

# Анализ пульсовой волны давления

Басавина Д. М.<sup>3</sup> Бутаков И. Д.<sup>1</sup> Гладков А. О.<sup>1</sup> Жумагулова И. Б.<sup>2</sup>  
Маланчук С. В.<sup>1</sup> Покладюк А. Ю.<sup>3</sup> Федотова И. В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт

<sup>2</sup>Новосибирский Государственный Университет

<sup>3</sup>Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова

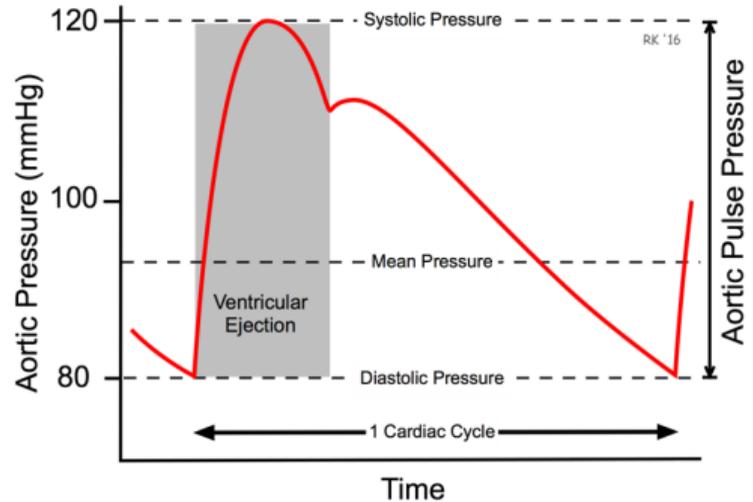
Матричные методы и моделирование в науках о жизни и Земле, 6 — 19 августа  
2022

Кураторы проекта: Гамилов Т. М., Янбарисов Р. М.

- Пульсовая волна давления. Актуальность
- Цели и задачи
- Оцифровка данных
- Модель виндкесселя
- Подбор параметров
- Результаты и выводы

# Пульсовая волна давления. Актуальность

Пульсовую волну давления легко измерить неинвазивно.



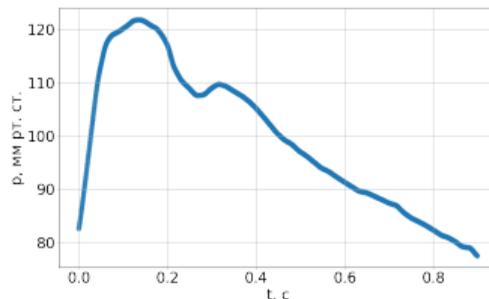
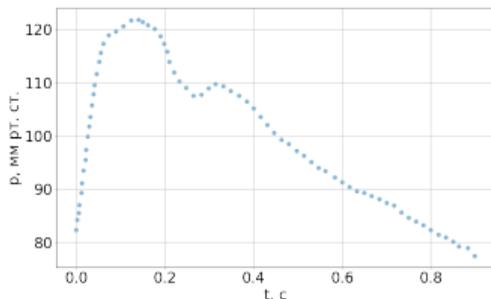
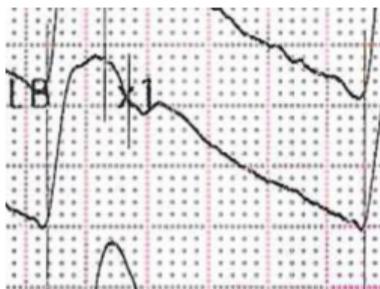
Многие заболевания сердца влияют на форму пульсовой волны, поэтому мы изучили профили давления пациентов с различными заболеваниями.

При помощи математического моделирования и анализа данных о пациентах научиться извлекать как можно больше информации из графика  $P(t)$  пульсовой волны давления.

- Реализовать разные способы подбора параметров в модели виндкесселя, сравнить их на реальных данных пациентов.
- Исследовать связь  $d^2P/dt^2$  и различных болезней сердечно-сосудистой системы.
- Научиться оценивать ударный объём.
- Исследовать связь  $C$  с возрастом, а также скоростью распространения пульсовой волны.

# Оцифровка данных пациентов

В работе были использованы данные<sup>1</sup> профилей давления 60 пациентов. Мы оцифровали их и провели интерполяцию полученных графиков.



<sup>1</sup>УКБ №1 Первого МГМУ имени И.М. Сеченова

Количество пациентов	60
Возраст	$57 \pm 15$ лет
ЧСС	$68 \pm 15$ уд/мин
Ударный объем	$50.92 \pm 11.63$ мл
Систолическое давление (плечо)	$136.63 \pm 17.31$ мм. рт. ст.
Диастолическое давление (плечо)	$84.57 \pm 9.06$ мм. рт. ст.
Среднее артериальное давление (плечо)	$102.32 \pm 17.95$ мм. рт. ст.
Скорость пульсовой волны	$7.97 \pm 1.55$ м/с
Кол-во пациентов с кардиологическими патологиями	36
Кол-во пациентов с диастолической дисфункцией	18

Таблица: Данные по 60 пациентам

## Гипотеза: связь $d^2P/dt^2$ с величиной обратного кровотока

Наличие значительного (более 15%) обратного кровотока у пациентов может свидетельствовать о заболеваниях сердечно-сосудистой системы. Для определения величины обратного кровотока было предложено<sup>2</sup> использовать значение

$$P_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{d^2}{dt^2} [P^i(t)] \right|$$

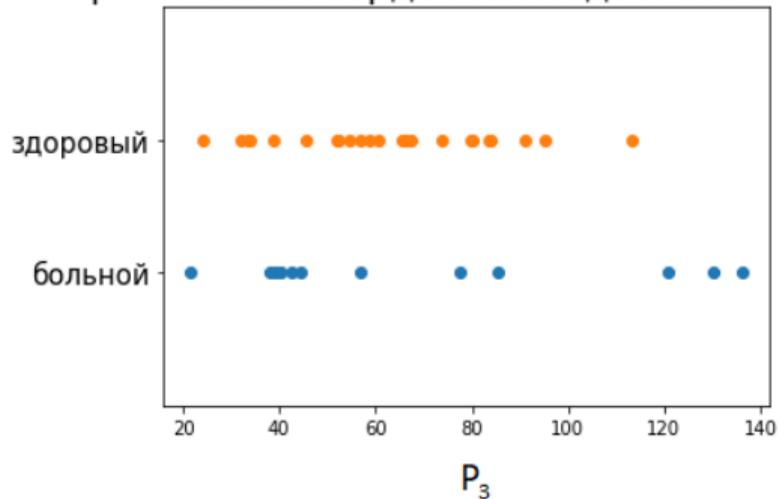
Мы проверили соответствие между  $P_3$  и заболеваниями пациентов, которые могут приводить к возрастанию обратного кровотока.

---

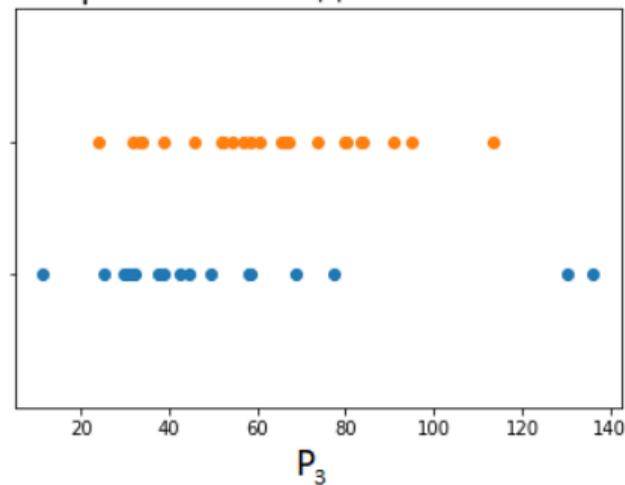
<sup>2</sup>Р. Т. Баатыров и др. «Оценка величины обратного кровотока в артерии по второй производной пульсовой волны давления». В: *Изв. Сарат. ун-та Нов. сер. Сер. Физика.* (2020).

