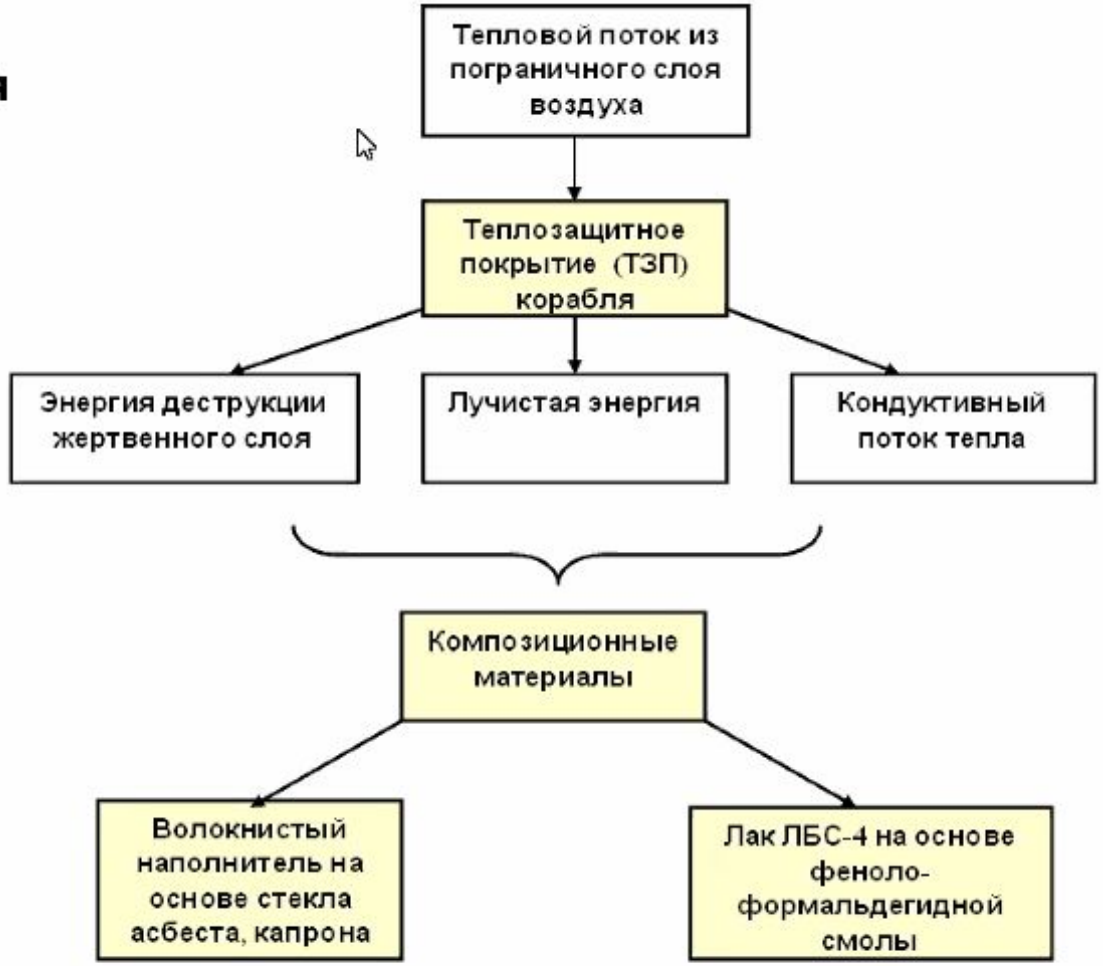
Лекция Тарасова от 26.11.2020

1. Организация абляционной теплозащиты космического корабля

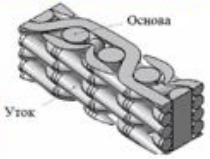
Схема абляции теплозащитного покрытия



Композитные теплозащитные конструкции, освоенные серийным производством

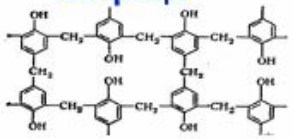
Армирующий наполнитель

Структура вязально-прошивных полотен



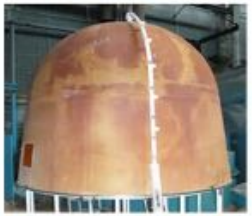
+

Матрица



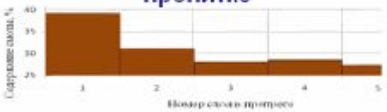
Пространственная сетчатая структура резольной ФФС

