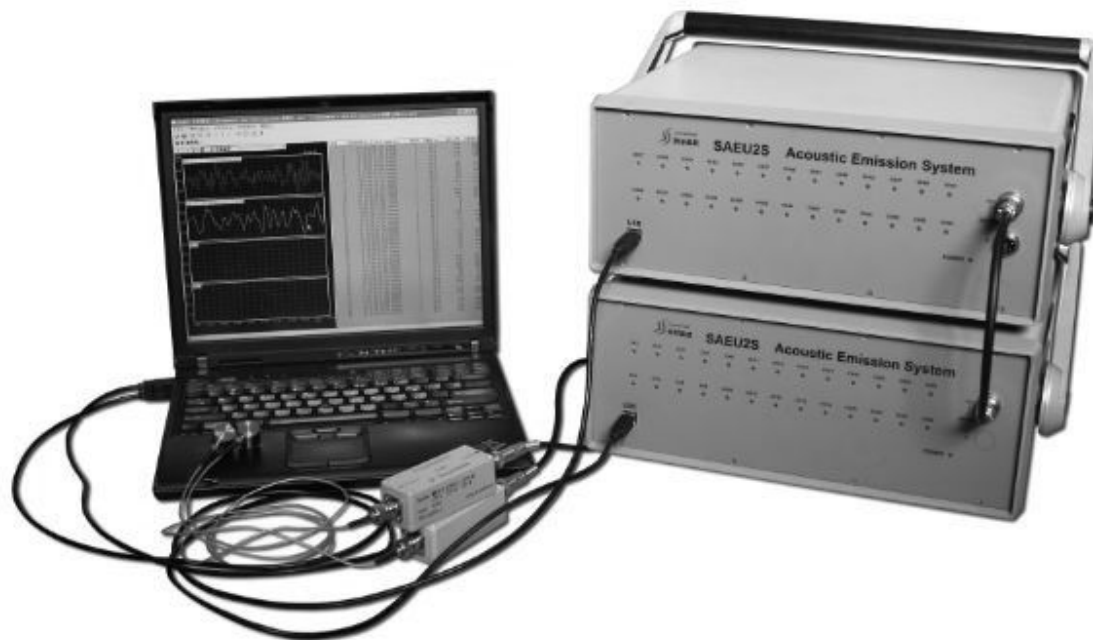


# Метод акустической эмиссии: исследование строительных композитов

---



# Физические методы исследования

---

- Акустический (ультразвуковой) метод
  - Капиллярный метод
  - Радиометрический метод
  - Электро- и магнитостатические методы
  - Электромагнитные (вихретоковый, микроволновый, инфракрасный, оптический, радиационный) методы
-

# Явление АЭ

---

Излучение упругих волн, обусловленное локальной динамической перестройкой внутренней структуры

Источниками АЭ являются дислокации, дислокационные поля, трещины

Развитие дефектов стимулируется внешним источником механического напряжения или эксплуатационными нагрузками

---

# Сравнительная характеристика метода

Акустическая эмиссия	Большинство других методов интроскопии
Обнаруживает движение, развитие дефектов	Обнаруживают геометрическую форму дефектов
Требует нагружения (возможно – эксплуатационными воздействиями)	Не требуют нагружения
Каждое нагружение уникально	Контроль воспроизводим
Чувствителен к структуре материала	Менее чувствительны к материалу
Менее чувствительны к геометрии дефектов	Более чувствительны к геометрии
Требует меньших усилий при проведении контроля продукции/процессов	Требуют больших усилий при проведении контроля продукции/процессов
Требует доступ только в местах установки датчиков	Требуют доступ ко всей поверхности объекта
Контролирует конструкцию за один цикл нагружения	Постепенное сканирование участков конструкции

# Параметры АЭ (ГОСТ 27655)

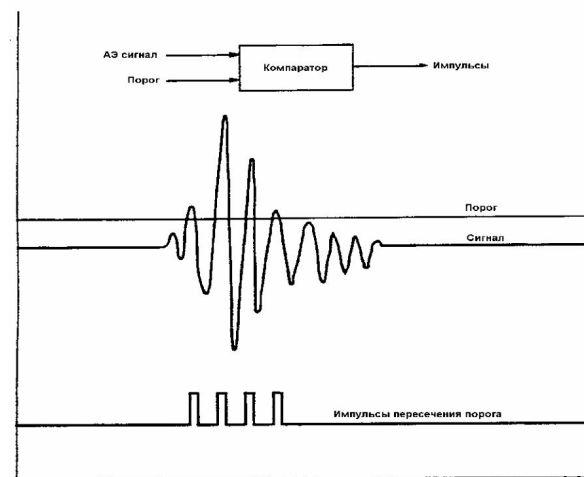
---

Амплитуда АЭ – пиковое значение сигнала (механического, электрического) или среднее по выбранному промежутку