# Гипотеза: связь $d^2P/dt^2$ с величиной обратного кровотока

## Хроническая сердечная недостаточность



## Аортальная недостаточность

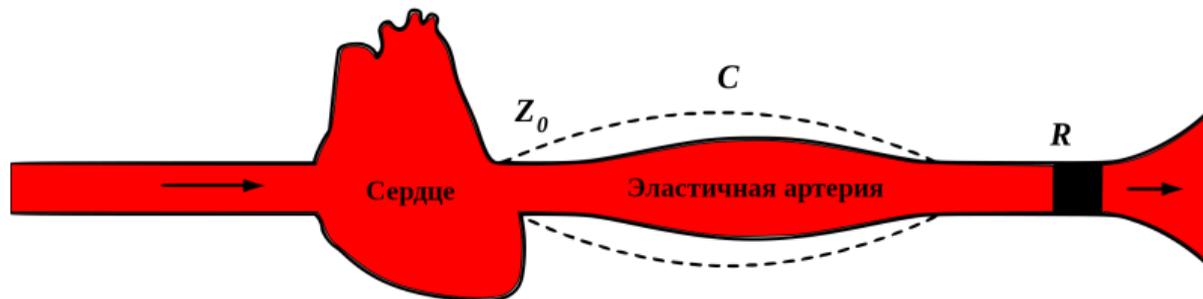


# Гипотеза: связь $d^2P/dt^2$ с величиной обратного кровотока

	Количество пациентов	$P_3$ , мм рт. ст./с <sup>2</sup>
Отсутствие патологий	24	$62.66 \pm 22.7$
Хроническая сердечная недостаточность	13	$69.41 \pm 38.32$
Аортальная недостаточность	18	$53.11 \pm 33.27$

Таблица: Среднее значение  $P_3$  по группам пациентов

# Модель виндкесселя



$$\left(1 + \frac{Z_0}{R}\right) Q_{in}(t) + CZ_0 \frac{dQ_{in}(t)}{dt} = \frac{P(t) - P_{out}}{R} + C \frac{dP(t)}{dt}$$

Модель задаёт двустороннее преобразование:

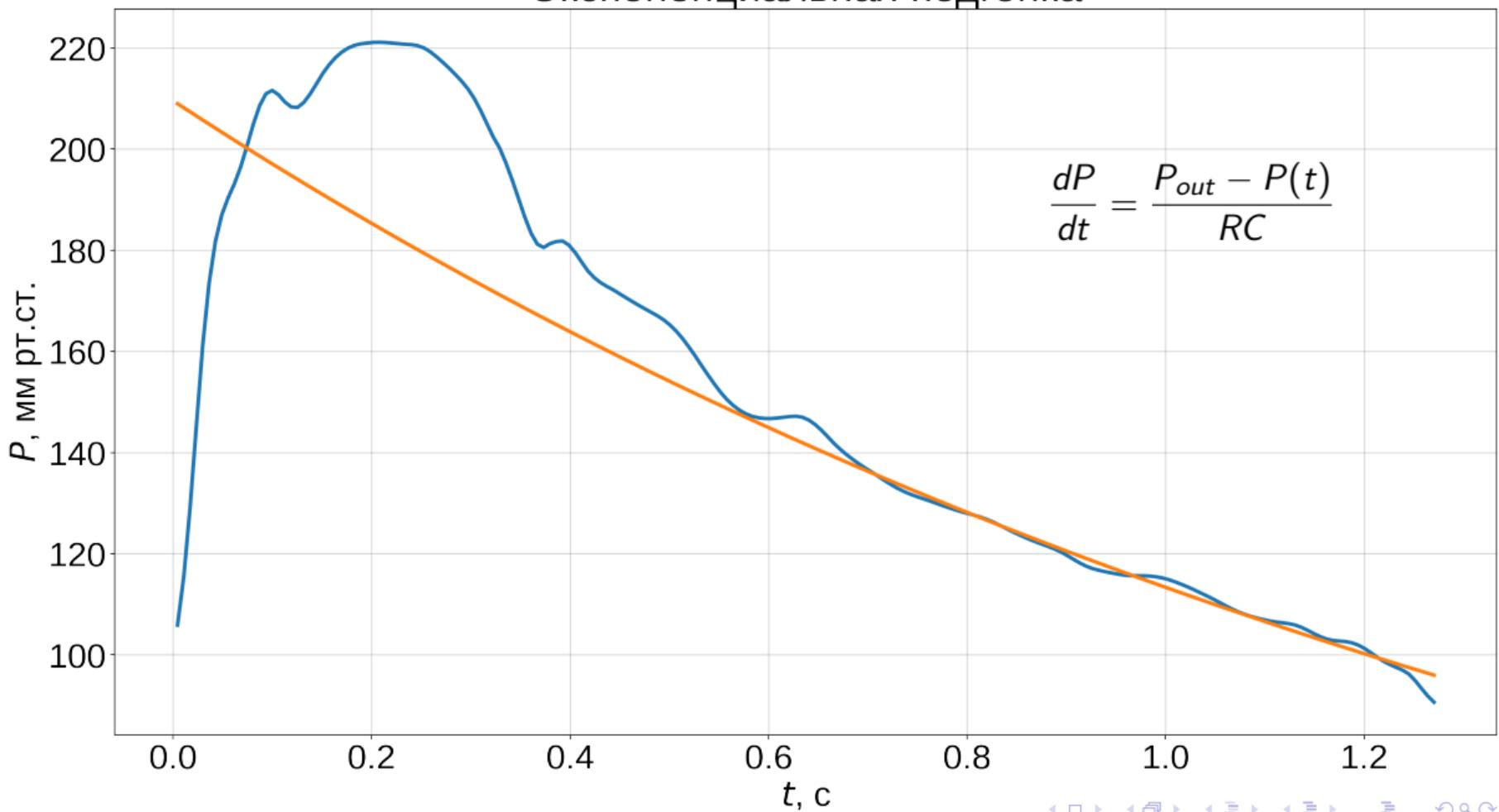
$$P(t) \longrightarrow Q_{in}(t): \frac{dQ_{in}}{dt} = \left[ \frac{P(t) - P_{out}}{R} + C \frac{dP(t)}{dt} - \left( 1 + \frac{Z_0}{R} \right) Q_{in}(t) \right] / CZ_0$$

$$Q_{in}(t) \longrightarrow P(t): \frac{dP}{dt} = \left[ \left( 1 + \frac{Z_0}{R} \right) Q_{in}(t) + CZ_0 \frac{dQ_{in}(t)}{dt} - \frac{P(t) - P_{out}}{R} \right] / C$$

Были реализованы следующие стратегии подбора параметров:

- 4 способа подбора LVET: эмпирический, анализ графика  $Q(t)$  и два способа с применением  $P'(t)$ ;
- получение  $P_0$ ,  $RC$ ,  $P_{out}$  подгонкой экспоненты;
- получение  $C$  и  $R$  из ударного объёма;
- получение  $Z_0$  из артериального сопротивления;
- получение  $P_{out}$  и  $R$  из систолического и диастолического давления.

