ч
1	Вакуумирование камеры с заготовкой	0,02	1
2	Подача порции связующего в камеру	0,02	1
3	Выдержка	0,02	8...50
4	Вакуумная сушка	0,005	2...3

Патент РФ № 2484956 от 26.06.2013 «Способ изготовления препрега»
Патент РФ № 2565709 от 12.05.2014 «Способ изготовления препрега с автоматическим контролем технологического режима»

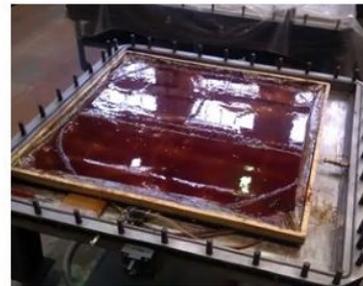
3. Изготовлены и изучены образцы размером 1100x1100 мм после 3-х кратной пропитки многослойных полотен из материалов ПВП-КТ и ПВП - КТК



Заготовка после 1 пропитки-сушки

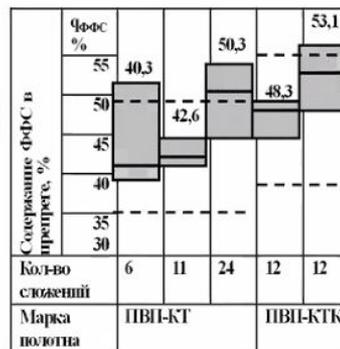


Заготовка после 2 пропитки-сушки



Заготовка после 3 пропитки-сушки

Содержание ФФС в пропитанных Заготовках (препрегах)



42,6 — Величина средних значений
 — диапазон значений
 - - - Границы допустимых значений

Автоклавный комплекс

Разработано ТЗ на проект, изготовлен и введен в эксплуатацию автоматизированный автоклавный комплекс



Основные технические параметры:

Габариты рабочего пространства:
Ø5500x6000;

Рабочая среда газообразный азот;

Скорость нагрева: 0-2 °С/мин;

Скорость охлаждения: 0-3 °С/мин

Максимальная рабочая температура: 350 °С

Максимальное рабочее давление: 1,6 МПа

Неравномерность температуры в рабочем пространстве: ± 2 °С;

Исполнение реакционной камеры: вертикальная;

Емкость азотной накопительной установки: 327 м³;

Максимальное давление азота в накопительной установке: 3,5 МПа;

Производительность азотной станции: 105 м³/час.

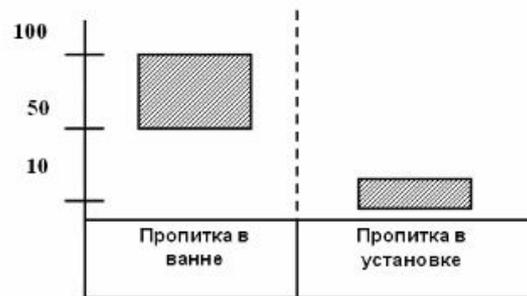
Патент RU № 2574261 С1 от 30.12.2015
«Устройство и способ изготовления многослойных изделий из полимерных композиционных материалов»
Патент RU № 2574262 С1 от 30.12.2015
«Автоматизированный комплекс для изготовления композиционных материалов»

Сравнение свойств ТЗП с требованиями ТЗ на изделие

Показатели	Среднее значение		Сравнительная оценка
	Старая технология	Новая технология	
Степень поликонденсации	95,6	97,1	Повышение на 1,6%
Предел прочности при изгибе (ЛТЭ), МПа	56,3	61,3	Повышение на 11%
Предел прочности при сжатии (ЛТЭ), МПа	68,2	89	Повышение на 13%
Масса ЛТЭ	212	208	Снижение на 1,6%
Масса оболочки СА	57,3	56,2	Снижение на 2%
Массовая доля ФФС, %	>28	>35	Повышение на 25%

Улучшение технико-экономических показателей по предложенной технологии изготовления ТЗП

Использование технологии 3-х кратной пропитки – сушки заготовки ТЗП дало:

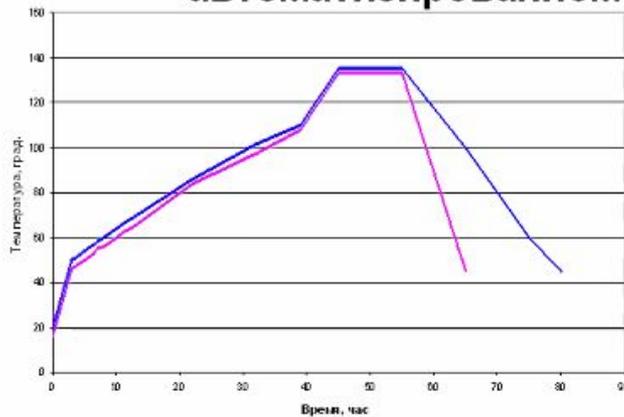


Удельный расход лака ЛБС-4 сокращен в 7 раз



Длительность пропитки сокращена в 10 раз

Использование предложенной технологии автоклавной обработки ТЗП на автоматизированном комплексе дало:



— Базовая технология

— Предложенная технология

Длительность термообработки в автоклаве сокращена на 15%

Вид энергоресурсов	Годовая экономия, %
Электроэнергия	18,3
Техническая вода	90
Тепловая энергия	7,4

Достигнутая экономия энергоресурсов

- Спасибо за внимание