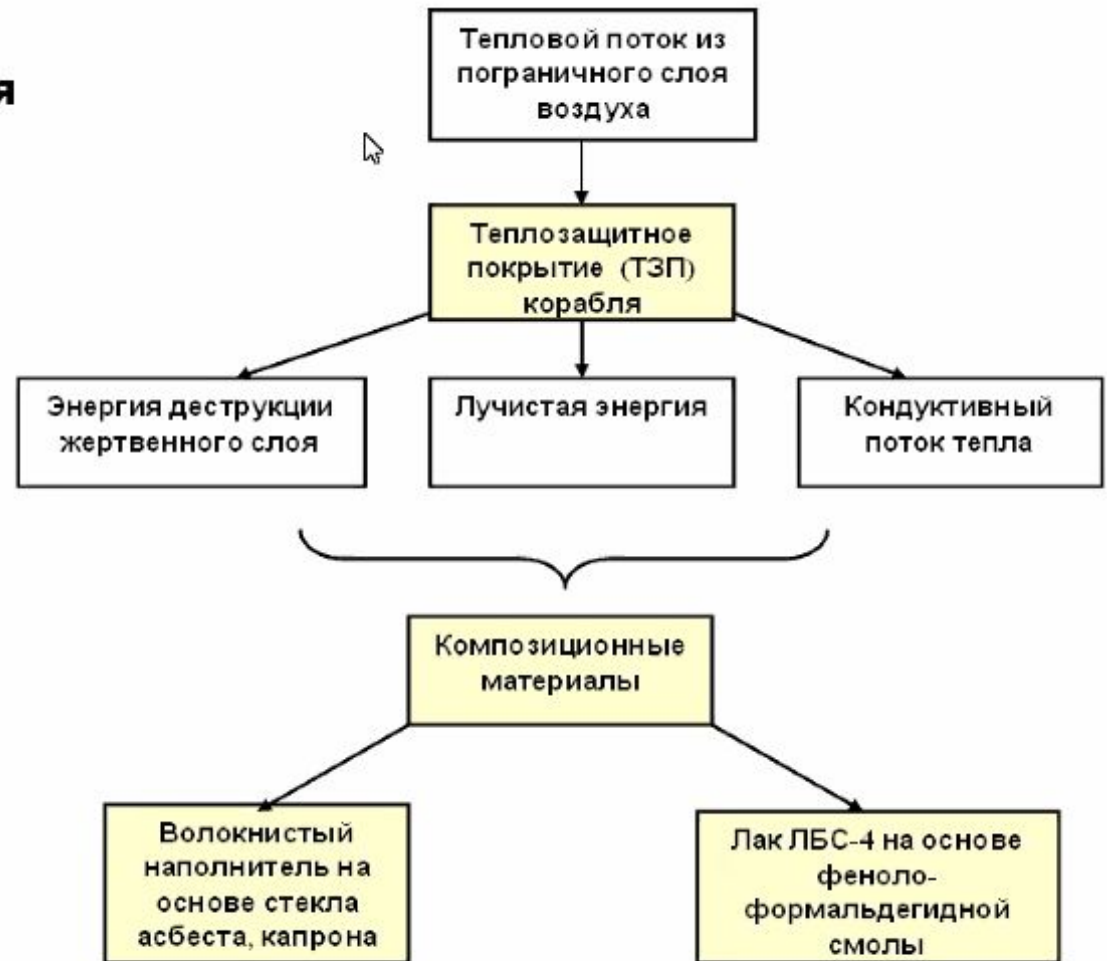


Лекция Тарасова от  
26.11.2020

# 1. Организация абляционной теплозащиты космического корабля

Схема абляции теплозащитного покрытия



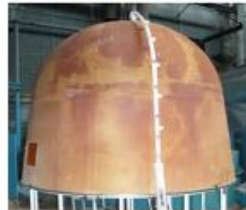
# Композитные теплозащитные конструкции, освоенные серийным производством

Армирующий наполнитель

Структура вязально-прошивных полотен

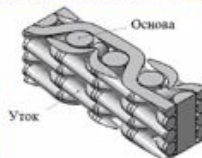
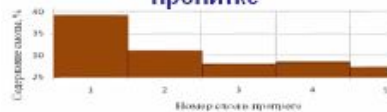


Лобовой теплозащитный экран



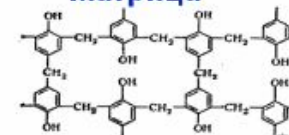
Теплозащитная оболочка корпуса СА

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 <sup>3</sup> | 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