# Экспоненциальная подгонка

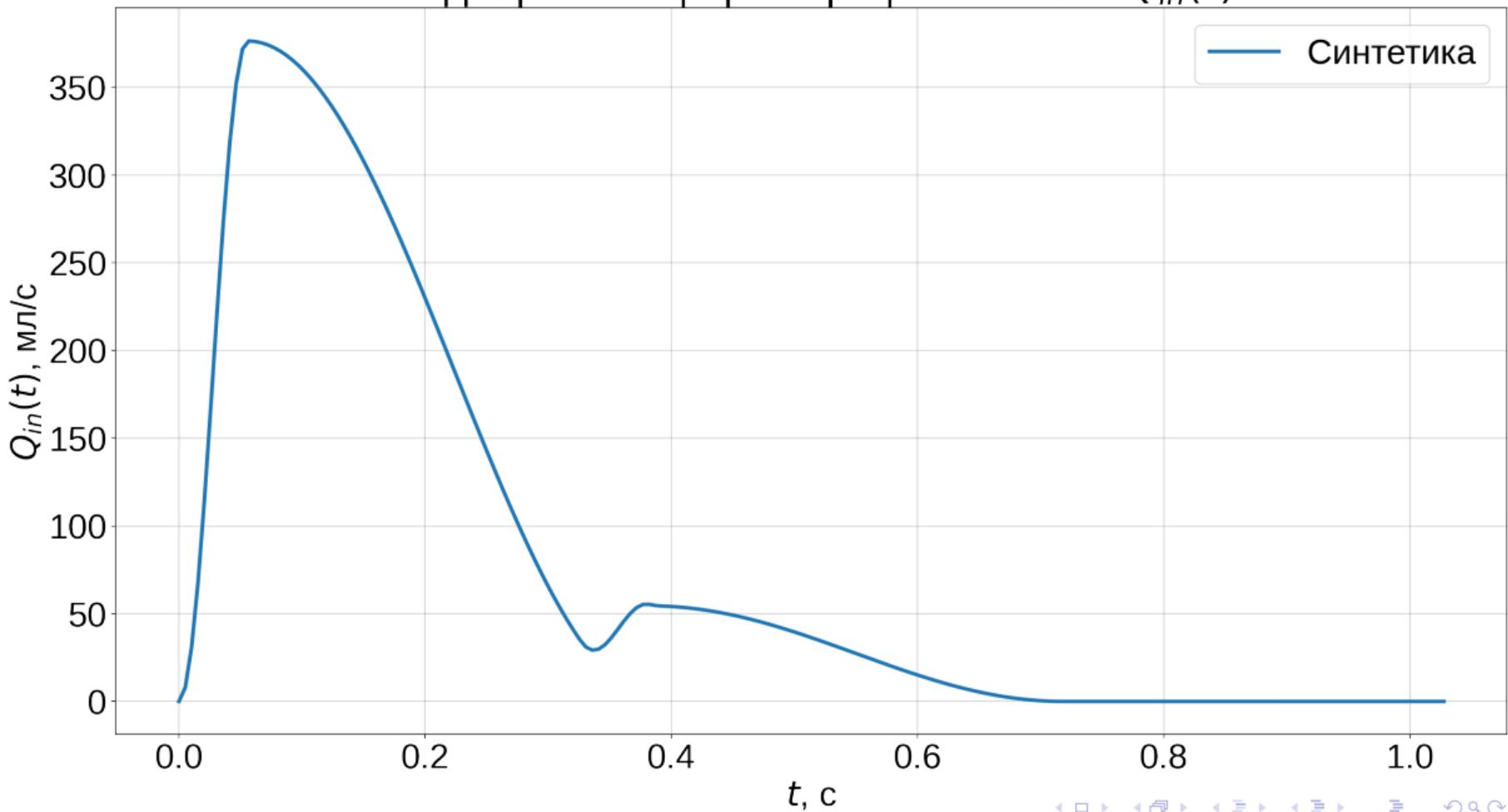


Получение параметров при помощи синтетических данных:

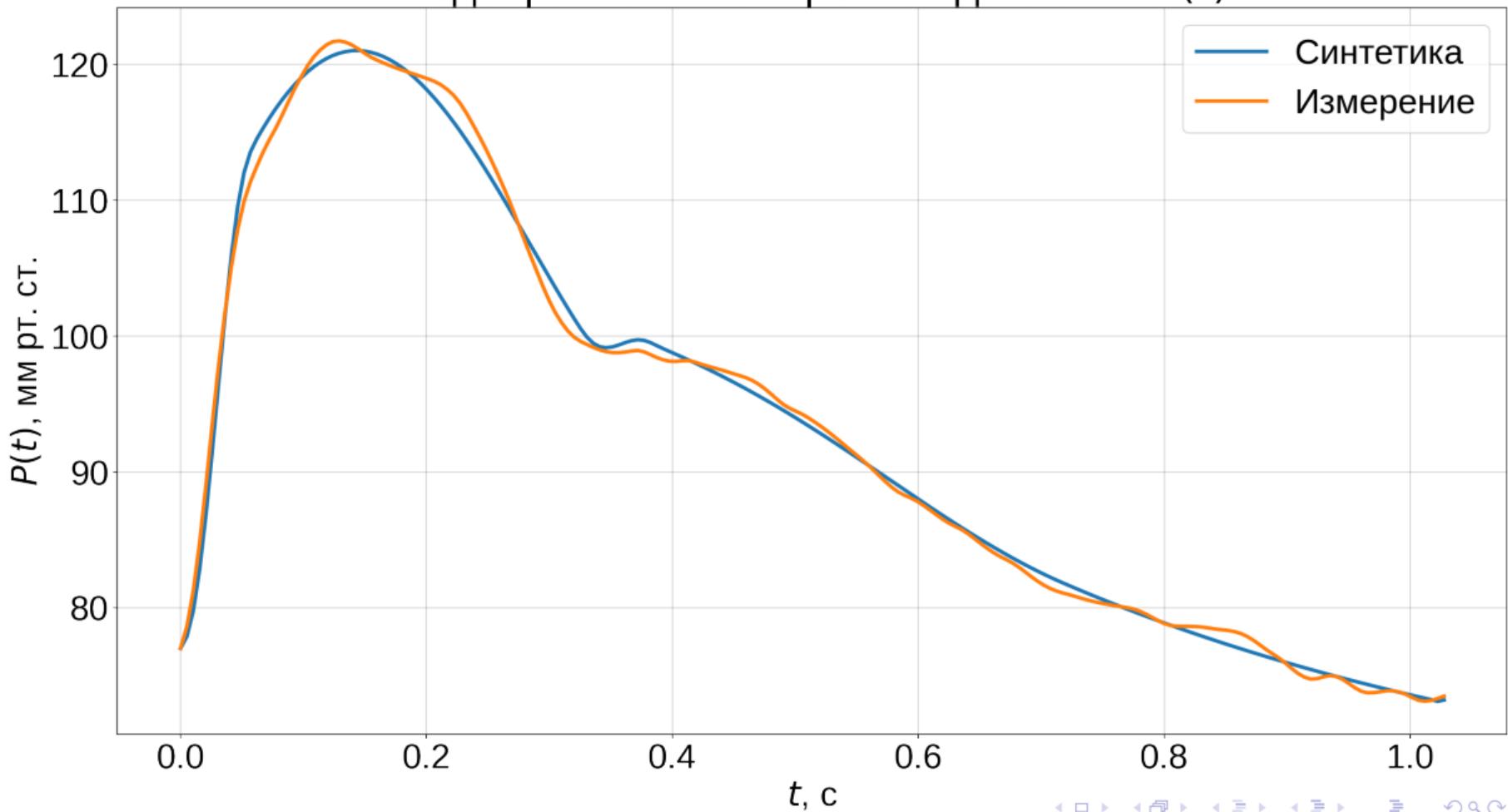
$$Q_{in}^{сИНТ}(t) \xrightarrow{\text{модель WK}} P^{сИНТ}(t) \xrightarrow[\|P - P^{сИНТ}\|_{L_2} \rightarrow \min]{\text{МНК}} R, Z_0, C, P_{out}$$

Для минимизации используется алгоритм BFGS.