Энергия АЭ – энергия, выделяемая источником; условная характеристика, вычисляемая как квадрат амплитуды или площадь под огибающей

Суммарный счет АЭ – число превышений сигналом заданного уровня дискриминации

Активность АЭ – число импульсов в единицу времени



# Области применения метода АЭ

---

- контроль процесса сварки
  - контроль износа и соприкосновения оборудования при механической обработке
  - контроль износа и потерь смазки на объектах, связанных с вращением и трением компонент
  - обнаружение и контроль течей, кавитации и потоков жидкости
  - контроль коррозионных процессов, фазовых переходов
-

# Механизмы АЭ

---

- Движение дислокации и их скоплений
  - Пластическая деформация
  - Движение границ доменов
  - Фазовые и полиморфные переходы
  - Рост трещин
-

# Применение АЭ для исследования строительных композитов

---

- Скорость распространения звука зависит от плотности, вязкости, пластичности и степени структурной неоднородности
- Имеют место дисперсия, интерференция и рассеяние акустических волн в результате их отражения и преломления на границах неоднородностей

Схема регистрации сигналов АЭ:

- источник АЭ и канал передачи (объект контроля)
  - преобразователь акустических сигналов в электрические
  - радиоэлектронная аппаратура
-



# Описание АЭ в частотной области

---

$S(t)$  – сигнал АЭ;

$G(t, \dots)$  – передаточная характеристика объекта;

$X(t, \dots)$  – сигнал на входе приемного преобразователя;

$U(t)$  – отклик приемного преобразователя.

$$\tilde{S}(\omega) = \int S(t) e^{-i\omega t} dt$$

$$S(t) = \frac{1}{2\pi} \int \tilde{S}(\omega) e^{-i\omega t} d\omega$$

$$\tilde{G}(\omega, k_1, k_2) = \iiint G(t, x_1, x_2) e^{-i(\omega t + k_1 x_1 + k_2 x_2)} dt dx_1 dx_2$$

$$G(t, x_1, x_2) = \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint \tilde{G}(\omega, k_1, k_2) e^{-i(\omega t + k_1 x_1 + k_2 x_2)} d\omega dk_1 dk_2$$

$\tilde{S}(\omega)$  – системная функция источника;

$\tilde{G}(\omega, k_1, k_2)$  – переходная функция объекта.

---

# Акустические свойства КМ

Скорость звука

$$E = E_m (1 + 11\nu_f^{1,7})$$

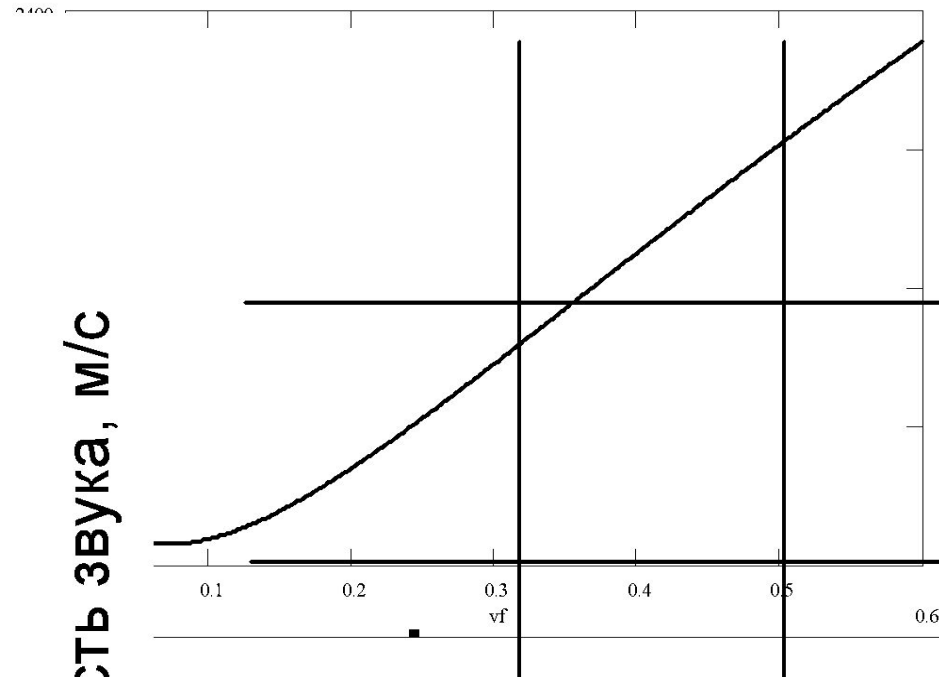
$$\rho = \rho_m + (\rho_f - \rho_m)\nu_f$$

