Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Факультет вычислительной математики и кибернетики
Кафедра вычислительных методов

Орлова Ирина Евгеньевна

Разработка согласованных моделей легочного кровообращения

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Научный руководитель:
доцент Буничева А.Я.

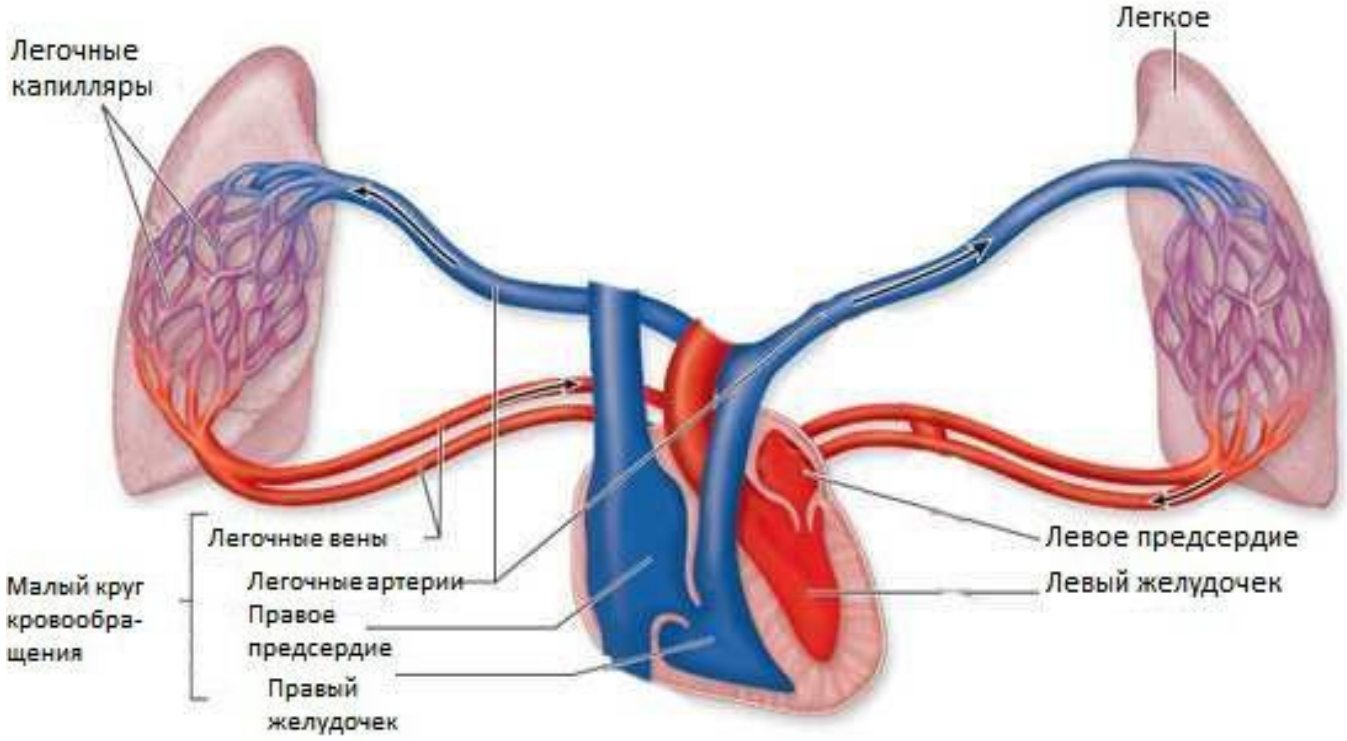
Москва 2017

Цели

- Изучение физиологических параметров кровообращения в малом круге с помощью медицинских атласов и литературы по физиологии кровообращения. Выделение особенностей легочного круга кровообращения.
- Ознакомление с программным комплексом CVSS, позволяющим строить графы, соответствующие кровеносной системе, изменять топологию уже построенных графов, задавать параметры всех элементов графа, а также проводить вычисления.
- Модернизация графа легочного круга кровообращения с целью воспроизведения характерных особенностей, свойственных только легочному кровообращению. Подбор входных параметров для получения результатов расчета течения крови, близких к известным физиологическим показателям.

Малый круг кровообращения

МКК служит для обогащения крови кислородом в легких. Он начинается в правом желудочке, куда переходит вся венозная кровь, поступившая в правое предсердие. Из правого желудочка выходит легочный ствол, который далее делится на правую и левую легочные артерии. Последние разветвляются в легких на артерии, артериолы, прекапилляры и капилляры. Обогащенная кислородом артериальная кровь поступает из капилляров в венулы и вены, которые впадают в левое предсердие.