Подобранная форма графика потока  $Q_{in}(t)$

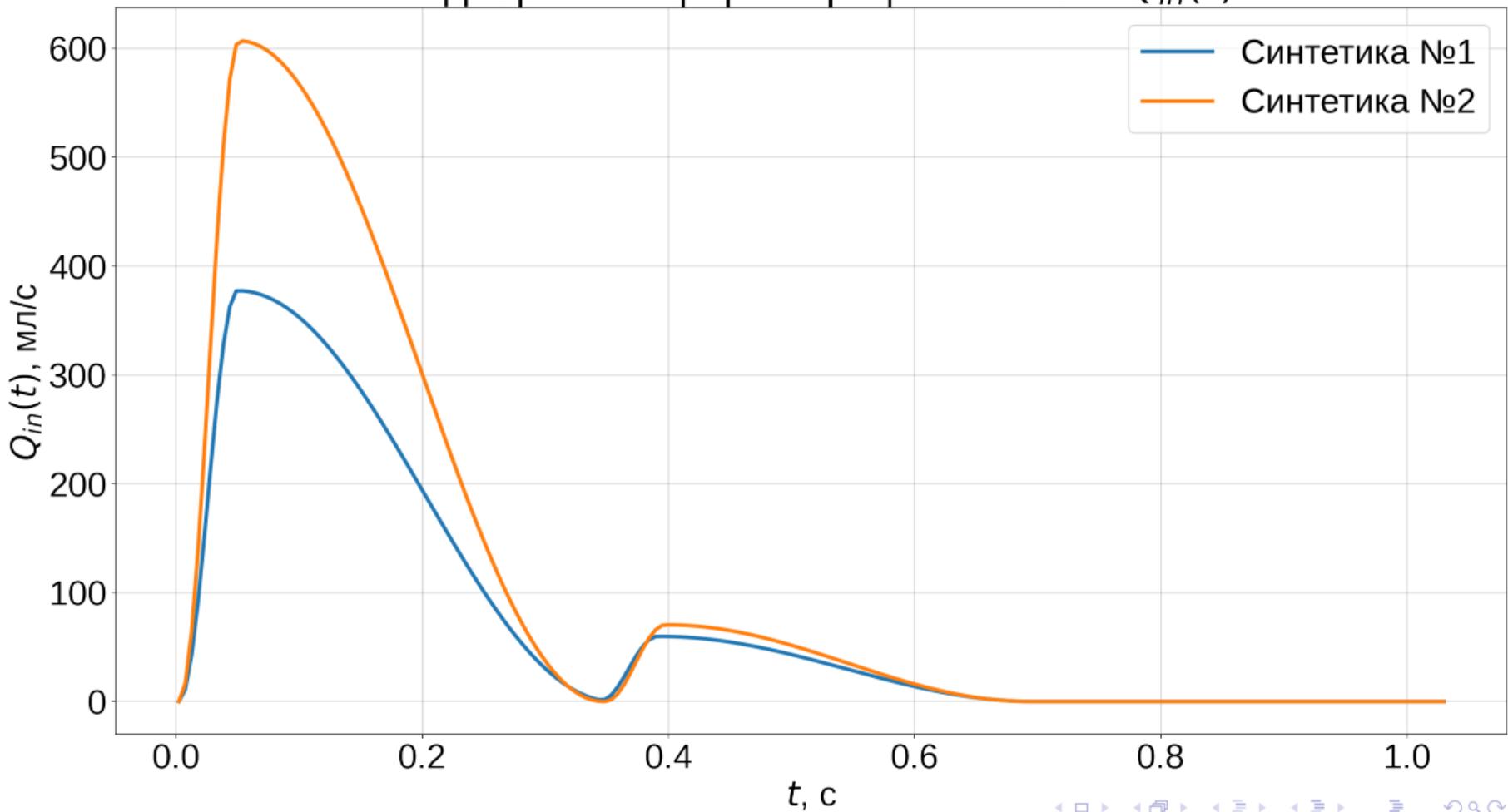


Подобранное и измеренное давление  $P(t)$

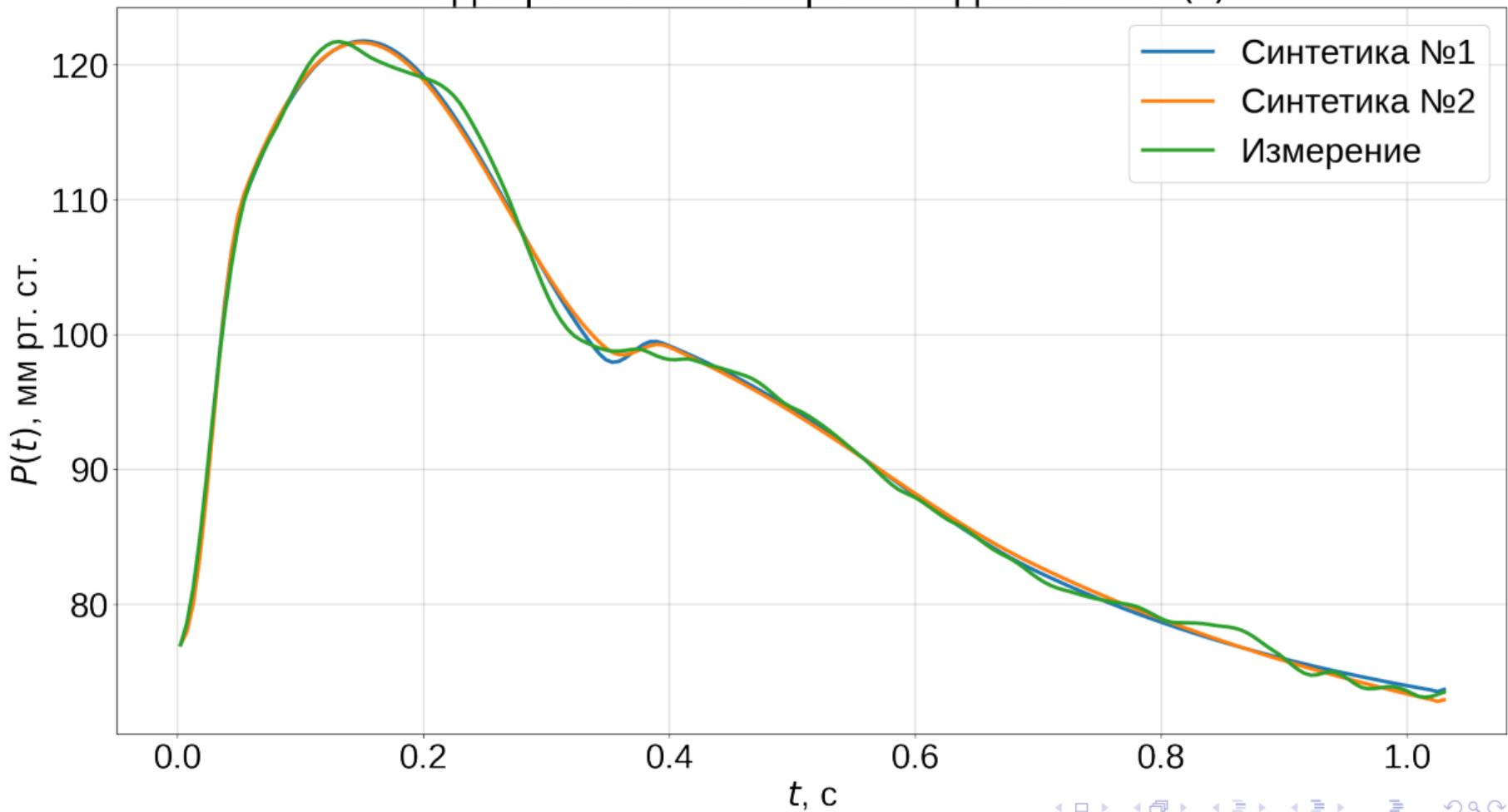


**Проблема:** модель с синтетическими данными недоопределена.

Подобранная форма графика потока  $Q_{in}(t)$



Подобранное и измеренное давление  $P(t)$



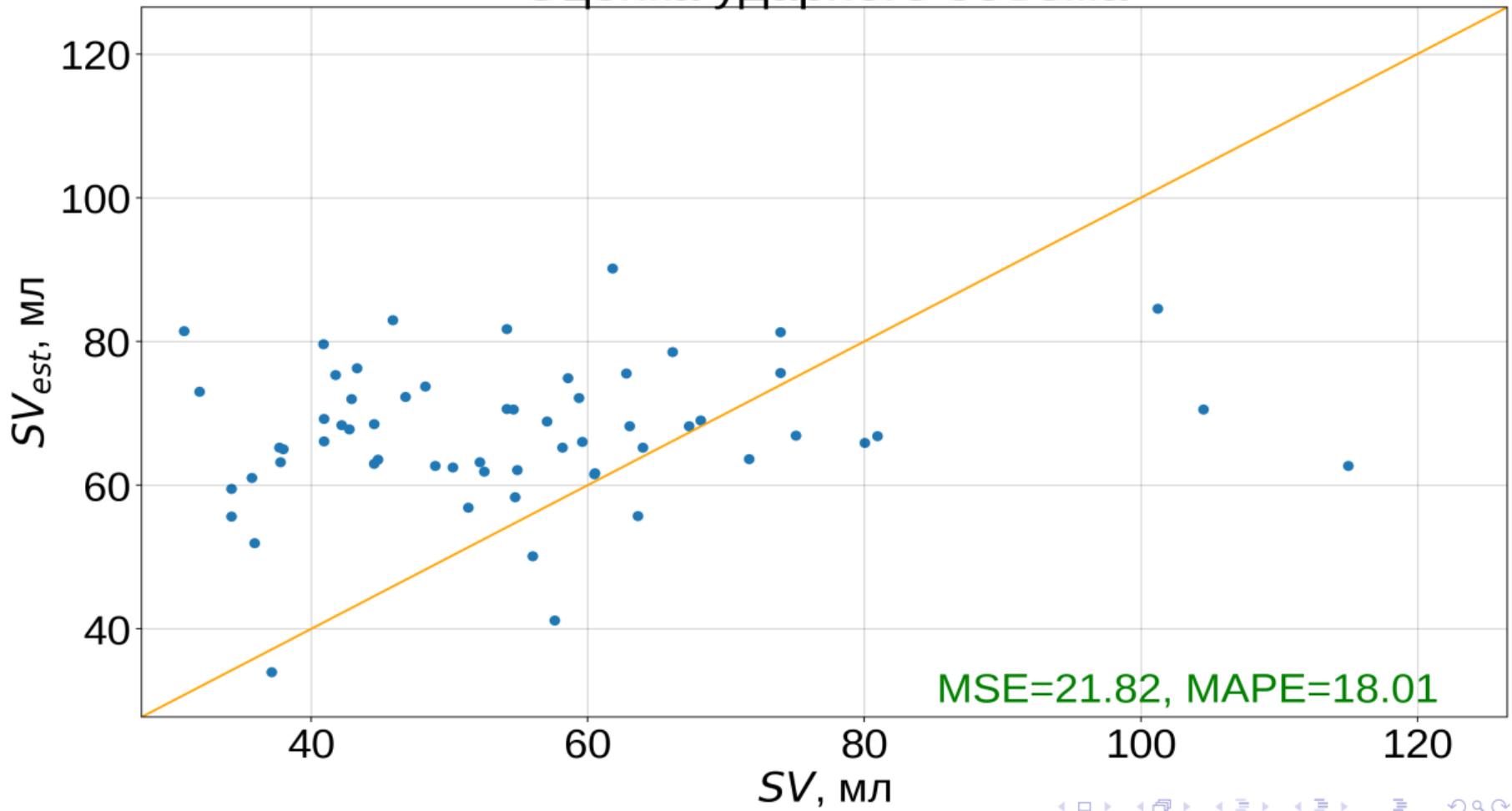
Подгонка SV	MSE, мл <sup>2</sup> /с	SV, мл
Есть	0.55	104.5
Нет	0.47	66.2

**Таблица:** Демонстрация недоопределённости модели для пациента с ударным объёмом SV = 104.5 мл

Ударный объём связан с размером желудочка. Данная характеристика полезна для диагностики как **гипертрофии сердца**, так и **сердечной недостаточности**.