$$g = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_m (1 + 11\nu_f^{1,7})}{\rho_m + (\rho_f - \rho_m)\nu_f}}$$

Собственные частоты

$$\omega = \pi \frac{g}{l}$$

$$\omega = \frac{\pi \rho_f S_s}{3} \sqrt{\frac{E_f}{\rho_f}}$$



# Спектральные свойства КМ

---

Спектральная характеристика объекта цилиндрической формы

$$G(\omega, l, x, \alpha, \beta) = \sqrt{\frac{\operatorname{ch} 2\alpha(l-x) + \cos 2\beta(l-x)}{\operatorname{ch} 2\alpha l + \cos 2\beta l}} \quad G(\omega, x, \vartheta) = \sqrt{\frac{\operatorname{ch} 2\alpha(l-x) + \cos 2(l-x)\frac{\omega}{\vartheta}}{\operatorname{ch} 2\alpha l + \cos 2\frac{\omega}{\vartheta}l}}$$

$$G(\omega, x, v_f) = \sqrt{\frac{\operatorname{ch} 2\alpha(l-x) + \cos\left(2\omega(l-x)\sqrt{\frac{\rho_m + (\rho_f - \rho_m)v_f}{E_m(1+11v_f^{1,7})}}\right)}{\operatorname{ch} 2\alpha l + \cos\left(2\omega l\sqrt{\frac{\rho_m + (\rho_f - \rho_m)v_f}{E_m(1+11v_f^{1,7})}}\right)}}$$

---

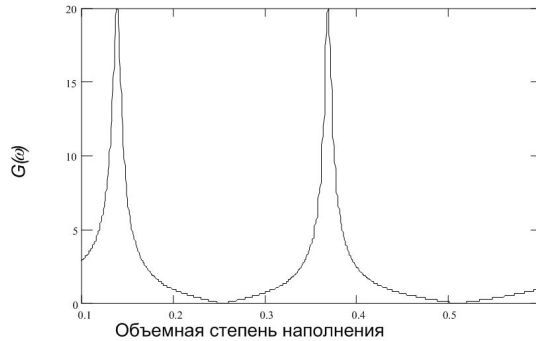
# Спектральные свойства КМ

Расширение импульса АЭ

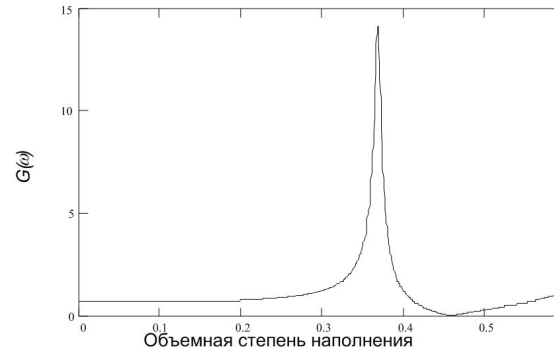
$$\tau_1 = l \sqrt{\frac{\rho_m}{E_m}}$$

$$\tau_2 = l \sqrt{\frac{\rho_f}{E_f}}$$

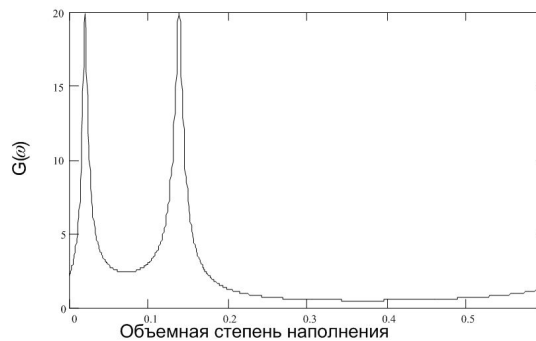
$$\tau = l \left( \sqrt{\frac{\rho_m}{E_m}} - \sqrt{\frac{\rho_f}{E_f}} \right)$$



