



<sup>1</sup> Институт биомедицинских систем, НИУ МИЭТ  
<sup>2</sup> НЦМУ «Цифровой биодизайн и персонализированное здравоохранение»  
<sup>3</sup> Институт бионических технологий и инжиниринга



Москва 2024

# Методы и алгоритмы структурно-параметрической идентификации и оптимизации состояния биотехнической системы одножелудочкового кровообращения

Рубцова Екатерина Николаевна<sup>1,2</sup>

Александр Анатольевич Пуговкин<sup>2</sup>,

д.т.н. Телышев Дмитрий Викторович<sup>1,3</sup>



# Биотехническая система вспомогательного кровообращения

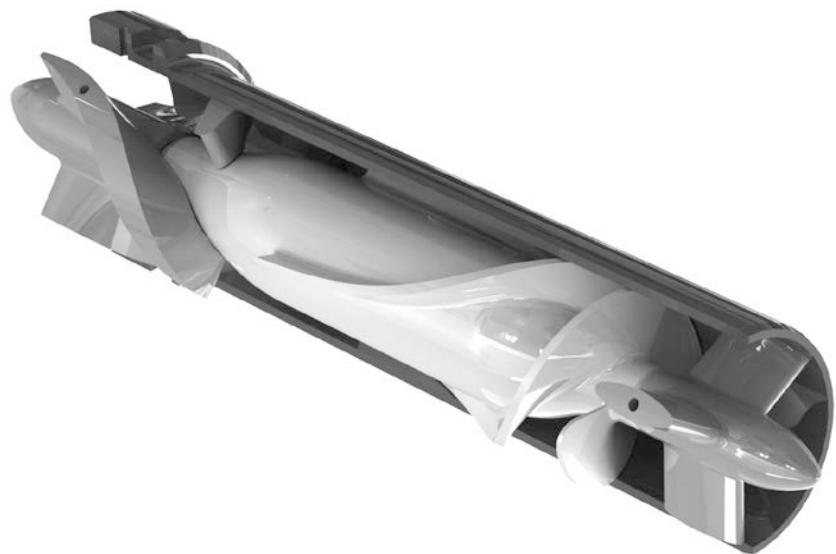


Рис. 1. Геометрия проточной части имплантируемого педиатрического роторного насоса крови



Рис. 2. Аппарат вспомогательного кровообращения для левого желудочка

# Система одножелудочкового кровообращения

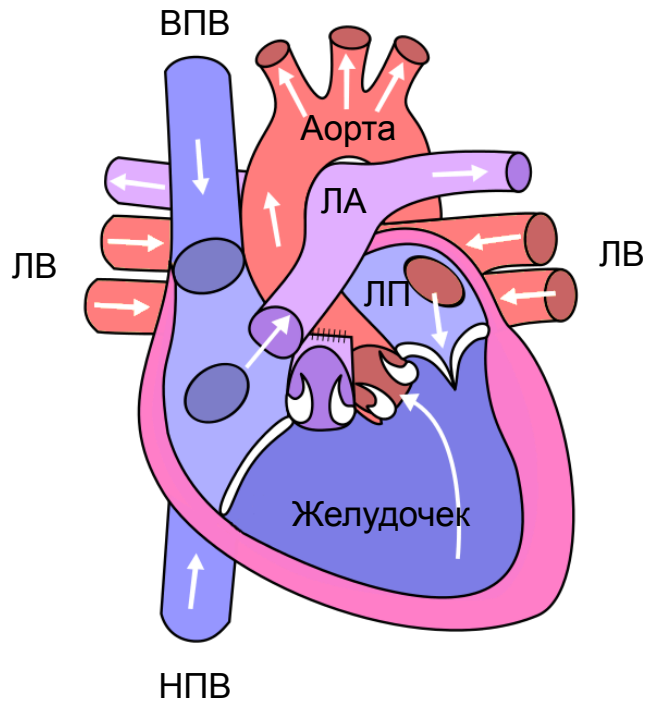


Рис. 1. Схематическое изображение сердца после выполнения одножелудочковой коррекции

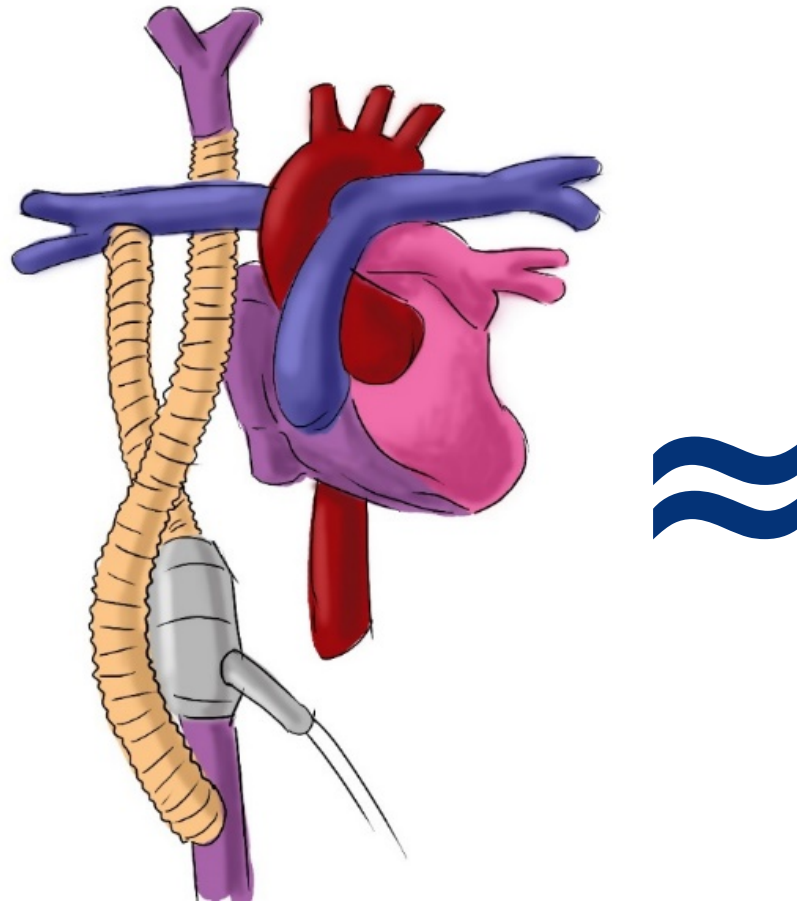


Рис. 2 Схематическое изображение биотехнической системы одножелудочкового кровообращения