Попытка оценивать ударный объём привела к тому, что результат колеблется около среднего значения в популяции. К сожалению, полученный результат слабо отражает измеренное значение.

# Оценка ударного объёма



Растяжимость сосудов  $C$  является предиктором смертности от различных сердечно-сосудистых заболеваний в большей степени, чем скорость пульсовой волны  $PWV^3$ .

	Выжившие	Невыжившие
PWV	$14.2 \pm 3.6$	$14.9 \pm 3.8$
C	$0.221 \pm 0.1$	$0.198 \pm 0.128$

**Таблица:** Сравнение скорости пульсовой волны аорты (PWV) и эластичности сосудов (C) у выживших и невыживших пациентов

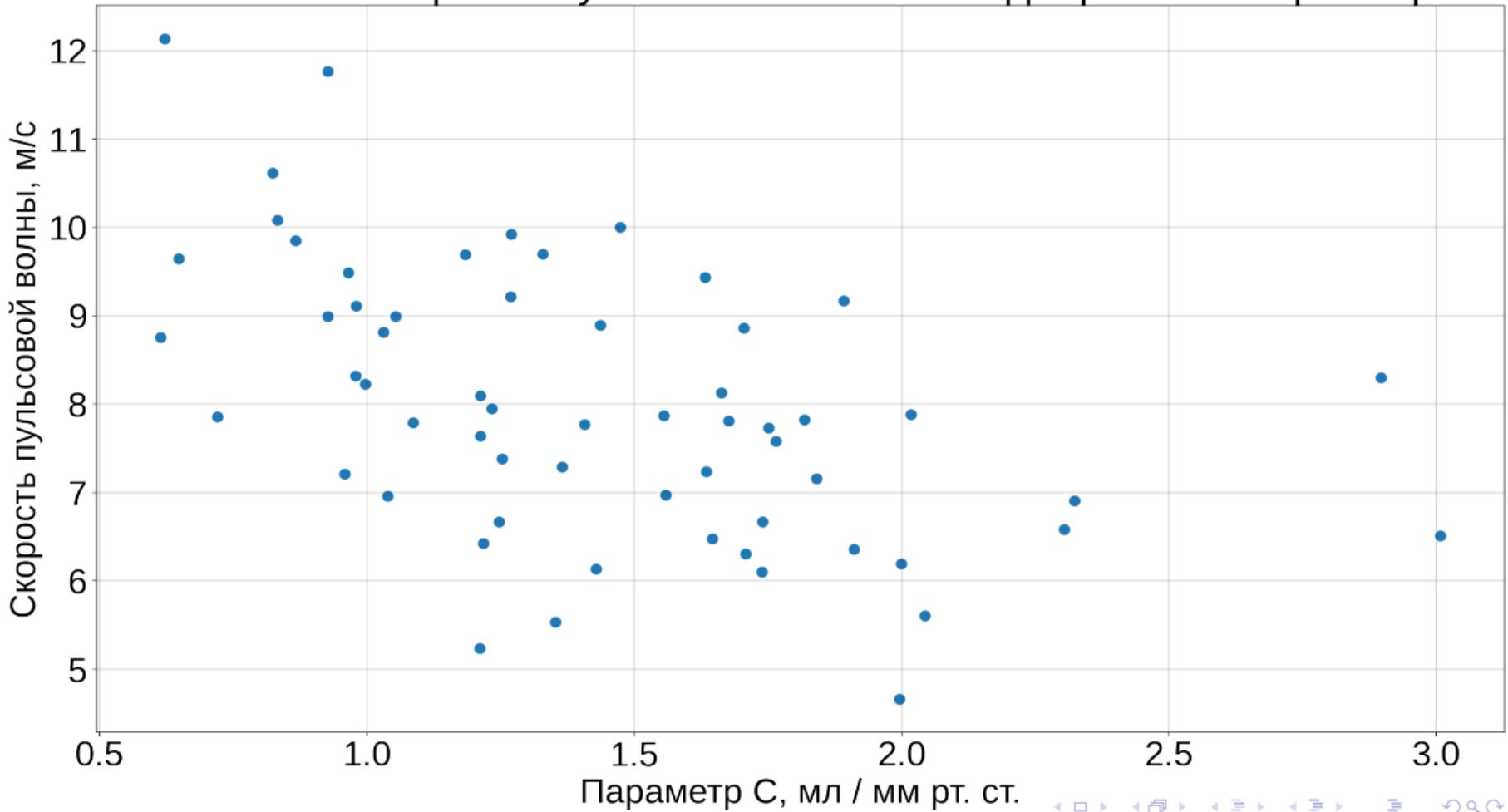
<sup>3</sup>Theodore Papaioannou и др. «Total arterial compliance estimated by a novel method and all-cause mortality in the elderly: The PROTEGER study». В: *Age (Dordrecht, Netherlands)* 36 (май 2014).