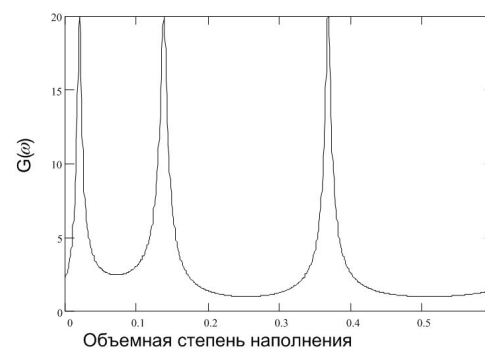
Переходная функция КМ  
(источник АЭ находится вблизи ПП)



Переходная функция КМ  
(расстояние между источником АЭ и ПП составляет 10 мм)



Переходная функция КМ  
(расстояние между источником АЭ и ПП составляет 25 мм)



Переходная функция КМ  
(расстояние между источником АЭ и ПП составляет 50 мм)

# Приемные преобразователи

---

- интерферометрические
  - волоконно-оптические
  - индукционные
  - конденсаторные
  - пьезоэлектрические: два пика чувствительности (180 кГц, 180 мкВ/Па; 400 кГц, 90 мкВ/Па), средняя чувствительность в диапазоне 0...100 кГц — менее 10 мкВ/Па
-

# Характеристики пьезопреобразователей

Интегральная характеристика

$$\tilde{U}(\omega) = \frac{1}{4\pi^2} \iint \tilde{X}(k_1, k_2, \omega) \tilde{H}(k_1, k_2, \omega) C(k_1, k_2, \omega) dk_1 dk_2$$

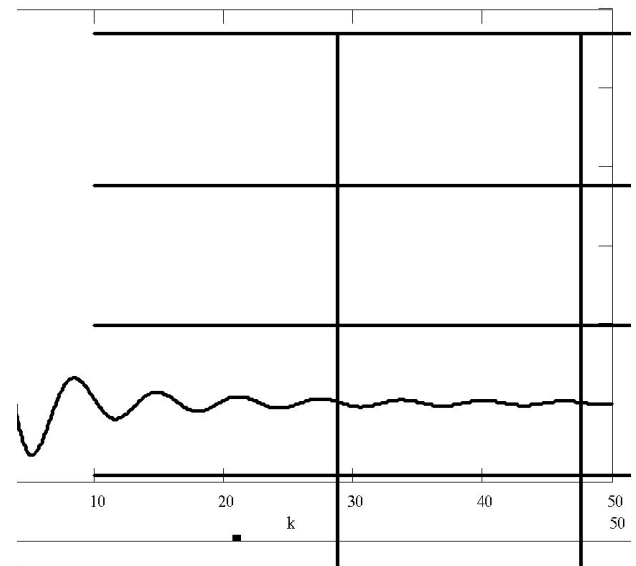
Геометрическая характеристика

$$C(k_1, k_2) = \frac{1}{S} \iint_S e^{i(k_1 r_1 + k_2 r_2)} dr_1 dr_2$$

Геометрическая характеристика преобразователя с круговой чувствительной зоной

$$C(k_1, k_2) = 2 \frac{J_1\left(R\sqrt{k_1^2 + k_2^2}\right)}{R\sqrt{k_1^2 + k_2^2}}$$

$G(k)$



# Приборы регистрации и анализа

---

- Регистрация амплитудных и энергетических характеристик сигнала
  - Интеграция с персональной ЭВМ
  - Анализ временных и частотных характеристик сигнала в реальном времени
  - Подавление помех
-