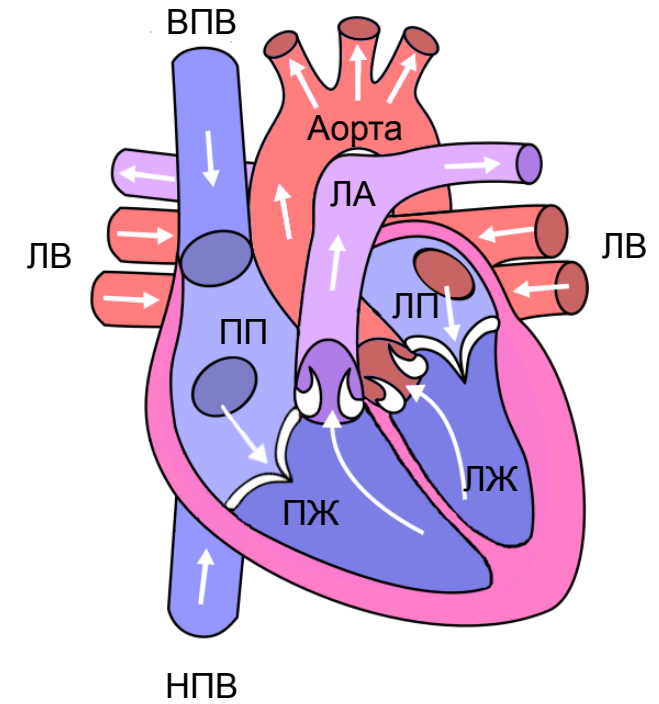
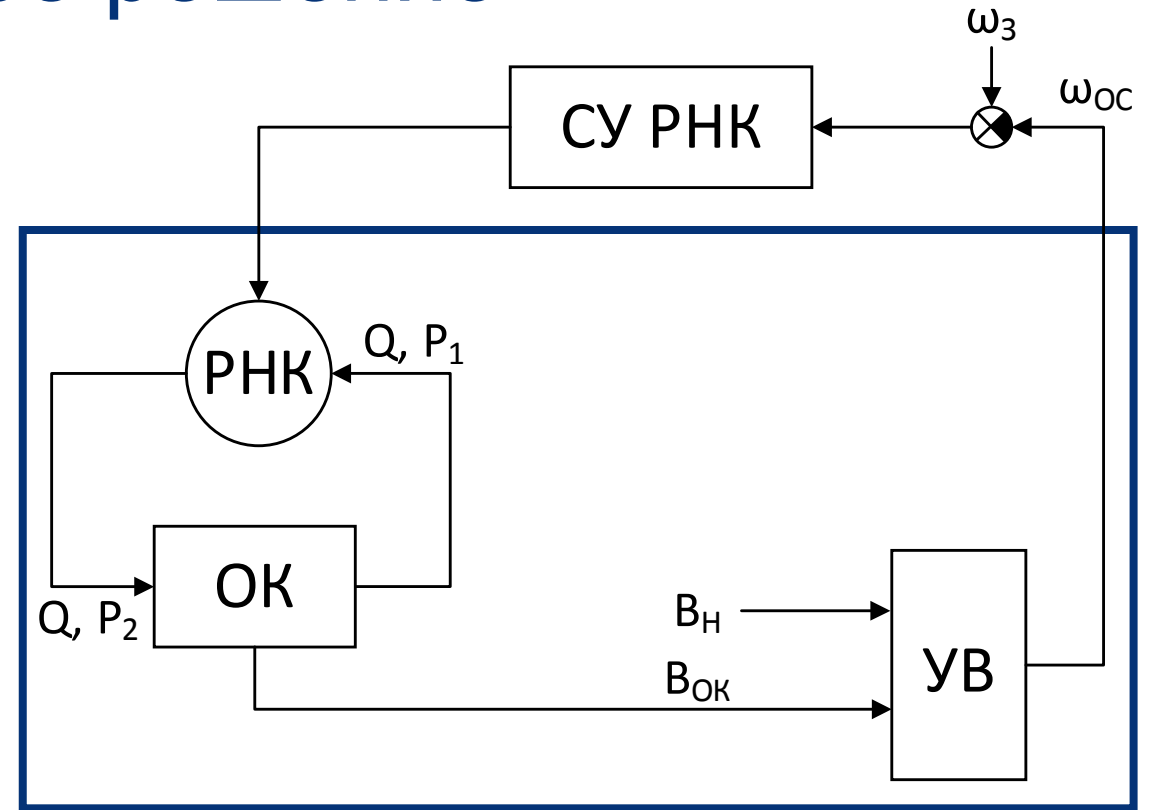


Рис. 3. Схематическое изображение здорового сердца

ВПВ – верхняя полая вена, ЛА – лёгочная артерия, ЛЖ – левый желудочек, ЛВ – лёгочные вены, ЛП – левое предсердие, НПВ – нижняя полая вена, ПЖ – правый желудочек, ПП – правое предсердие.

# Предлагаемое решение

- **Цель:** разработать методы и алгоритмы структурно-параметрической идентификации и оптимизации состояния биотехнической системы одножелудочкового кровообращения, позволяющие воспроизводить состояние системы, оценивать необходимость оптимизации, целесообразность синтеза и эффективность биотехнической системы в оптимальном состоянии.



$\omega_3$  – заданное значение; ОК – система одножелудочкового кровообращения; ОС – оптимальное состояние; РНК – роторный насос крови; СУ – система управления; УВ – устройство выбора ОС;  $V_H$  – гемодинамические характеристики системы нормального кровообращения;  $V_{OK}$  – гемодинамические характеристики системы одножелудочкового кровообращения;  $\omega$  – управляющий параметр (скорость вращения ротора РНК);  $Q$  – объёмный расход крови;  $P_1$  – давление на входе РНК;  $P_2$  – давление на выходе РНК

Рис. Схема автоматического определения оптимального состояния биотехнической системы одножелудочкового кровообращения

# Структурная идентификация систем кровообращения

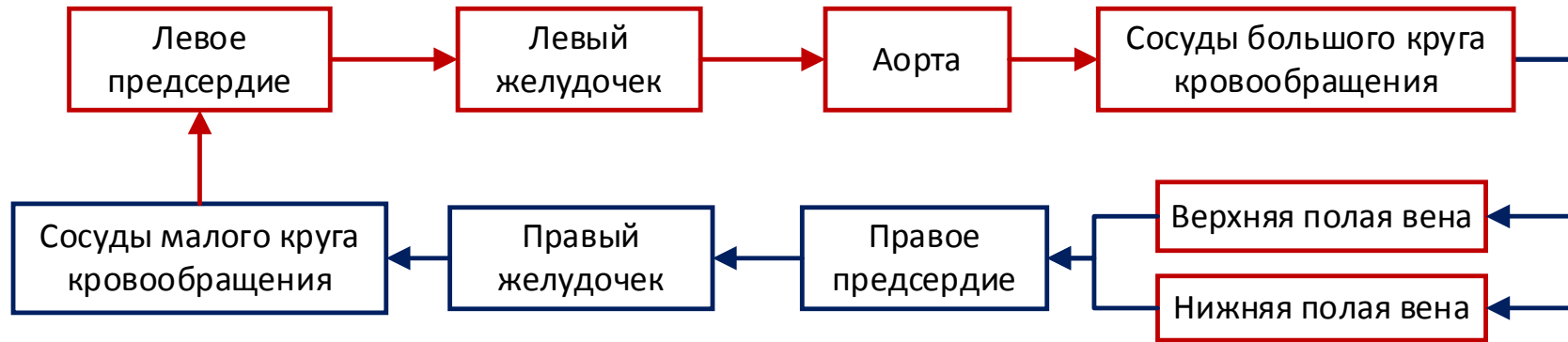
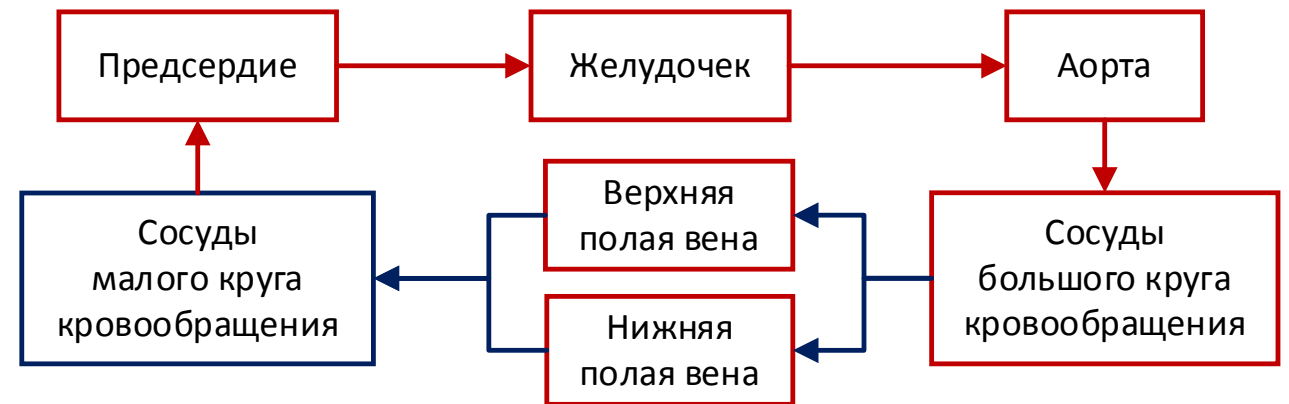


Рис. 1. Структура системы нормального кровообращения

Рис. 2. Структура системы одножелудочкового кровообращения



# Метод параметрической идентификации системы одножелудочкового кровообращения

- Набор характеристик одножелудочкового кровообращения регистрируется у пациента:

$$D = [YO P_2^{\max} P_2^{\min} \bar{P}_4 \bar{P}_5 \bar{P}_6 \bar{Q}_5], \quad (1)$$

где  $YO$  – ударный объём,  $P_2^{\max}$  – систолическое давление крови в аорте,  $P_2^{\min}$  – диастолическое давление крови в аорте,  $\bar{P}_4$  – среднее давление в верхней полой вене,  $\bar{P}_5$  – среднее давление в нижней полой вене,  $\bar{P}_6$  – среднее давление в лёгочной артерии,  $\bar{Q}_5$  – средний объёмный расход крови в нижней полой вене.