Мы заметили, что растяжимость артерий отрицательно скоррелирована с возрастом и скоростью пульсовой волны.

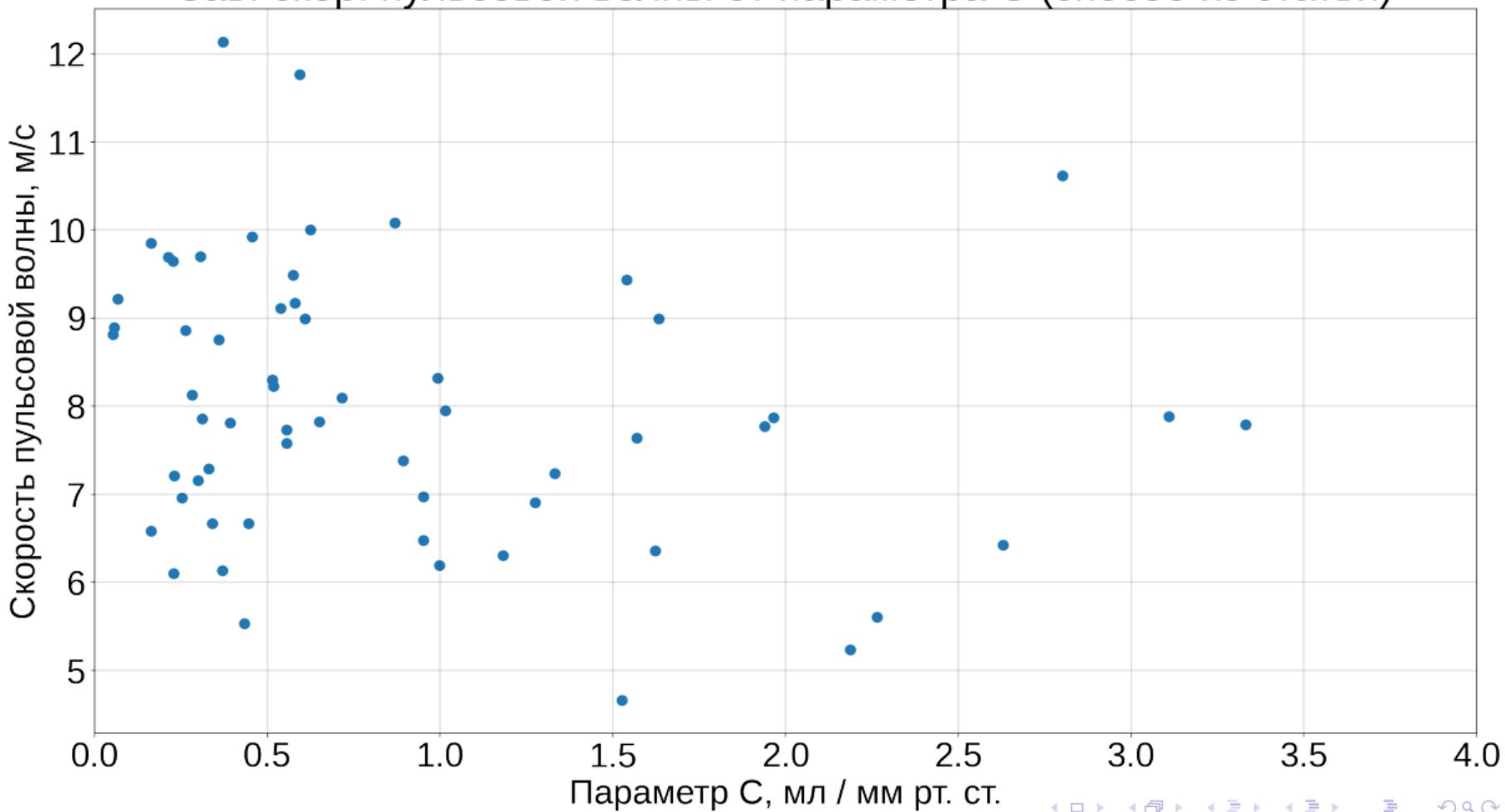
	PWV	Возраст	$C$
PWV	1.0	0.77	-0.53
Возраст	0.77	1.0	-0.63
$C$	-0.53	-0.63	1.0

Таблица: Коэффициент корреляции Спирмена для 60 пациентов

# Зависимость скорости пульсовой волны от выбранного параметра С

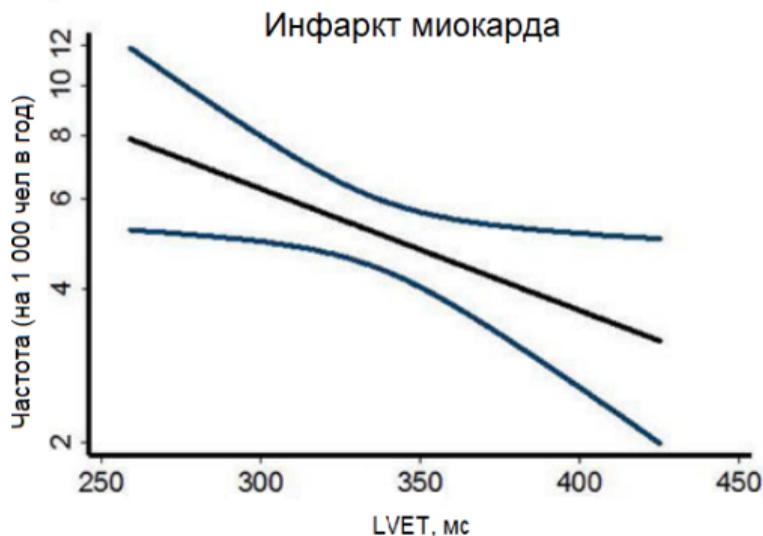
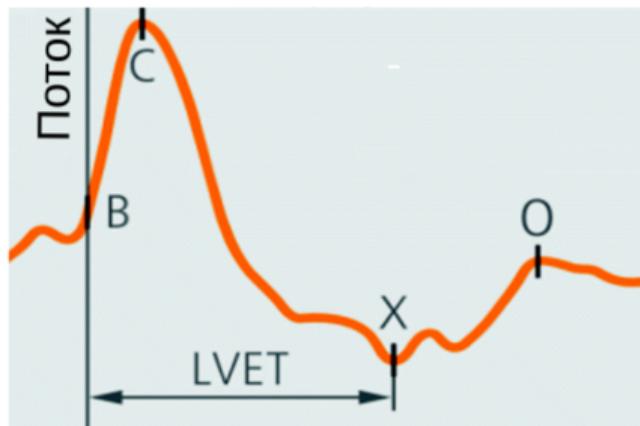


Зав. скор. пульсовой волны от параметра С (способ из статьи)



# LVET и его оценка

LVET – время, за которое левый желудочек выбрасывает кровь в аорту. Оно позволяет диагностировать сердечную недостаточность, поэтому важно научиться измерять его из экспериментальных данных.