$\eta_c$  -вязкость жидкости

$K_D$  -коэффициент Козени

$\Delta p$  -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

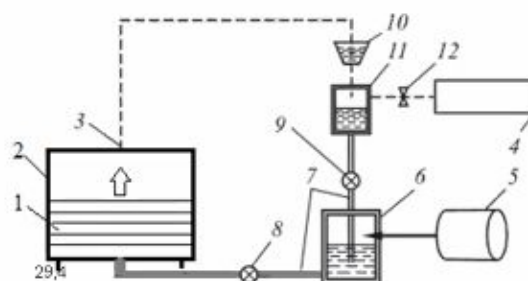
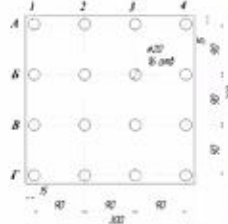


Схема забора проб



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

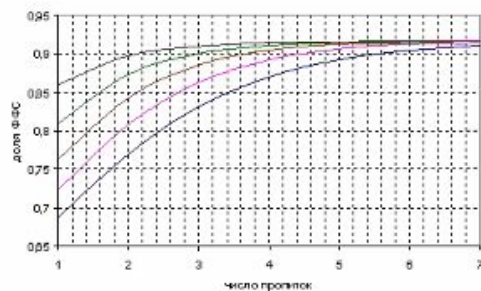


# Принцип увеличения доли феноло-формальдегидной смолы при многократной пропитке и вакуумной сушке заготовки ТЗП

Схема ступенчатого увеличения доли феноло-формальдегидной смолы (ФФС)



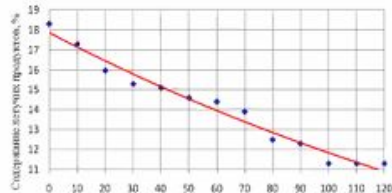
Динамика изменения доли ФФС от числа циклов пропитка-сушка



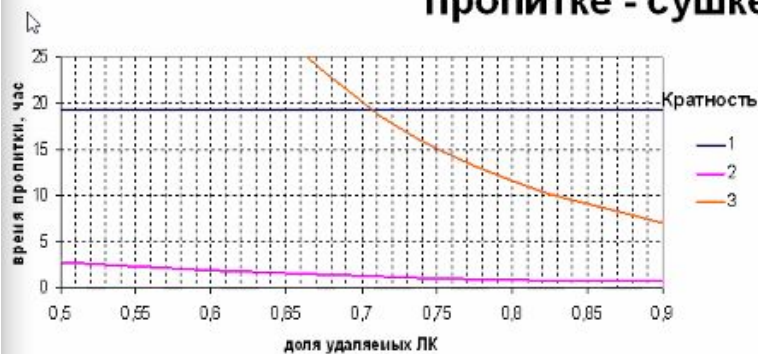
Модель удаления ЛК при сушке

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

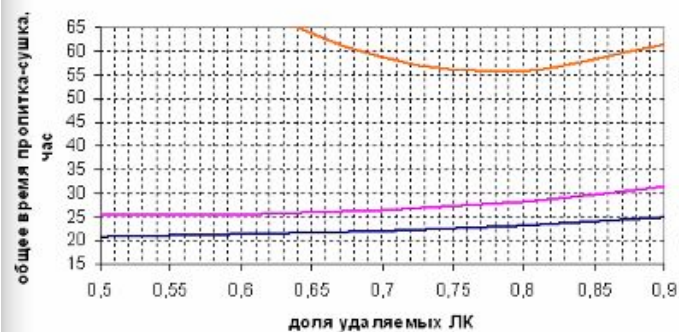
$t_S$  - время сушки  $at_S$  - приведенное время сушки



## Зависимость затрат времени при многократной пропитке - сушке



**Время пропитки пространства между нитями**



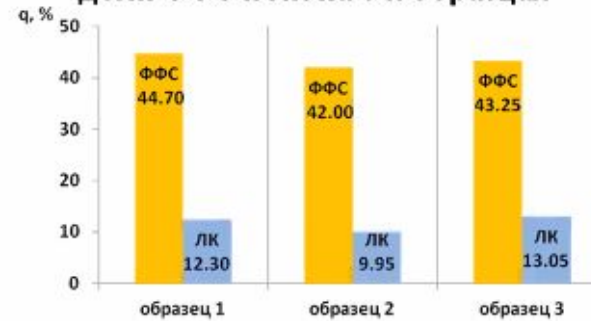
**Общее время многократной пропитки-сушки**