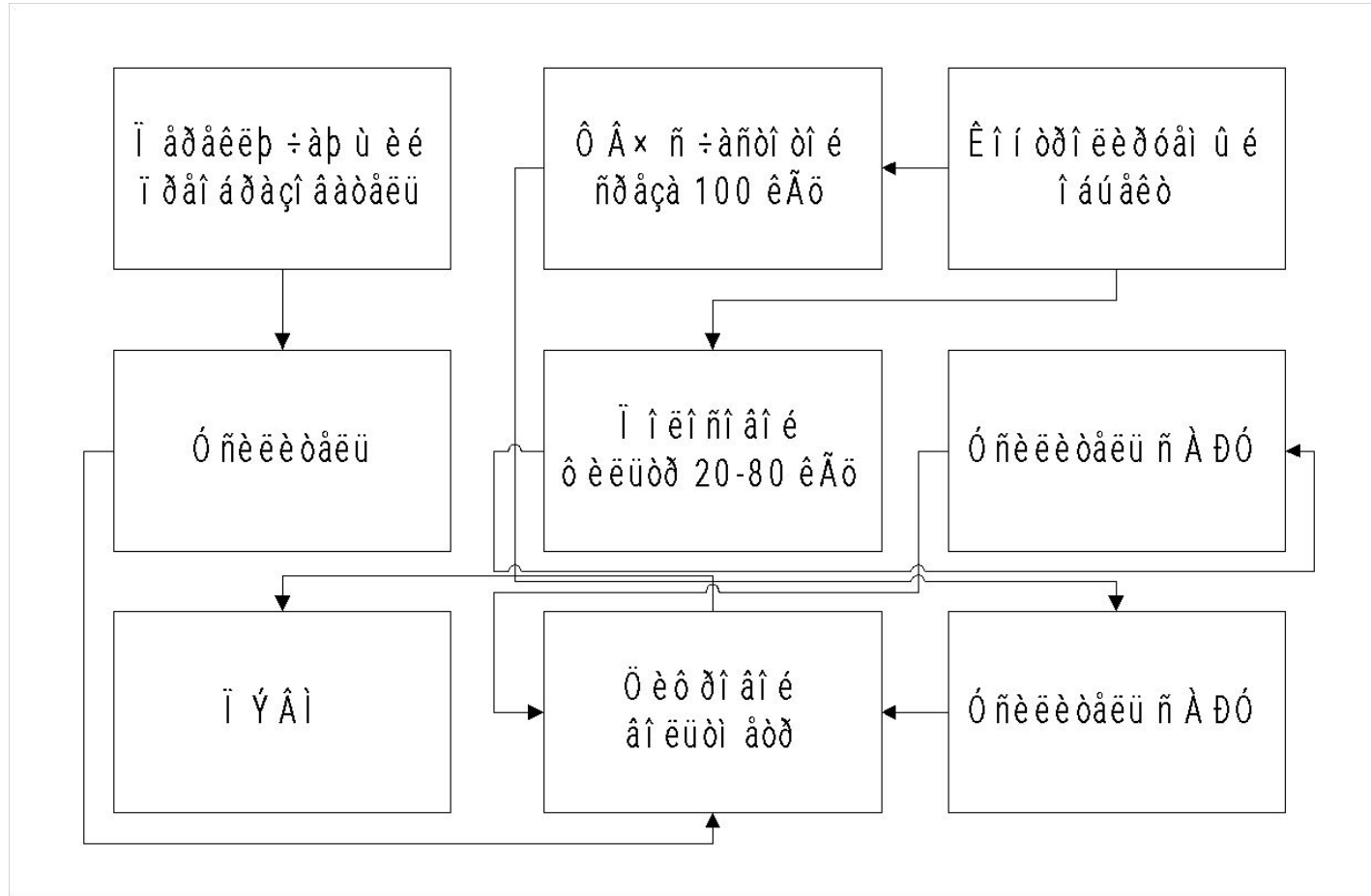
# Подавление помех

---

- Амплитудная селекция основана на различии уровней сигналов АЭ и посторонних помех
  - Частотная селекция реализуется включением полосовых фильтров или фильтров верхних частот
  - Временная селекция основана на различии в крутизне переднего фронта импульса АЭ и помехи
  - Пространственная селекция – ограничение зоны с источниками, сигналы которых регистрируются приемной аппаратурой
  - Селекция мод основана на высокой избирательности приемника к отдельной волне или направлению перемещения
-



# Амплитудно - частотный селектор



# Сопряжение с ЭВМ

---

- Аппаратная обработка: комплексные приборы регистрации и анализа сигналов АЭ, простое устройство сопряжения, простота алгоритмов обработки
  - Программная обработка: простое устройство регистрации и сопряжения, сложные алгоритмы обработки, повышение требований к ЭВМ
-