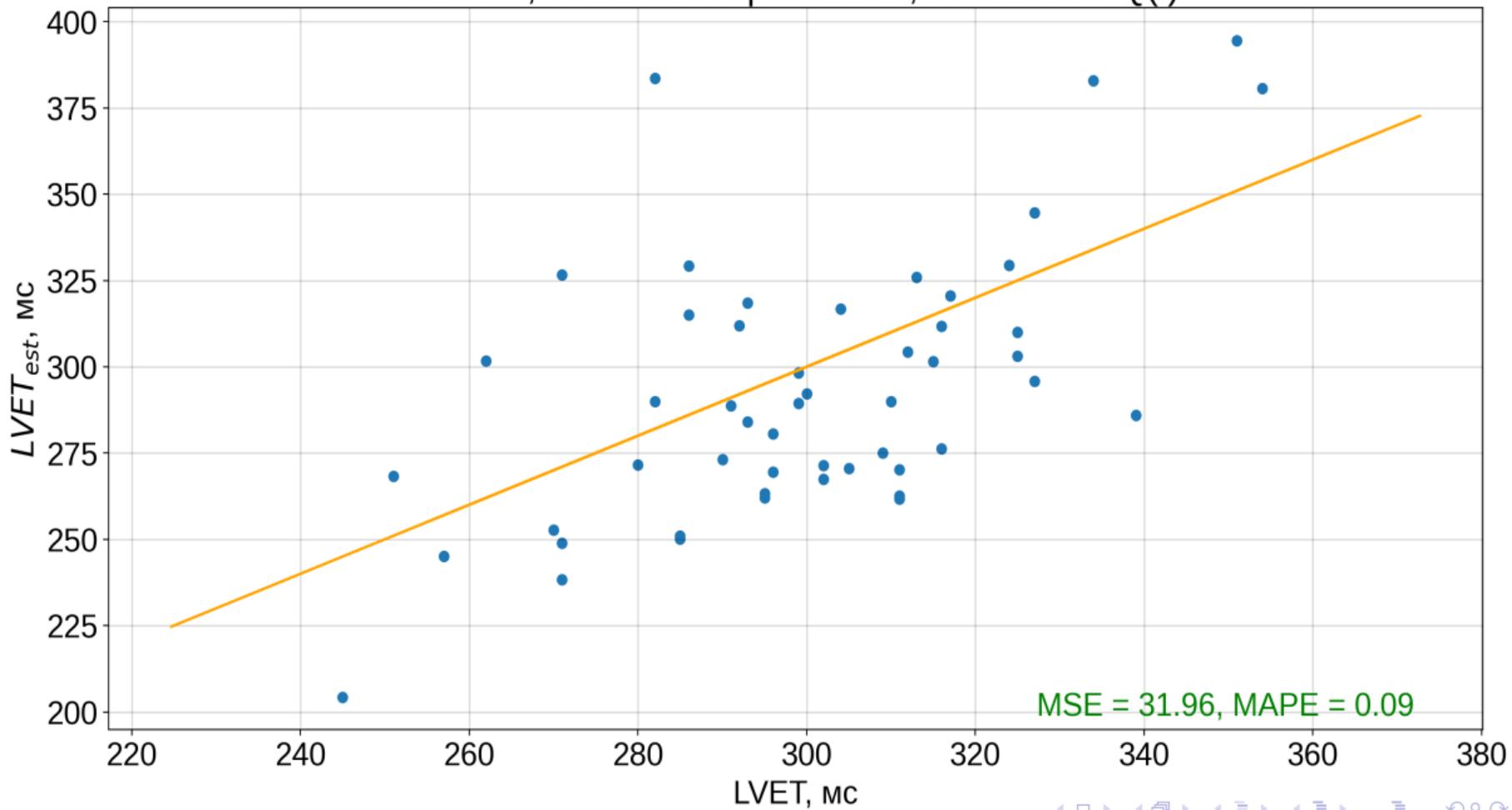


Мы изучили и реализовали несколько способов оценки LVET и сравнили результаты с известными.

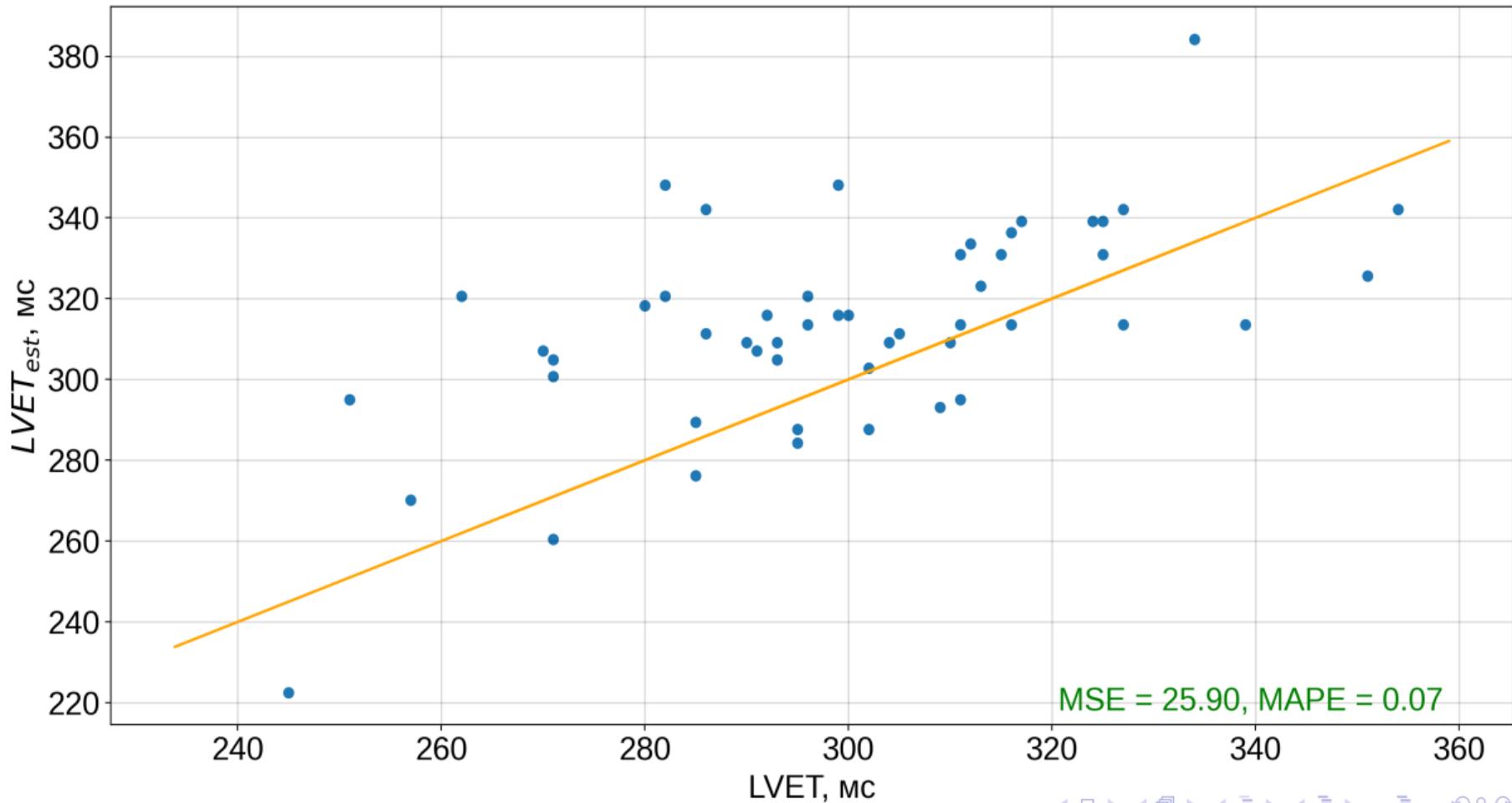
Описание	Метод	Погрешность, %		
		Синт. данные <sup>4</sup>	Реальные данные	
			Баз. алгоритм	Мод. алгоритм
Анализ $dP/dt$	LV2	-12.4%	-6.3%	-2.1%
$0.37\sqrt{T}$	LV3	26.1%	24.9%	-4.8%
Анализ $Q(t)$	LV4	0.1%	25.1%	2.1%