Оптимальная часть удаляемого спирта – 75...80%

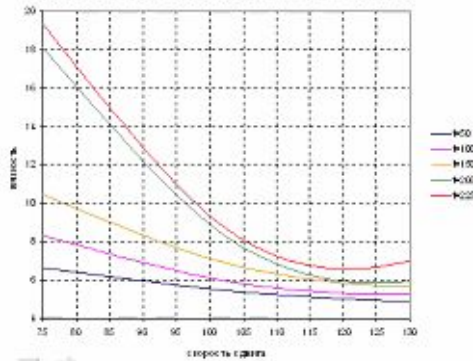
## Результаты испытания предложенной технологии 3-х трехкратной пропитки-сушки заготовок ТЗП

| 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       |

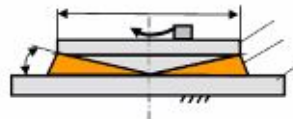
Результаты изменения доли ФФС и ЛК на 3-х образцах



Влияние скорости сдвига



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



# Автоклавная обработка ТЗП космического корабля

Схема нагрева и движения азота

Известно  
условие

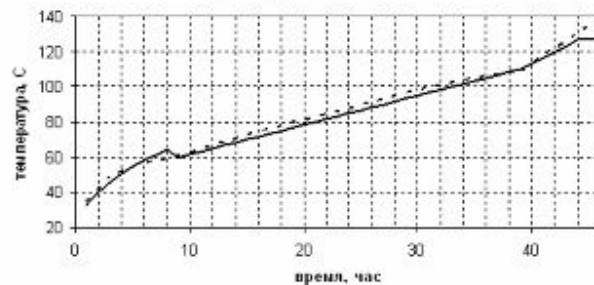
$$\dot{T} < \frac{const}{\delta_0}$$

Нужно найти

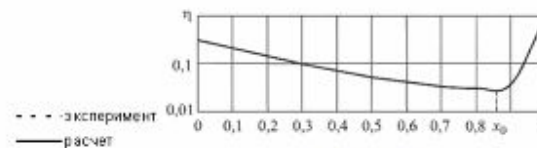
$$P(t)$$



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  $\Pi$  под давлением  $\Delta p$

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

Начало нагрева

0

Температурная область минимальной вязкости связующего

Момент подачи давления

$\theta$

Момент сброса давления

$t_k$

Область соответствия долей связующего и наполнителя в ТЗП

Окончание нагрева

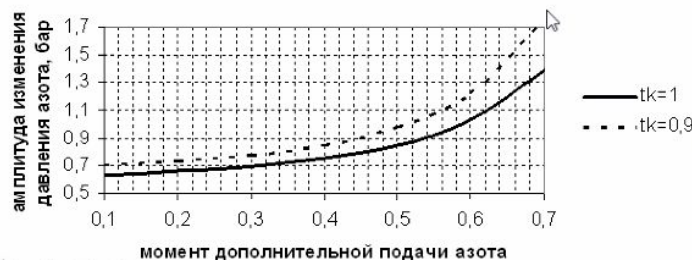
1

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

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

$$K_k^* = K_k \frac{R}{R+H} \quad \eta^*_0 - \text{начальная вязкость связующего, } \eta^*(x) - \text{нормированная вязкость}$$

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



**Связь давления  $P$  с моментом начала опрессовки изделия  $\theta$**



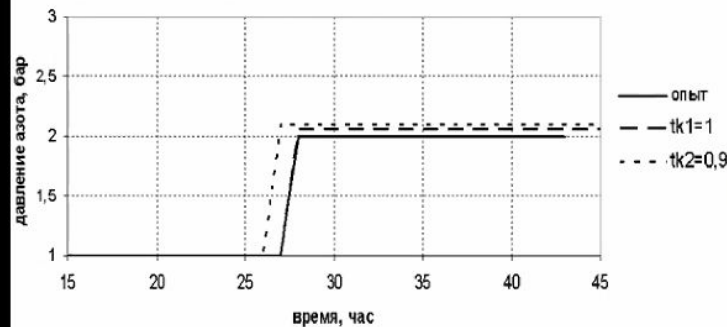
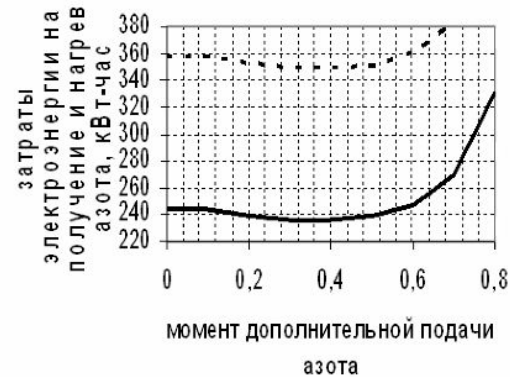
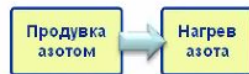
## 5. Выбор закона изменения давления на основе минимизации расхода электроэнергии на производство азота и нагрев технологической системы

Алгоритмы автоклавной обработки:

I-Экономичный



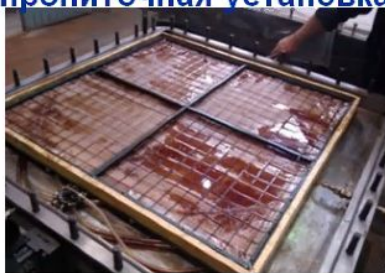
II-Прогрессивный



**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

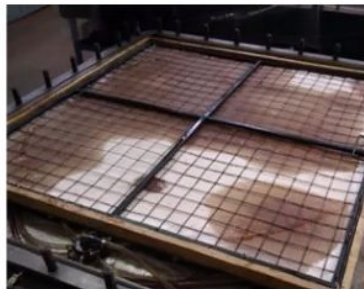


2. Отработана технология 3-х кратной вакуумной пропитки-сушки :

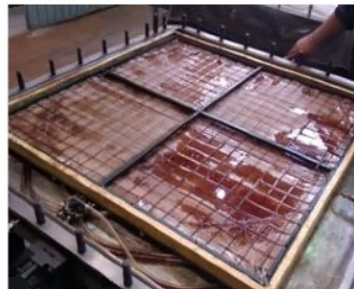
| № перехода | Наименование технологического перехода | Технологические параметры |          |
|------------|--|---------------------------|----------|
|            |  | Давление, МПа             | Время, ч |
| 1          | Вакуумирование камеры с заготовкой     | 0,02                      | 1        |
| 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»

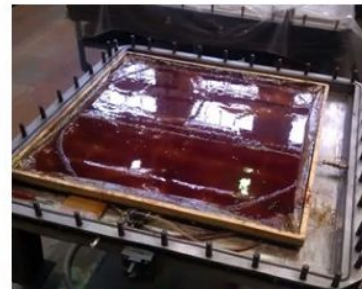
**3. Изготовлены и изучены образцы размером 1100x1100 мм после 3-х кратной пропитки многослойных полотен из материалов ПВП-КТ и ПВП - КТК**



Заготовка после 1 пропитки-сушки

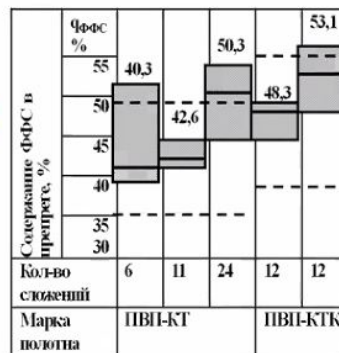


Заготовка после 2 пропитки-сушки



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 м<sup>3</sup>;

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

Производительность азотной станции: 105 м<sup>3</sup>/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»



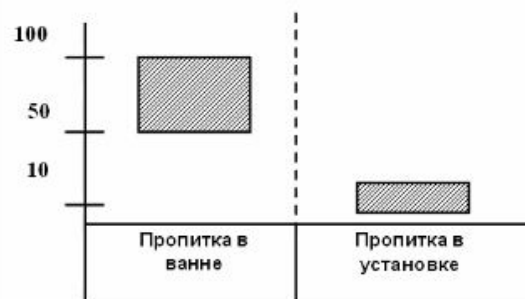
## Сравнение свойств ТЗП с требованиями ТЗ на изделие

| 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%     |

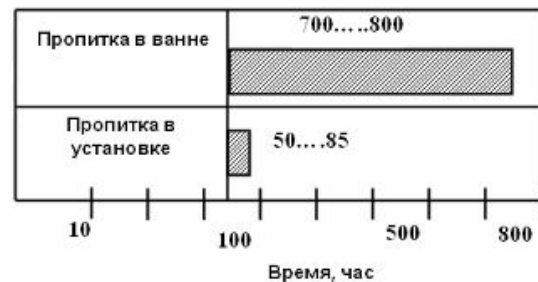


## Улучшение технико-экономических показателей по предложенной технологии изготовления ТЗП

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

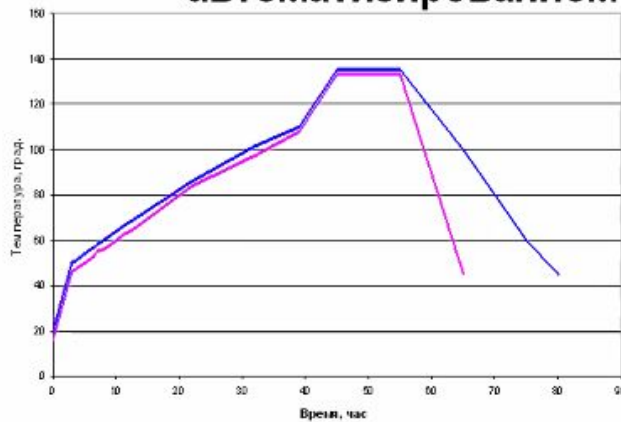


**Удельный расход лака ЛБС-4 сокращен в 7 раз**



**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