- Набор характеристик, получаемых в результате моделирования  $G$ :

$$G = [YO^M P_2^{\max M} P_2^{\min M} \bar{P}_4^M \bar{P}_5^M \bar{P}_6^M \bar{Q}_5^M], \quad (2)$$

где  $M$  – полученные в результате моделирования.

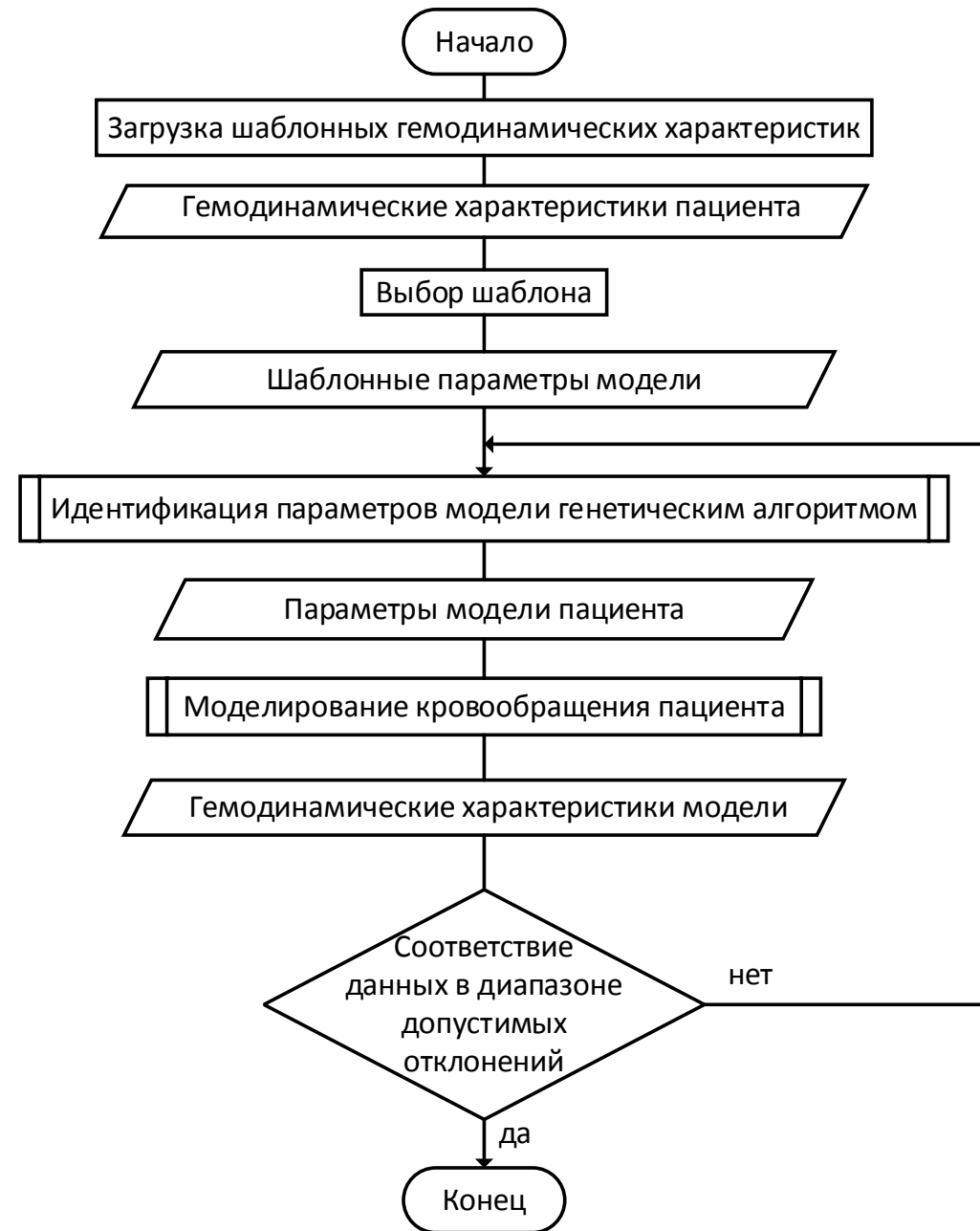
- В результате параметрической идентификации одножелудочкового кровообращения необходимо определить параметры модели, при которых модель воспроизводит гемодинамические характеристики пациента  $D$ :

$$K = [R_1 R_2 R_3 R_4 R_5 R_6 R_7 R_8 R_9 C_{1\max} C_{1\min} C_2 C_3 C_4 C_5 C_6 C_{7\max} C_{7\min}]. \quad (3)$$

- Таким образом, основная задача, решаемая при параметрической идентификации, сводится к минимизации разницы между гемодинамическими характеристиками пациента и аналогичными характеристиками, полученными в результате моделирования. Минимизация в свою очередь является задачей оптимизации. Для проведения процедуры оптимизации определена целевая функция, значение которой необходимо минимизировать:

$$F = \sum_{i=1}^N \left| \frac{D_i - G_i}{D_i} \right| \quad (4)$$

# Алгоритм параметрической идентификации системы одножелудочкового кровообращения



# Верификация метода и алгоритма параметрической идентификации

Таблица. Распределения гемодинамических характеристик для трёх пациентов

Параметр	Пациент №					
	8		11		17	
	ДП	PM	ДП	PM	ДП	PM
Частота сердечных сокращений, уд./мин	75		80		75	
Сердечный выброс, л/мин	3,9±0,9	3,8	2,1±1,1	2,1	4,7±1,1	4,7
Систолическое давление в аорте, мм рт. ст.	98,3±10,4	98,3	80,1±16,6	80,1	101,6±16,6	107,8
Диастолическое давление в аорте, мм рт. ст.	57,4±9,3	57,4	46,5±16,6	46,5	83,6±16,6	72,0
Давление в верхней полой вене, мм рт. ст.	17,5±3,2	17,5	18,9±2,5	18,9	11,6±2,5	11,6
Давление в нижней полой вене, мм рт. ст.	17,5±3,2	17,5	18,9±2,5	18,9	11,6±2,6	11,6
Давление в лёгочной артерии, мм рт. ст.	14,7±3,4	16,2	17,3±2,3	16,6	10,1±2,3	11,2
Расход в нижней полой вене, л/мин	2,5±0,7	2,5	1,4±0,7	1,4	3,1±1,7	3,0



# Способы структурной идентификации биотехнической системы одножелудочкового кровообращения

Рис. 1 Схематическое изображение (а) и структурная схема (б) синтеза БТС ОК для способа структурной идентификации №1