<sup>4</sup>Jorge Mariscal-Harana и др. «Estimating central blood pressure from aortic flow: development and assessment of algorithms». В: *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology* 320 (окт. 2020).

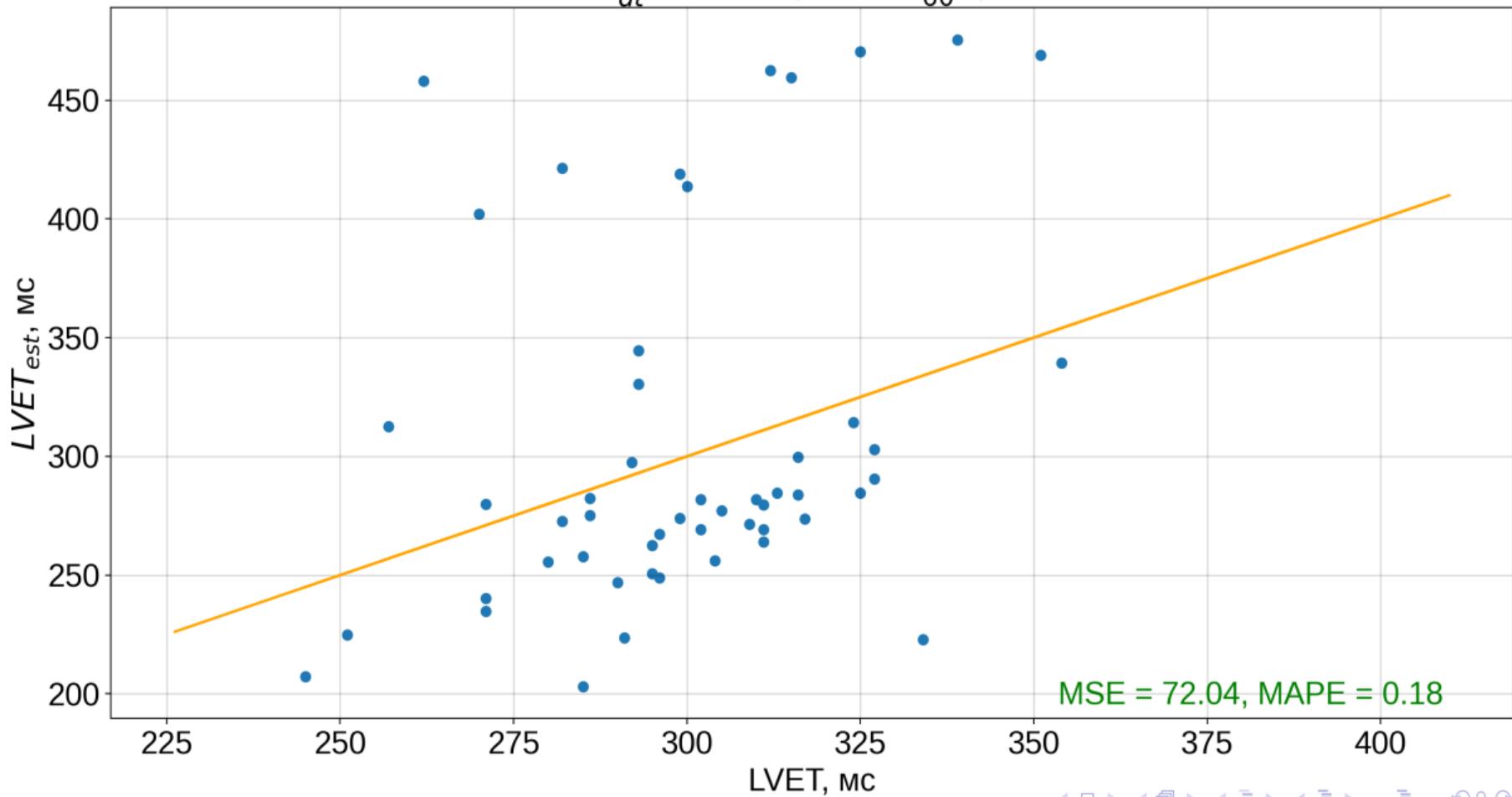
LVET-4, отмасштабированный, из анализа Q(t)



$$LVET-3 \sim 0.37 \cdot \sqrt{T}$$



$$\text{LVET-2, } \frac{dP}{dt} \cdot \left(0.5 - \left|0.5 - \frac{HR \cdot t}{60}\right|\right)^2 \Rightarrow \min$$



- 1 Вторая производная давления по времени слабо скоррелирована с какими-либо болезнями сердечно-сосудистой системы;
- 2 Способы оценки ударного объёма, реализованные нами, дают колеблющийся с большим разбросом около константы (среднего значения в популяции) результат.

- 1 Пульсовая волна давления позволяет определить параметр растяжимости  $C$ , коррелирующий со смертностью от сердечно-сосудистых заболеваний.
- 2 Методы оценки LVET по графику  $Q(t)$  и по формуле  $0.37\sqrt{T}$ , особенно модифицированные алгоритмы, дают наилучшие результаты.

# Команда проекта



Федотова И. В.<sup>1 2</sup> Бутаков И. Д.<sup>3 4 5 6 7</sup> Басавина Д. М.<sup>1 2</sup> Покладюк А. Ю.<sup>1 2</sup>  
Маланчук С. В.<sup>4 5</sup> Гладков А. О.<sup>3 4 7</sup> Жумагулова И. Б.<sup>3 4 7</sup>

<sup>1</sup>Оцифровка, <sup>2</sup>Проверка гипотезы  $d^2P/dt^2$ , <sup>3</sup>Оценка параметров виндкесселя, <sup>4</sup>Оценка LVET, <sup>5</sup>Оценка SV,  
<sup>6</sup>Проверка гипотезы о связи C и PWV, <sup>7</sup>Предобработка данных

-  Mariscal-Harana, Jorge и др. «Estimating central blood pressure from aortic flow: development and assessment of algorithms». В: *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology* 320 (окт. 2020).
-  Papaioannou, Theodore и др. «Total arterial compliance estimated by a novel method and all-cause mortality in the elderly: The PROTEGER study». В: *Age (Dordrecht, Netherlands)* 36 (май 2014).
-  Westerhof, Nicolaas, Jan-Willem Lankhaar и Berend Westerhof. «The arterial Windkessel». В: *Medical & biological engineering & computing* 47 (июль 2008), с. 131—41.
-  Баатыров, Р. Т. и др. «Оценка величины обратного кровотока в артерии по второй производной пульсовой волны давления». В: *Изв. Сарат. ун-та Нов. сер. Сер. Физика.* (2020).

Спасибо за внимание!



Репозиторий проекта на GitHub