# Предварительная обработка сигнала АЭ

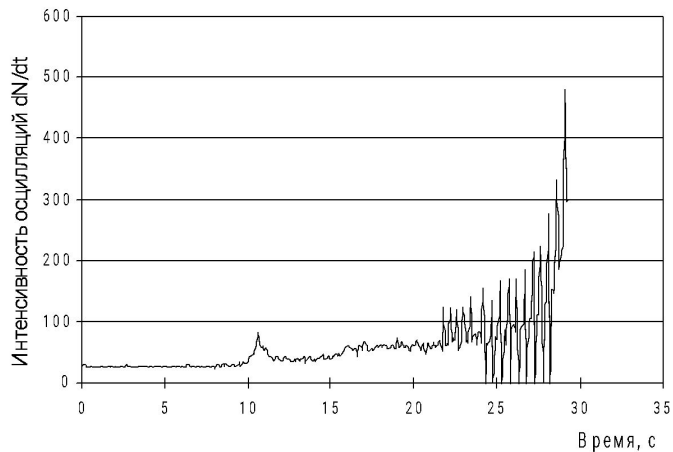
$$u(t_j) = c_0 u(t_j) + \sum_{n=0}^{N_l-1} c_{n-N_l} u(t_j) + \sum_{n=0}^{N_r-1} c_{N_r-n} u(t_j),$$

$c_n$ ,  $n = -N_l, N_r$  – коэффициенты фильтра;  
 $N_l, N_r$  – дискретные границы интервала сглаживания.

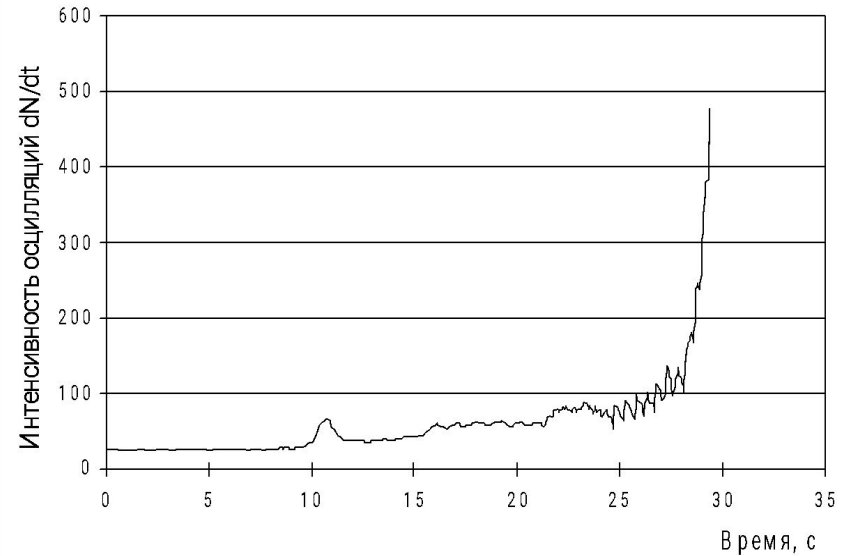
Коэффициенты локального полиномиального фильтра

Коэффициент	$c_{-5}$	$c_{-4}$	$c_{-3}$	$c_{-2}$	$c_{-1}$	$c_0$
Значение	-0,084	0,021	0,103	0,161	0,196	0,207