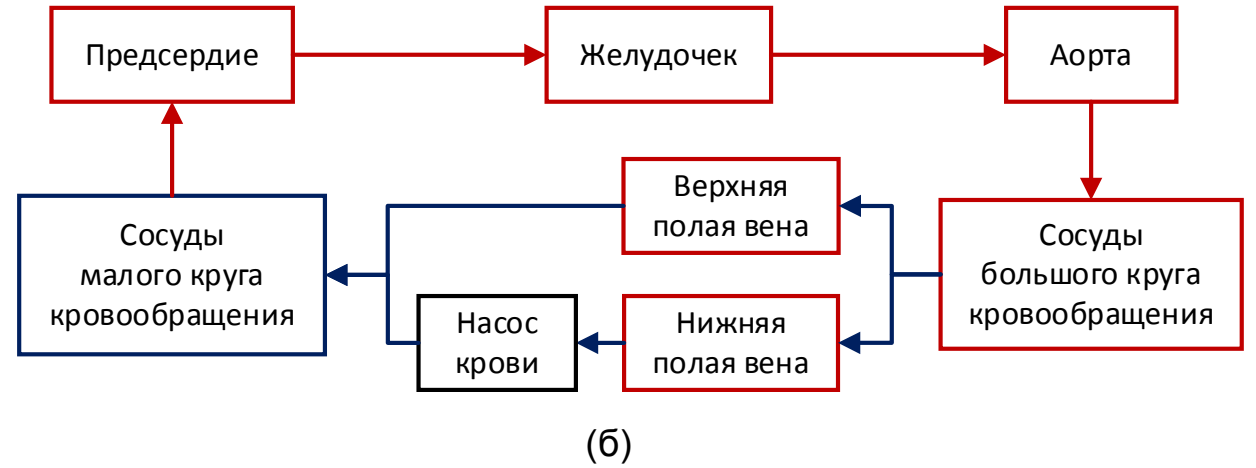
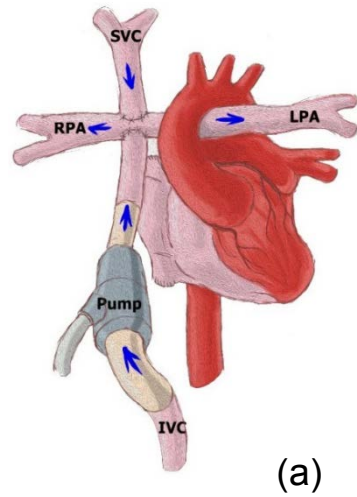
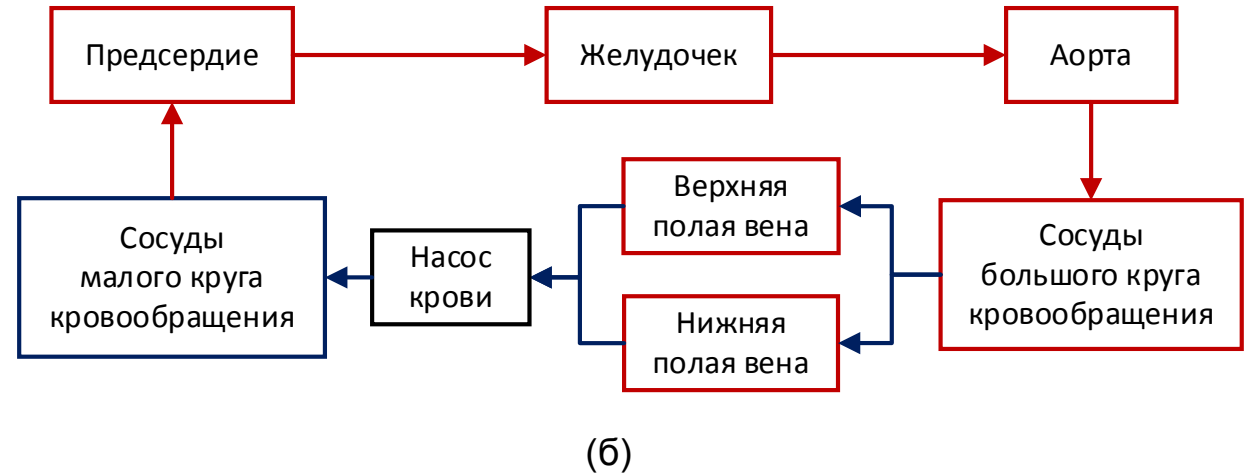
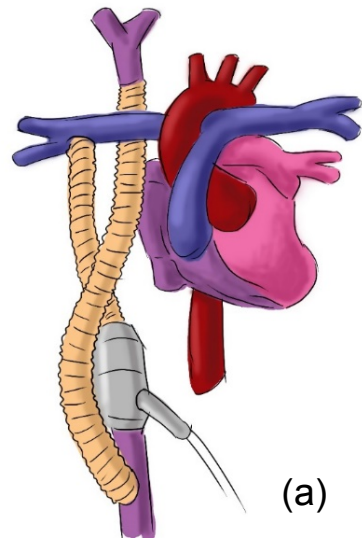
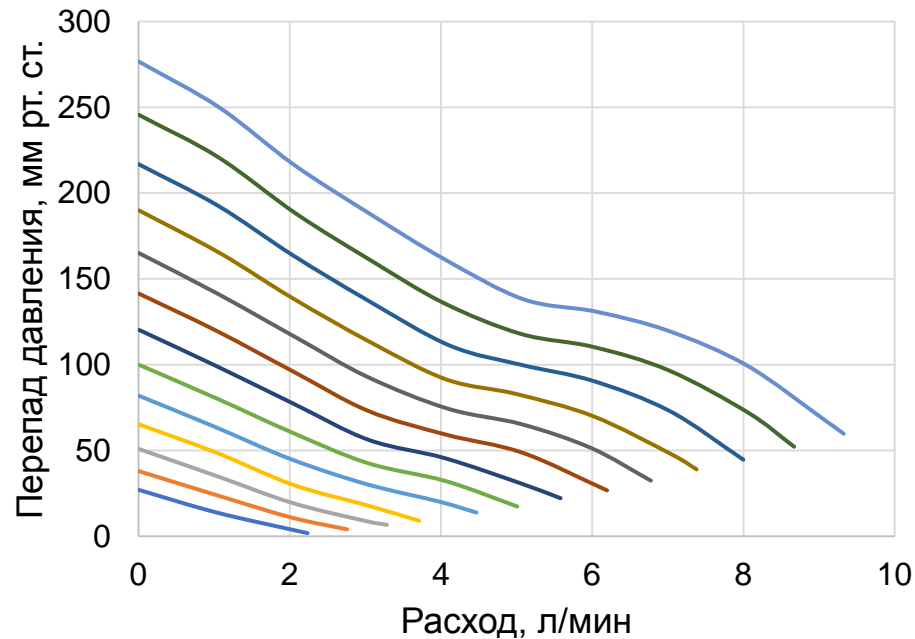


Рис. 2 Схематическое изображение (а) и структурная схема (б) синтеза БТС ОК для способа структурной идентификации №2



# Структурно-параметрическая идентификация имплантируемого педиатрического роторного насоса крови



— 6000 — 7000 — 8000 — 9000 — 10000  
 — 11000 — 12000 — 13000 — 14000 — 15000  
 — 16000 — 17000 — 18000

Рис. 1. Экспериментальные расходно-напорные характеристики насоса имплантируемого педиатрического роторного насоса крови для скоростей вращения ротора в диапазоне 6000 – 18000 об/мин

$$H(t) = R \cdot Q(t) + L \cdot \frac{dQ(t)}{dt} + \beta \omega^2(t),$$

где  $H$  – напор насоса,  $t$  – время,  $R$  – сопротивление насоса,  $Q$  – скорость потока,  $L$  – инертность крови в насосе,  $\beta$  – коэффициент, определяющий степень влияния квадрата скорости на перепад давлений,  $\omega$  – скорость вращения ротора\*.