Лобовой теплозащитный экран



Теплозащитная оболочка корпуса СА

Доля ФФС при однократной пропитке



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»

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

Возвращаемый аппарат ПТК «Федерация»

ТЗП на основе стеклосотового каркаса заполненного фенолоформальдегидной 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 технология 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)

$$\vartheta_{CB} = \frac{K_D}{\eta_C}\frac{\Delta P}{l}St$$

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**

Схема стенда пропитки и практическая реализация

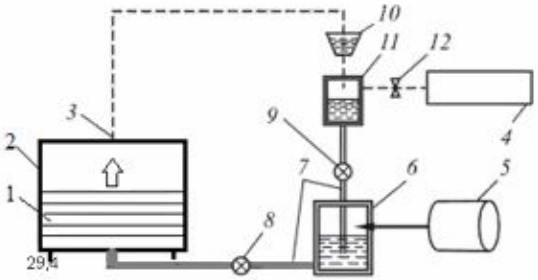
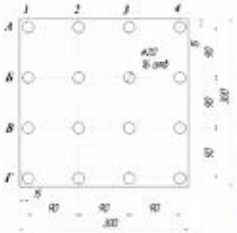


Схема забора проб



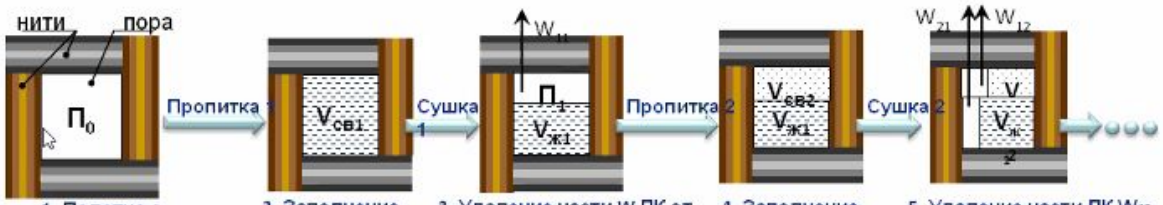
Данные однократной пропитки

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

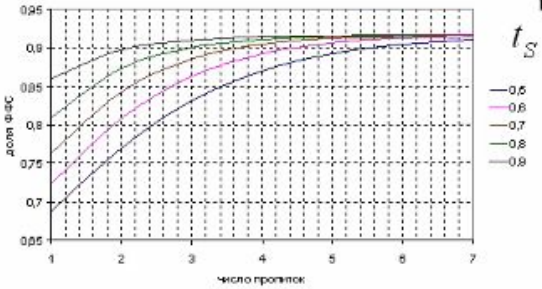
ε =(18,3%; 7,5%; 9,6%)

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

Схема ступенчатого увеличения доли феноло-формальдегидной смолы (ФФС)



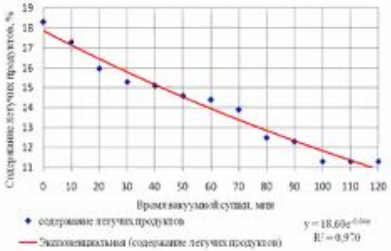
Динамика изменения доли ФФС от числа циклов пропитка-сушка



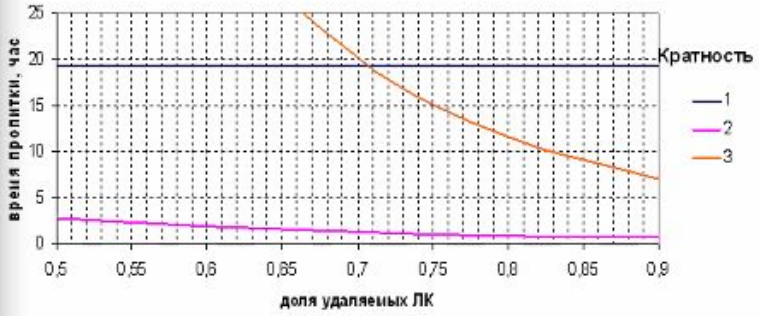
Модель удаления ЛК при сушке

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

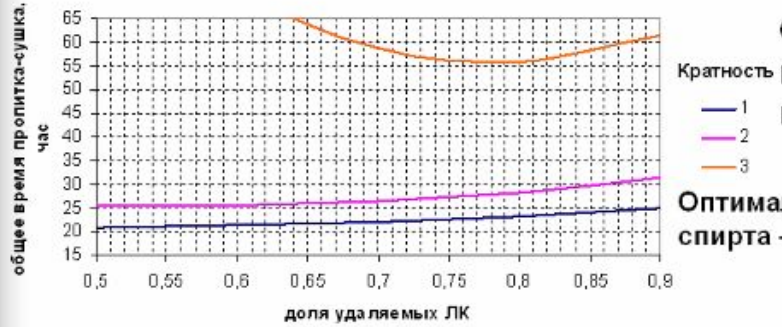
t_S - время сушки αt_S -приведенное время сушки