## Тестовый сигнал АЭ

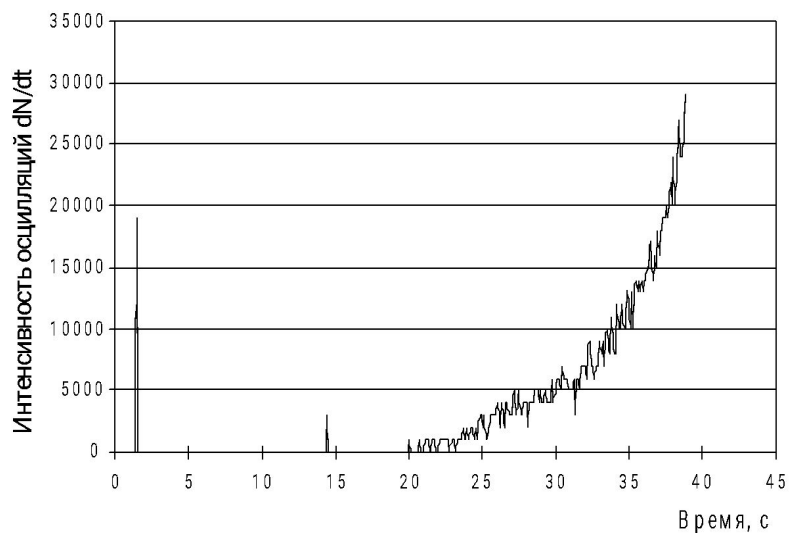


Результат применения локального полиномиального фильтра

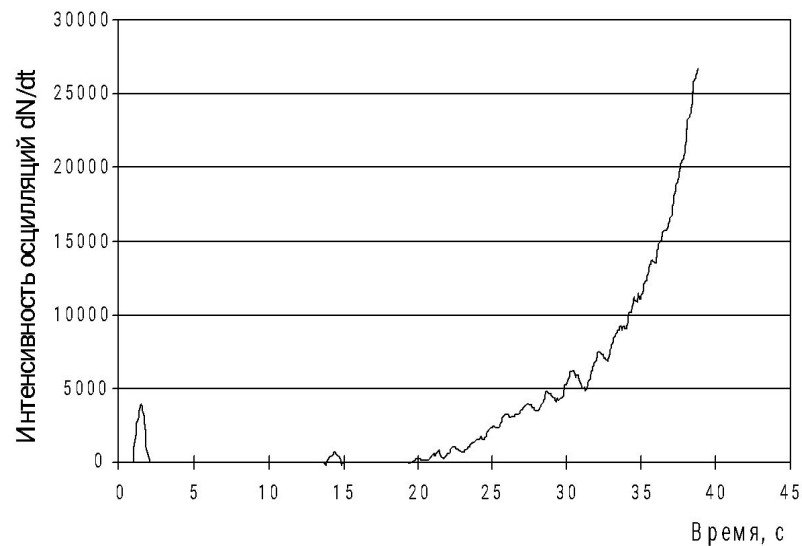


# Фильтрация нормальной шумовой составляющей

Сигнал АЭ, на которой наложен нормальный шум (амплитуда шума составляет 2% от амплитуды сигнала)