Таблица. Параметры модели насоса

Параметр	Скорость вращения ротора (об/мин)					
	6000	7000	8000	9000	10000	11000
$R_H$ (мм рт. ст. x c/мл)	0,6754	0,7483	0,8147	0,9168	0,9093	0,9829
$L_H$ (мм рт. ст. x c <sup>2</sup> /мл)	0,055	0,06	0,05	0,06	0,05	0,05
$\beta$ ( $\times 10^{-7}$ мм рт. ст./об/мин <sup>2</sup> )	7,3668	7,6315	7,7578	7,9298	7,9152	8,0105

# Метод оптимизации состояния биотехнической системы одножелудочкового кровообращения

Метод включает в себя этапы:

1. Определение эффективности и оценка необходимости оптимизации состояния системы одножелудочкового кровообращения.
2. Идентификация биотехнической системы одножелудочкового кровообращения.
3. Определение скоростей вращения ротора, при которых оптимизация допустима.
4. Определение эффективности и оптимального состояния биотехнической системы.
5. Оценка эффективности биотехнической системы.
6. Оценка целесообразности синтеза биотехнической системы.

# Эффективность системы одножелудочкового кровообращения

- Гемодинамические характеристики одножелудочкового кровообращения:

$$B = [Q_{CB} \bar{Q}_5 P_2^{\max} P_2^{\min} \bar{P}_4 \bar{P}_5] \quad (1)$$

где  $Q_{CB}$  – сердечный выброс,  $P_2^{\max}$  – систолическое давление крови в аорте,  $P_2^{\min}$  – диастолическое давление крови в аорте,  $\bar{P}_4$  – среднее давление в верхней полой вене,  $\bar{P}_5$  – среднее давление в нижней полой вене,  $\bar{Q}_5$  – средний объёмный расход крови в нижней полой вене.

- Для каждого из трёх рассматриваемых состояний системы кровообращения (целевое, допустимое, недопустимое) определены диапазоны гемодинамических характеристик  $B$  для трёх возрастных групп педиатрических систем кровообращения. Характеристики, входящие в формулу (1) являются разнородными и не равнозначными, поэтому для корректного определения эффективности введены весовые коэффициенты:

$$e_i = \frac{\max(B_i^{ЦС}) - \min(B_i^{ЦС})}{\bar{B}_i^{ЦС}} \quad (2)$$

где  $i$  – номер характеристики,  $\bar{B}_i^{ЦС}$  – среднее значение размаха характеристики для целевого диапазона.

- Эффективность определяется суммой относительных отклонений параметров от максимальных целевых значений  $\max(B_i^{ЦС})$ :

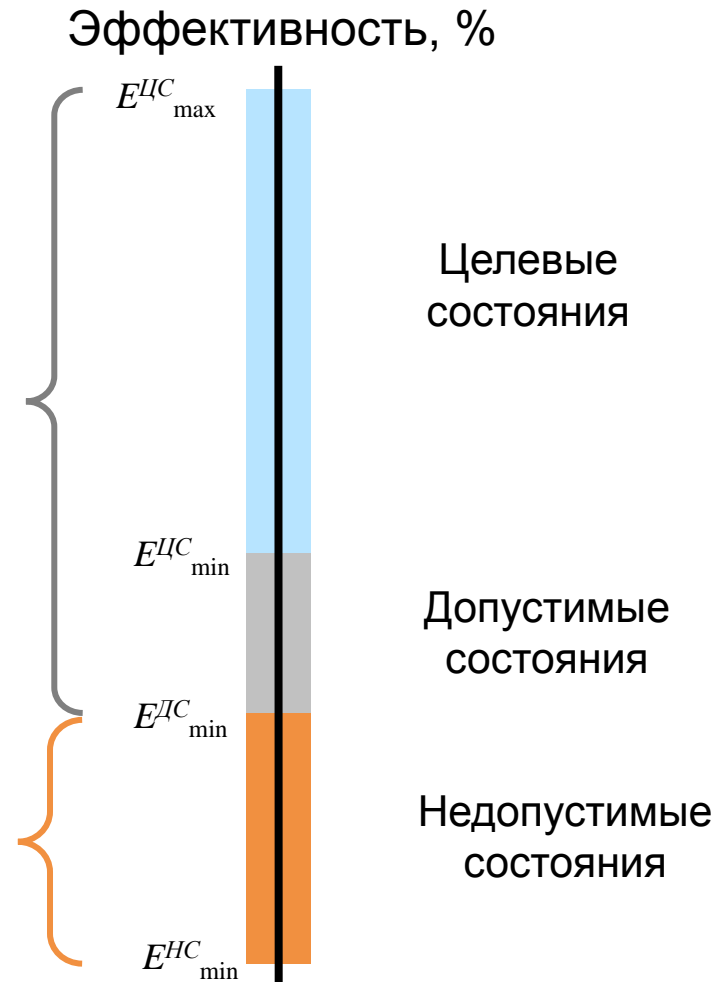
$$E = \frac{100}{\sum_{i=1}^N e_i} \cdot \left( \sum_{i=1}^4 \left( e_i \cdot \left( 1 - \frac{|\max(B_i^{ЦС}) - B_i|}{\max(B_i^{ЦС})} \right) \right) + \sum_{i=5}^6 \left( \eta(P_{ПВ}^K - B_i) \cdot e_i \cdot \left( 1 - \frac{|\max(B_i^{ЦС}) - B_i|}{\max(B_i^{ЦС})} \right) \right) \right) \quad (3)$$

где  $N$  – число параметров,  $P_{ПВ}^K$  – критический уровень для давления в полых венах.

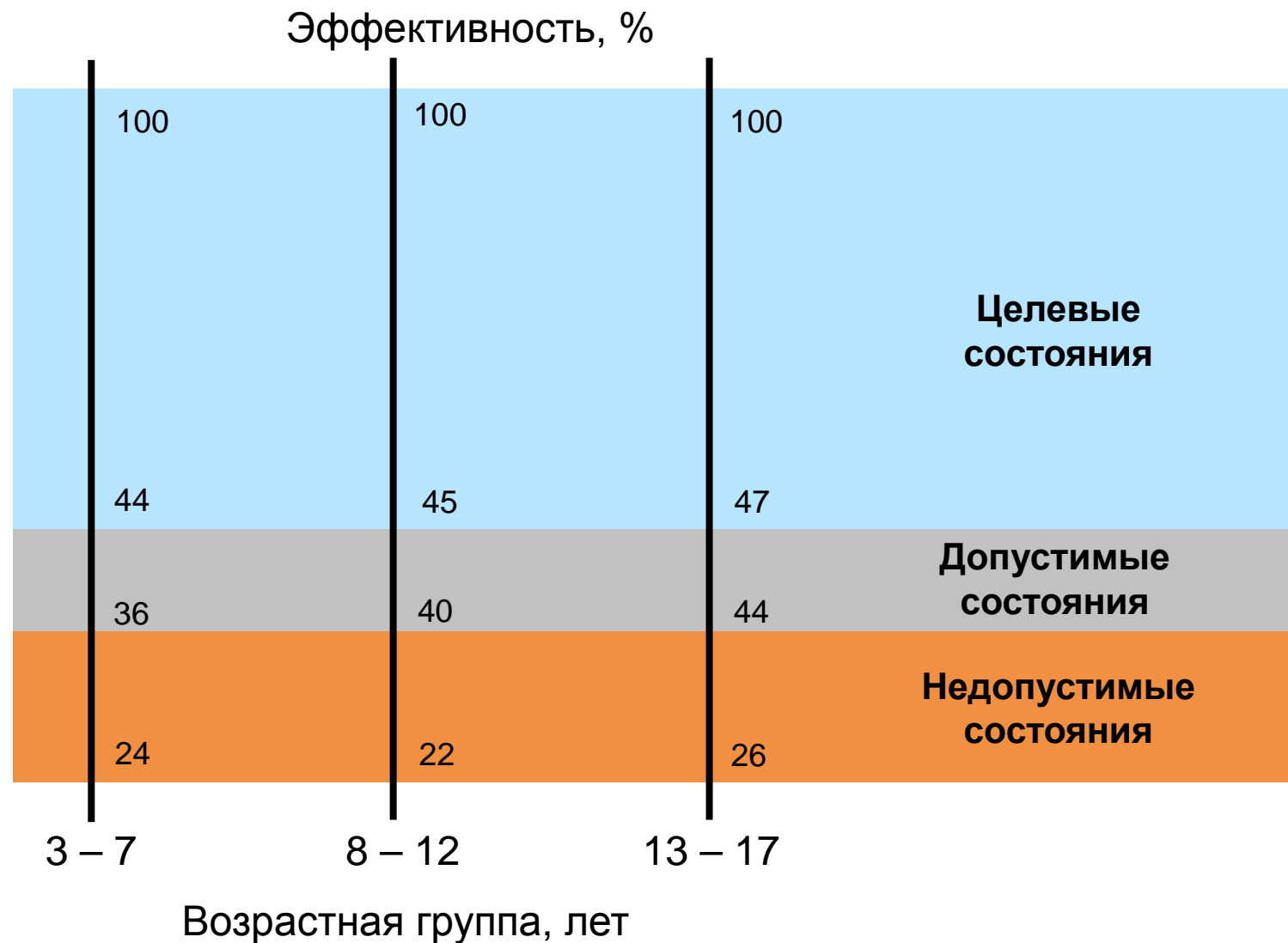
# Критерии необходимости оптимизации состояния системы одножелудочкового кровообращения