Зависимость затрат времени при многократной пропитке - сушке



Время пропитки пространства между нитями



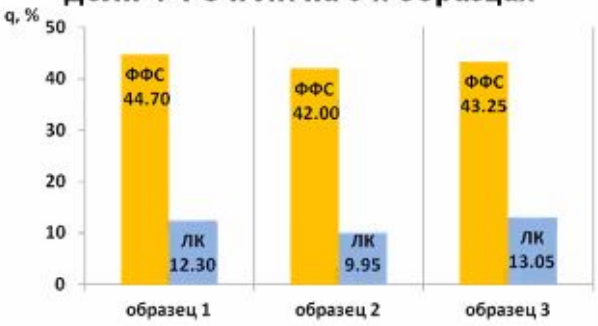
Общее время многократной пропитки-сушки

Оптимальная часть удаляемого спирта – 75…80%

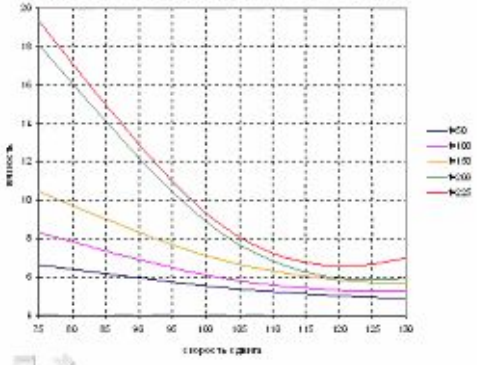
Результаты испытания предложенной технологии 3-х трехкратной пропитки-сушки заготовок ТЗП

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

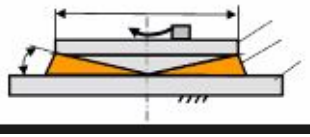
Результаты изменения доли ФФС и ЛК на 3-х образцах



Влияние скорости сдвига



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

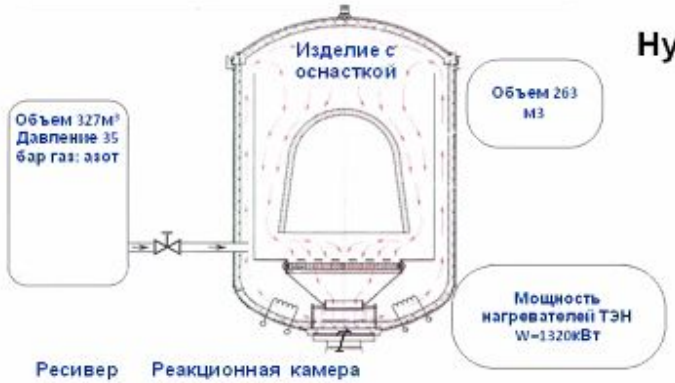


Автоклавная обработка ТЗП космического корабля

Схема нагрева и движения азота

Известно условие

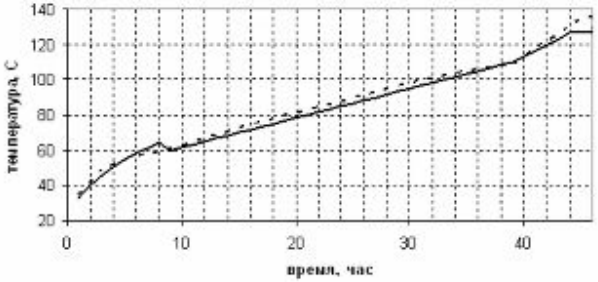
$$\dot{T} < \frac{const}{\delta_0}$$



Нужно найти

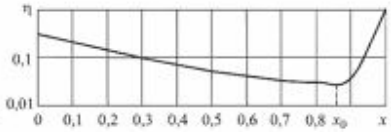
$$P(t)$$

Температура



- - - эксперимент
——— расчет

Вязкость



$\chi = \Delta T / \Delta Tm$

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

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

$$\frac{d\ln\delta}{dx} = -\frac{2K_k^*}{R^2+2RH}\frac{\Delta T_m}{\dot{T}}\frac{\Delta p}{\eta_0^*\eta^*(x)}$$