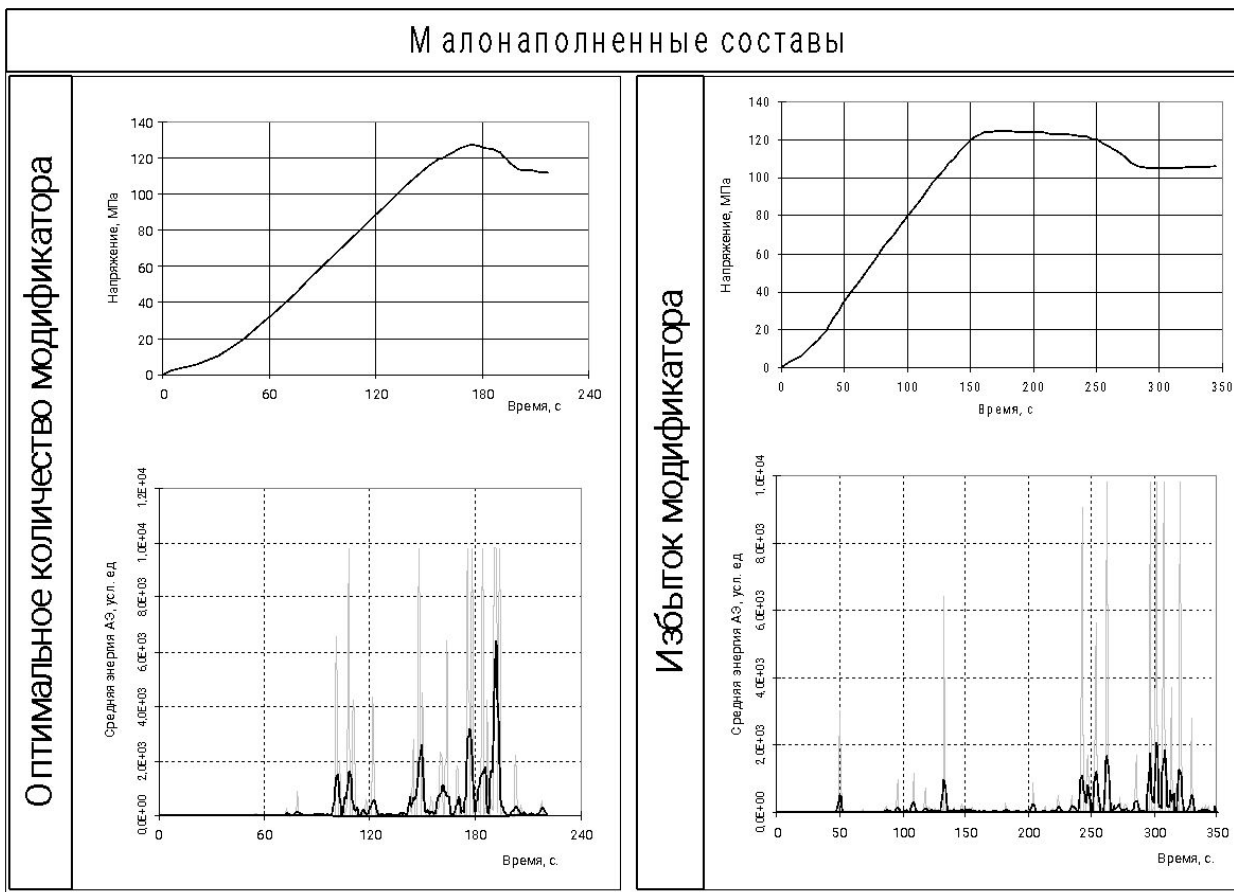


Результат применения локального полиномиального фильтра

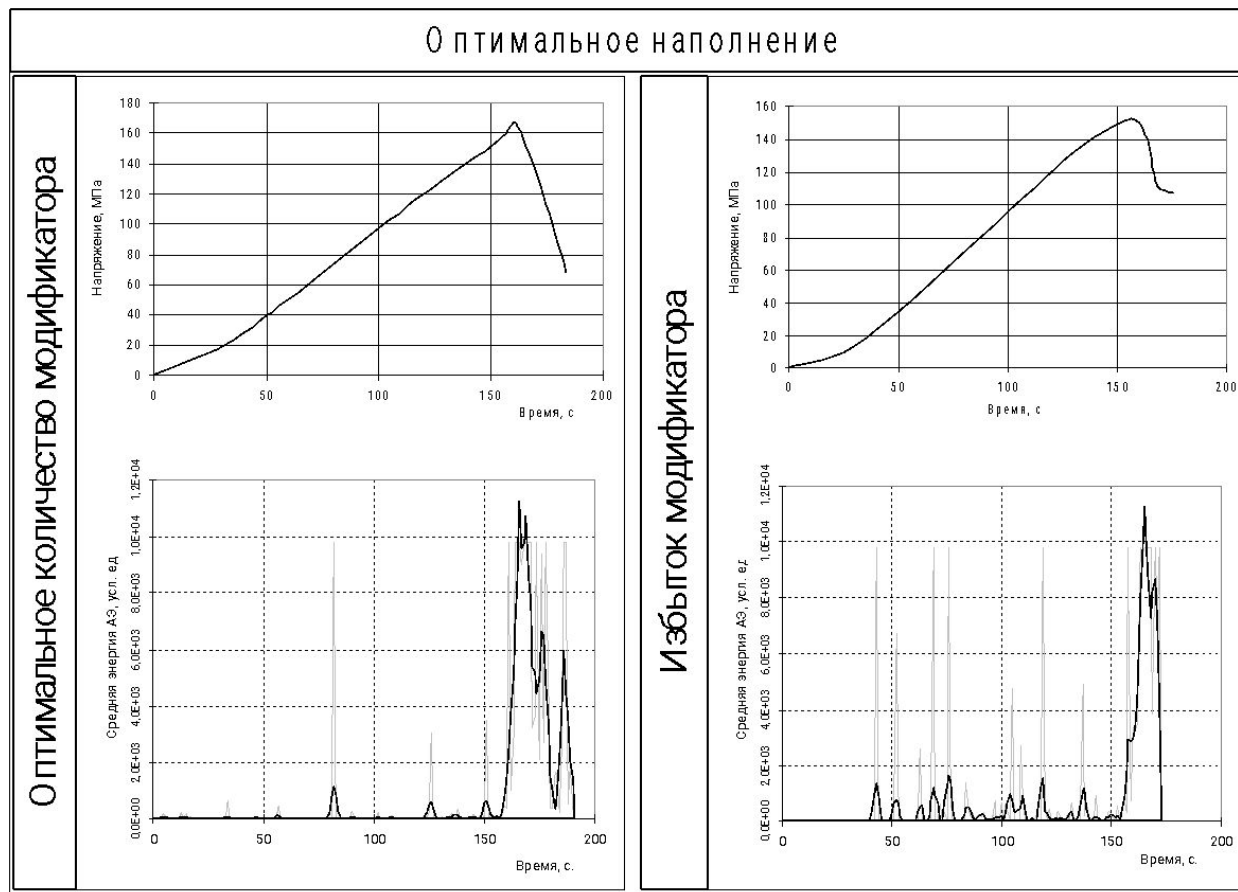


# Кинетика АЭ полимерных КОМПОЗИТОВ

## Малонаполненные составы



# Кинетика АЭ полимерных КОМПОЗИТОВ



---

Благодарю за внимание!