Если  $E_{\min}^{ДС} \leq E^{КС}$  и  $P_{ПВ} \geq P_{ПВ}^K$ , оптимизация состояния требуется, если превышены критические параметры

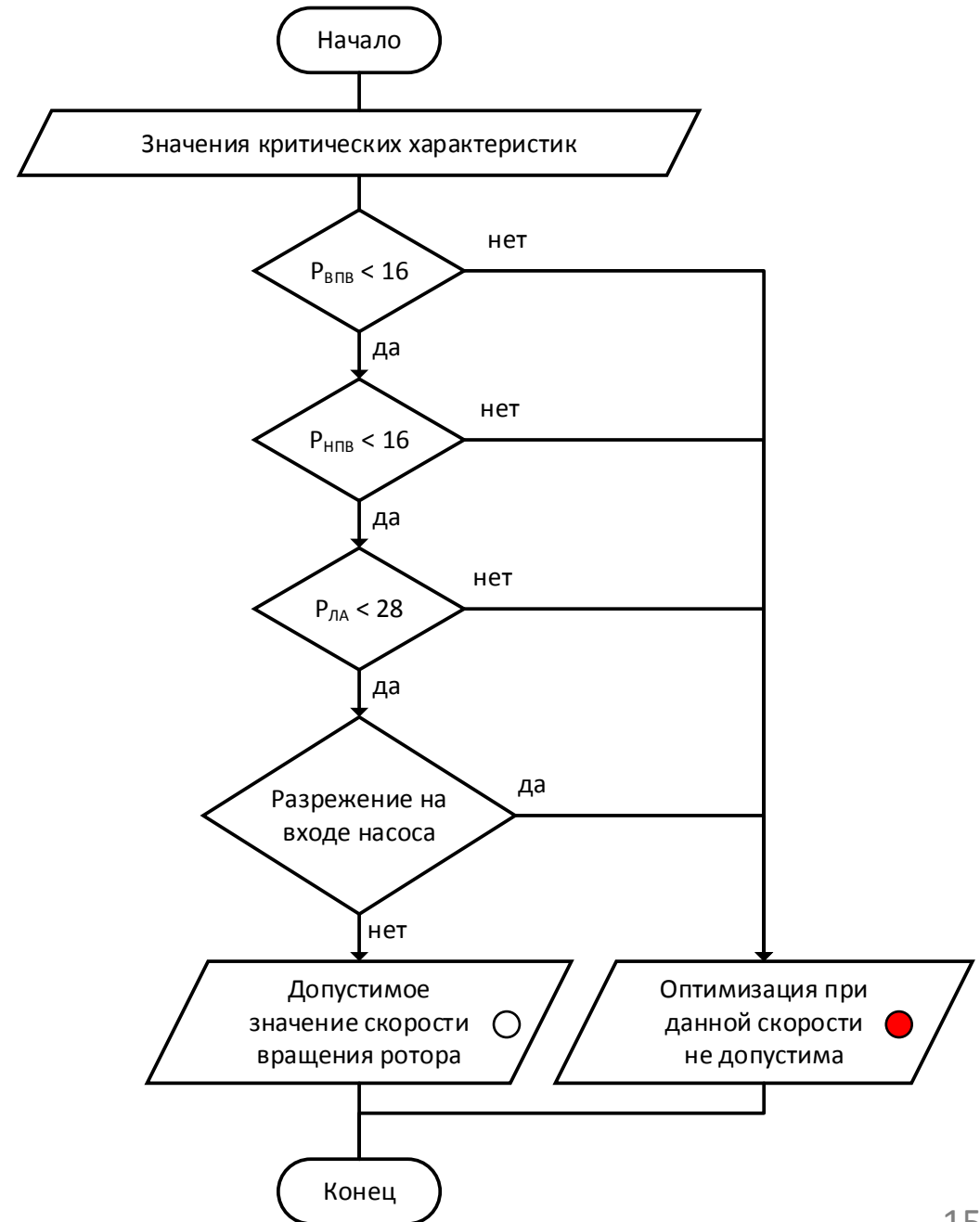
Если  $E^{КС} < E_{\min}^{ДС}$ , оптимизация состояния требуется



# Шкалы оценки эффективности системы кровообращения по возрастным группам



# Определение допустимых скоростей с учётом критических характеристик



$P$  – давление, ВПВ – верхняя полая вена, ЛА – лёгочная артерия, НПВ – нижняя полая вена

# Определение эффективности и оптимального состояния биотехнической системы

- Состояния, при которых не выполняются критерии допустимости, могут приводить к неблагоприятным явлениям в системе кровообращения вплоть до летального исхода.

$$E^{BTC} = \frac{100}{\sum_{i=1}^N e_i} \cdot \sum_{i=1}^4 e_i \cdot \left( 1 - \frac{|\max(B_i^{UC}) - B_i|}{\max(B_i^{UC})} \right) + \frac{100}{\sum_{i=1}^N e_i} \cdot \left( \sum_{i=5}^6 \eta(P_{PB}^K - B_i) \cdot e_i \cdot \left( 1 - \frac{|\max(B_i^{UC}) - B_i|}{\max(B_i^{UC})} \right) - \sum_{j=1}^2 h_j \cdot H_j \right),$$

$$H_1 = \eta(\bar{P}_{ЛА} - (P_{ЛА}^K - \delta_P)) \cdot \frac{P_{ЛА}^K}{\bar{P}_{ЛА}}, \quad h_1 = \frac{\max(P_{ЛА}^T) - \min(P_{ЛА}^T)}{\bar{P}_{ЛА} \cdot \sum_{i=1}^N e_i},$$

$$H_2 = \eta((P_{ex}^K + \delta_P) - \bar{P}_{ex}) \cdot \frac{P_{ex}^K}{\bar{P}_{ex}}, \quad h_2 = \frac{\max(P_{ex}^T) - \min(P_{ex}^T)}{\bar{P}_{ex} \cdot \sum_{i=1}^N e_i},$$

где  $H$  – параметры допустимости, превышение которых приводит к опасным для жизни состояниям,  $h$  – весовые коэффициенты для параметров допустимости,  $P_{ex}$  – давление на входе насоса,  $P_{ЛА}$  – давление в лёгочной артерии,  $K$  – критический уровень,  $\delta_P$  – абсолютная погрешность датчиков измерения давления.