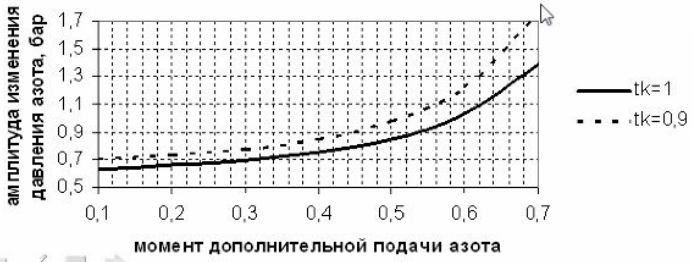
$$K_k = \frac{C_D}{\tilde{l}}\frac{d_n^2}{16}\frac{\Pi^3}{(1-\Pi)^2}$$

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

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

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

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



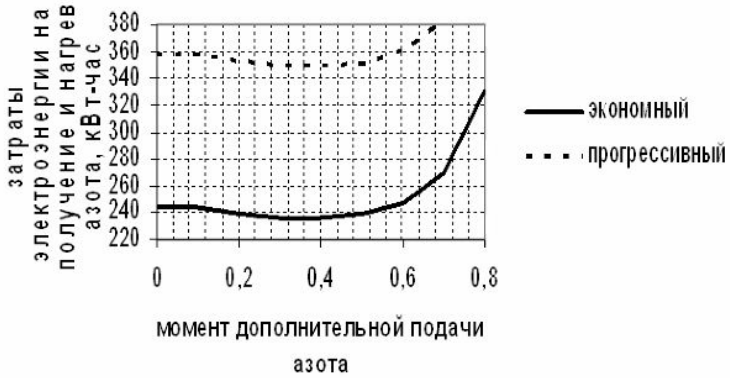
Связь давления *P* с моментом начала опрессовки изделия *θ*

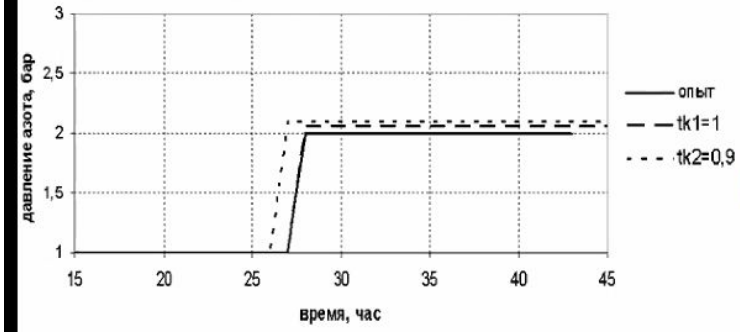
5. Выбор закона изменения давления на основе минимизации расхода электроэнергии на производство азота и нагрев технологической системы

Алгоритмы автоклавной обработки:

I-Экономичный

II-Прогрессивный

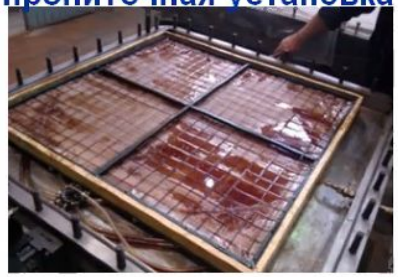




Сравнение эмпирически отработанных рекомендаций с результатами оптимизации затрат

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

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

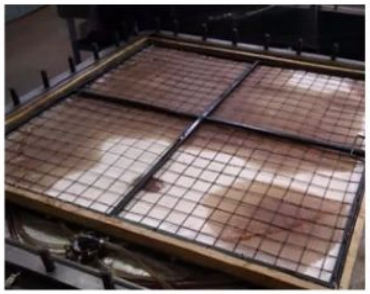


2. Отработана технология 3-х кратной вакуумной пропитки-сушки :