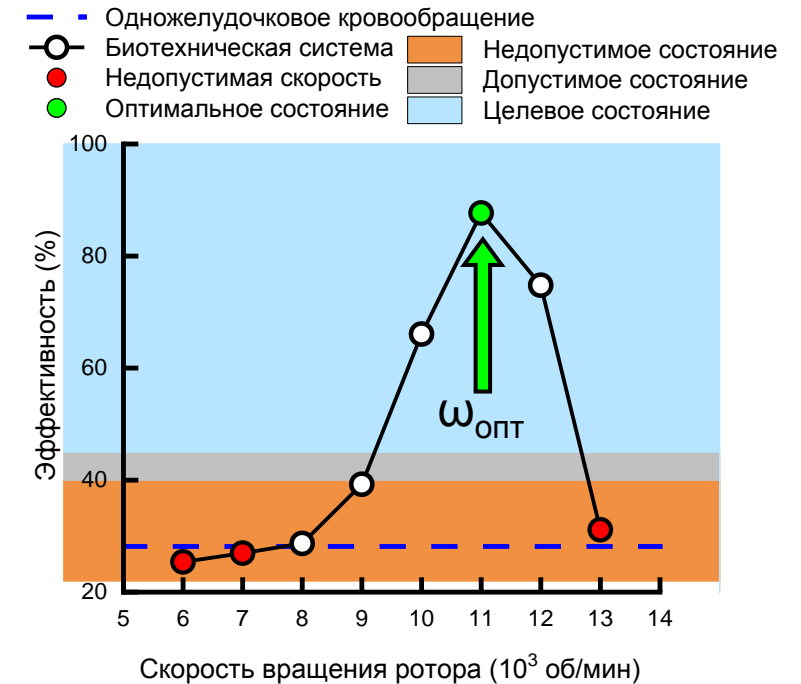


Рис. Эффективность одножелудочкового кровообращения и биотехнической системы одножелудочкового кровообращения в зависимости от скорости вращения ротора



# Оценка эффективности биотехнической системы одножелудочкового кровообращения

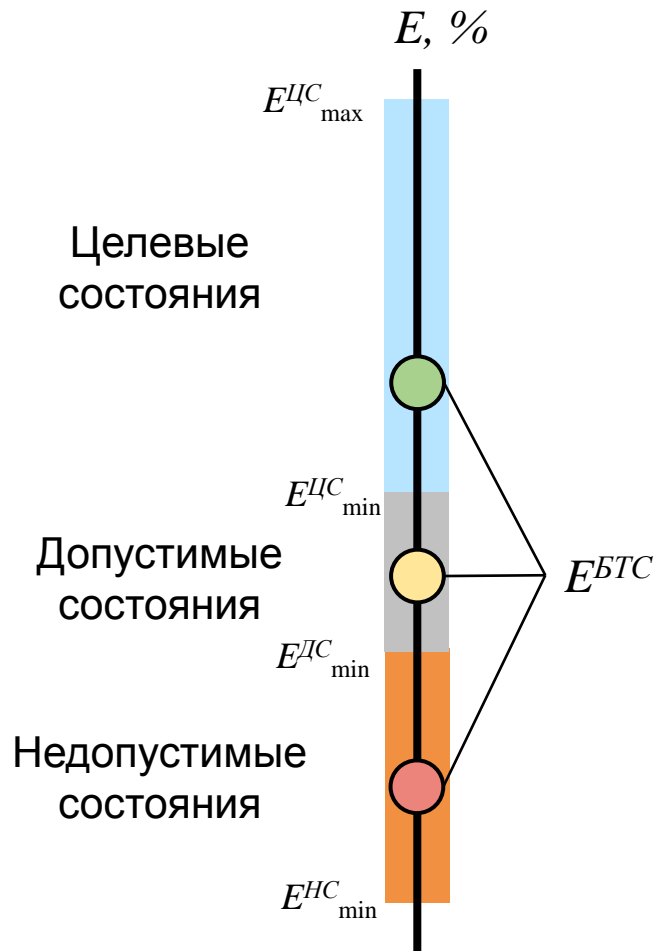


Таблица. Критерии оценки эффективности биотехнической системы

Неэффективна	Низкоэффективна	Высокоэффективна
$E^{БТС} < E_{\min}^{ДС}$	$E_{\min}^{ДС} \leq E^{БТС} < E_{\min}^{ЦС}$	$E_{\min}^{ЦС} \leq E^{БТС}$

*БТС* – биотехническая система, *ДС* – допустимое состояние,  
*НС* – недопустимое состояние, *ЦС* – целевое состояние

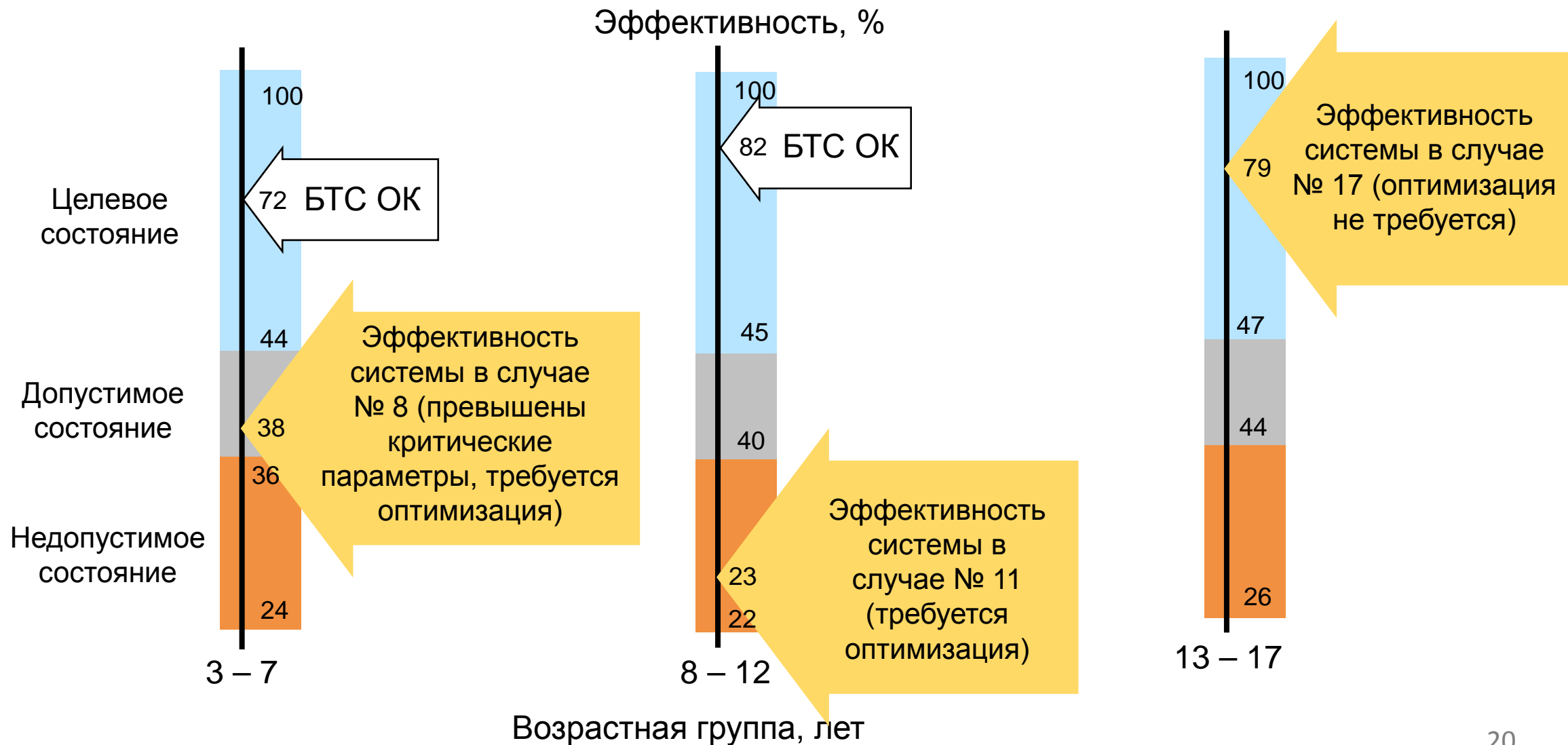
# Критерии целесообразности синтеза биотехнической системы одножелудочкового кровообращения

- Если:  $\bar{P}_{ЛА} < 28 \text{ мм рт.ст.}$   
 $\bar{P}_{ВПВ} < 16 \text{ мм рт.ст.}$   
 $\bar{P}_{НПВ} < 16 \text{ мм рт.ст.}$  , синтез целесообразен  
 $\bar{P}_{вх} > 1 \text{ мм рт.ст.}$   
 $E^{БТС} > E_{\min}^{ДС}$

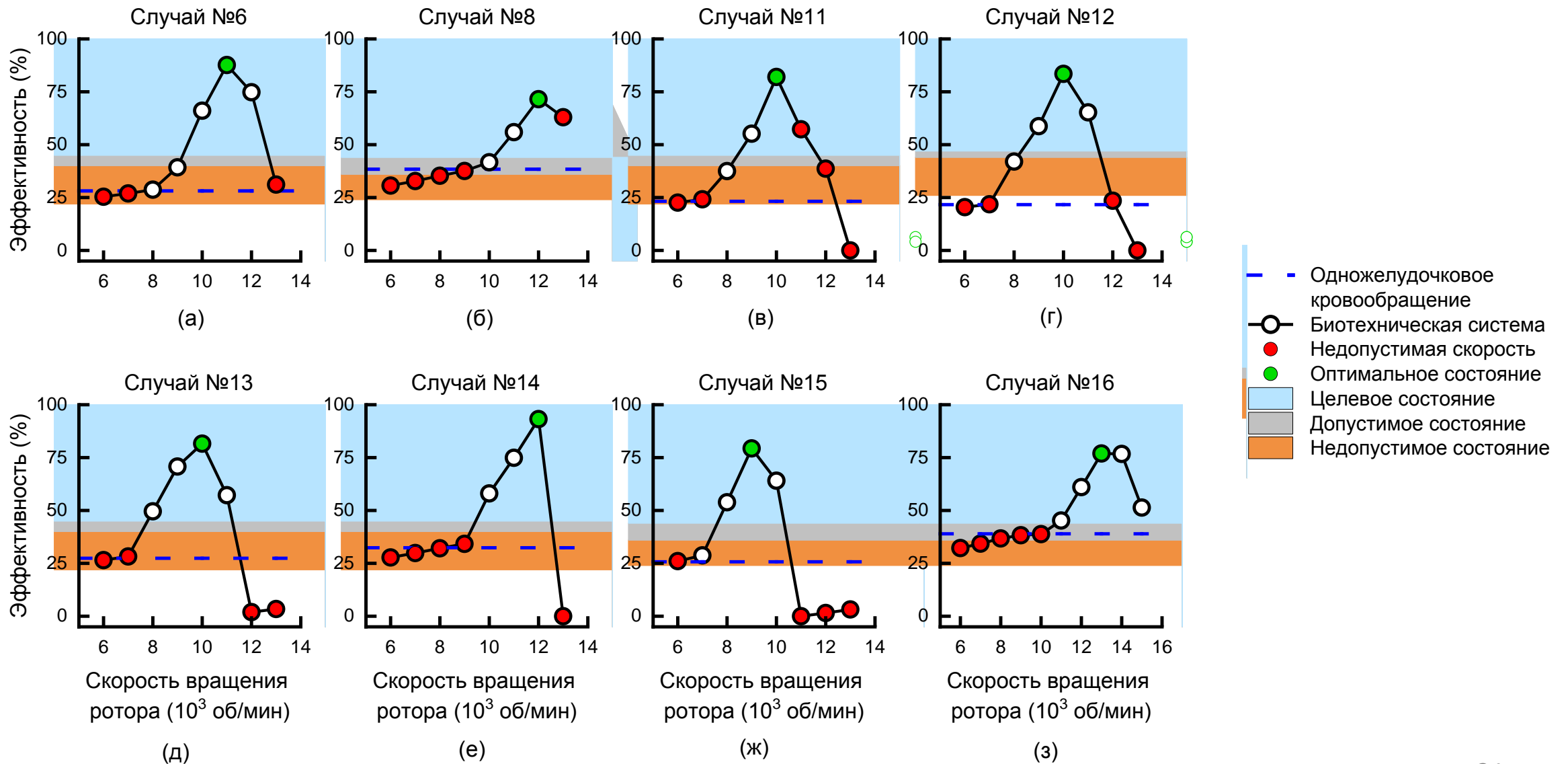
# Алгоритм оптимизации состояния биотехнической системы одножелудочкового кровообращения



# Верификация метода и алгоритма оптимизации состояния биотехнической системы



# Результаты работы алгоритма оптимизации



# Оптимальные состояния биотехнических систем одножелудочкового кровообращения

Случай №	Возраст, лет	Давление, мм рт.ст.					Расход, л/мин		ω, об/мин	Е, %	Целесообразность
		Сист.	Диаст.	ВПВ	НПВ	ЛА	СВ	НПВ			
Норма	3–7	95±15	53±18	5±3	5±3	16±4	3,7±0,6	2,2±0,4			
8	7	120,9	65,6	10,7	10,8	22	5,3	3,4	12000	72	Да
15	6	95	49	8,9	9,0	23	2,6	1,7	9000	79	Да
16	7	120	67	12,0	12,1	18	5,4	3,6	13000	77	Да
Норма	8–12	104±14	58±18	6±3	6±3	17±7	4,8±1,1	2,6±0,2			
6	12	133	62	9,0	9,0	24	4,2	2,5	11000	88	Да
11	11	103	58	9,4	9,4	27	3,4	2,1	10000	82	Да
13	10	133	71	6,7	7,2	24	3,4	2,1	10000	82	Да
14	10	140	87	8,4	8,4	23	4,8	3,0	12000	93	Да
Норма	13–17	112±17	60±15	6±3	6±3	18±8	5,2±1,1	3,0±0,6			
12	17	96	48	9	9	24	3,5	2	10000	83	Да

ВПВ — верхняя полая вена, Диаст. — диастолическое давление в аорте, ЛА — лёгочная артерия, НПВ — нижняя полая вена, СВ — сердечный выброс, Сист. — систолическое давление в аорте, Е — эффективность,  — высокоэффективная БТС ОК, Е — эффективность, ω — скорость вращения ротора

# Основные результаты и выводы

- Разработанные методы и алгоритмы в совокупности были использованы для определения необходимости оптимизации состояния системы одножелудочкового кровообращения, оценки целесообразности синтеза и эффективности биотехнической системы одножелудочкового кровообращения в оптимальном состоянии для 17 случаев одножелудочкового кровообращения в возрасте от 3 до 17 лет.
- Установлено, что необходимый уровень эффективности системы одножелудочкового кровообращения составляет 36 % для возрастной группы от 3 до 7 лет, 40% для возрастной группы от 8 до 12 лет, 44 % для возрастной группы от 13 до 17 лет, целевой уровень составляет 44 % для группы от 3 до 7 лет, 45 % для группы от 8 до 12 лет и 47 % для группы от 13 до 17 лет. Оптимизация состояния биотехнической системы одножелудочкового кровообращения является высокоэффективной, если эффективность системы лежит в целевом диапазоне для соответствующей возрастной группы.
- По результатам исследования установлено, что оптимизация состояния системы одножелудочкового кровообращения необходима в 8 из 17 рассмотренных случаях. В случаях необходимости оптимизации состояния системы установлено, что оптимизация посредством синтеза биотехнической системы высокоэффективна и не ухудшает состояние кровообращения, эффективность указанных случаев превышает 71 %.



**СЕЧЕНОВСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**Спасибо за внимание!**

[rubtsova\\_e\\_n@staff.sechenov.ru](mailto:rubtsova_e_n@staff.sechenov.ru)