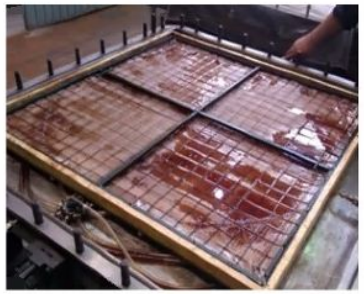
№ перехода	Наименование технологического перехода	Технологические параметры	
		Давление, МПа	Время, ч
1	Вакуумирование камеры с заготовкой	0,02	1
2	Подача порции связующего в камеру	0,02	1
3	Выдержка	0,02	8…50
4	Вакуумная сушка	0,005	2…3

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

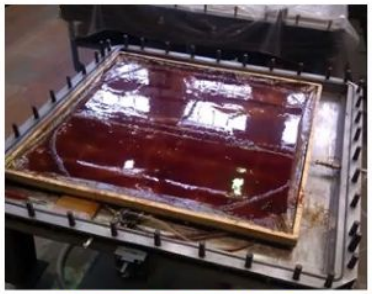
3. Изготовлены и изучены образцы размером 1100х1100 мм после 3-х кратной пропитки многослойных полотен из материалов ПВП-КТ и ПВП - КТК



Заготовка после 1 пропитки-сушки



Заготовка после 2 пропитки-сушки



Заготовка после 3 пропитки-сушки

Содержание ФФС в пропитанных Заготовках (препрегах)

Автоклавный комплекс

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

Основные технические параметры:

Габариты рабочего пространства: Ø5500х6000;
Рабочая среда газообразный азот;
Скорость нагрева: 0-2 °С/мин;
Скорость охлаждения: 0-3 °С/мин

Максимальная рабочая температура: 350 °С
Максимальное рабочие 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.

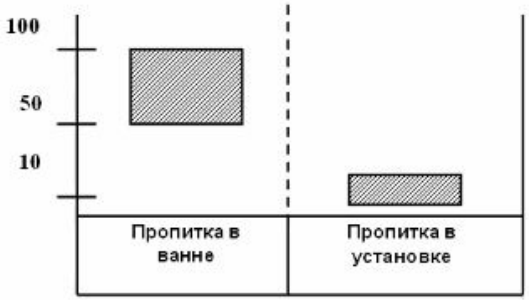
Патент RU № 2574261 C1 от 30.12.2015 «Устройство и способ изготовления многослойных изделий из полимерных композиционных материалов»
Патент RU № 2574262 C1 от 30.12.2015 «Автоматизированный комплекс для изготовления композиционных материалов»

Сравнение свойств ТЗП с требованиями ТЗ на изделие

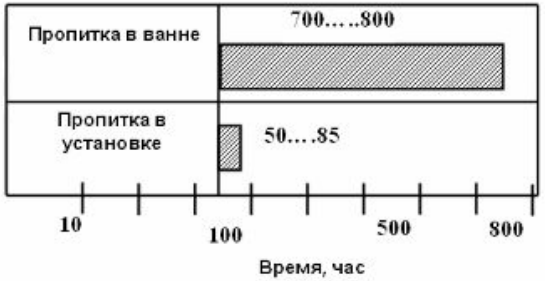
Показатели	Среднее значение		Сравнительная оценка
	Старая технология	Новая технология	
Степень поликонденсации	95,6	97,1	Повышение на 1,6%
Предел прочности при изгибе (ЛТЭ), МПа	56,3	61,3	Повышение на 11%
Предел прочности при сжатии (ЛТЭ), МПа	68,2	89	Повышение на 13%
Масса ЛТЭ	212	208	Снижение на 1,6%
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:

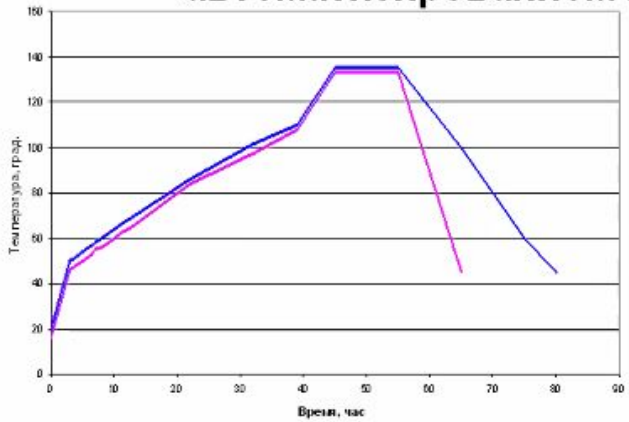


Удельный расход лака ЛБС-4 сокращен в 7 раз



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