Граф системы кровообращения

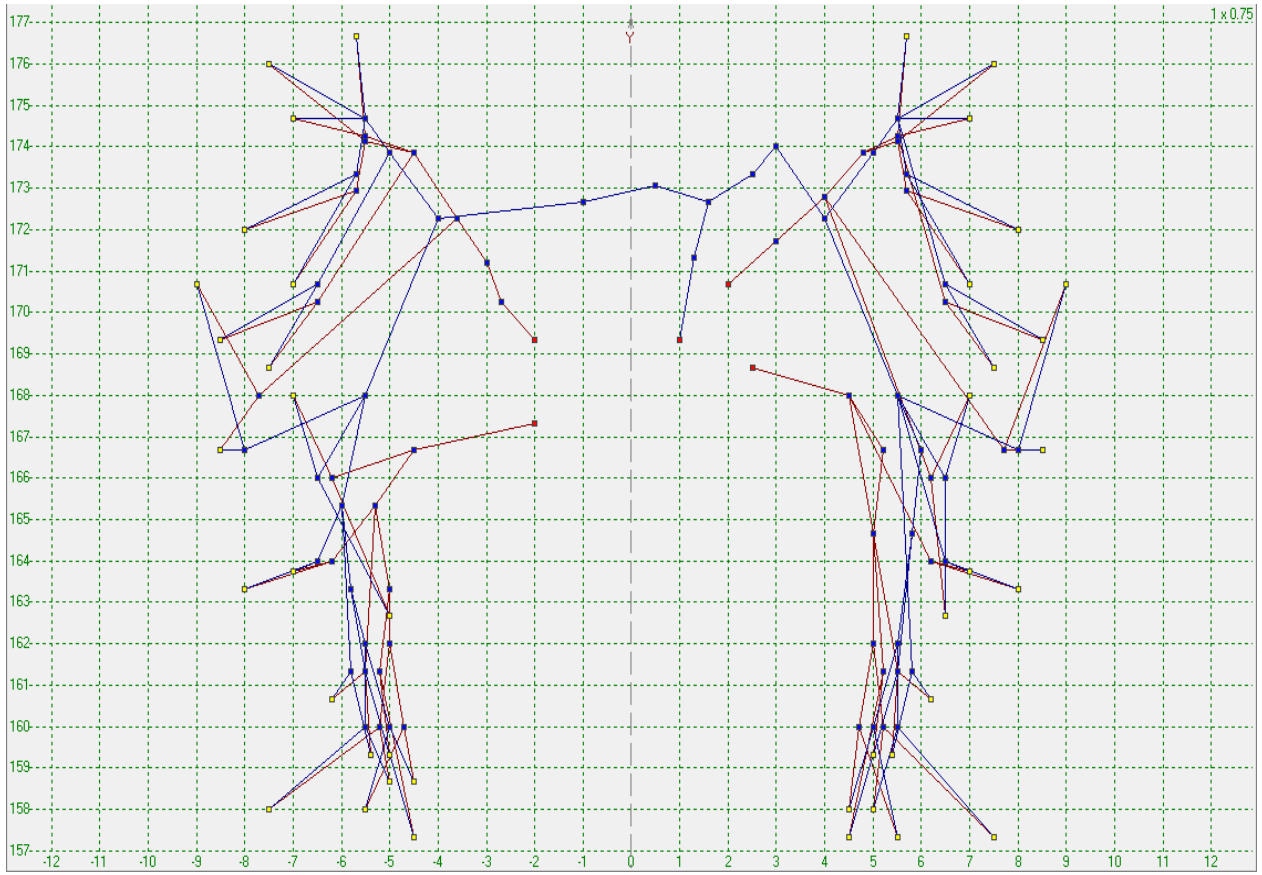
Системе эластичных сосудов сопоставим граф.

Вершинам графа соответствует либо область (точка), в которой соединяются два или более сосудов, либо отдельные органы организма (сердце, почки, желудок и др.).

Ребрам графа соответствуют сосуды, которые будем считать направленными. Ребра соответствуют либо реальным сосудам кровеносной системы, представленным магистральными сосудами крупного и среднего диаметров, либо жгутам однородных мелких сосудов кровеносной системы.

Базовый граф системы кровообращения

Базовый граф малого круга кровообращения был сформирован на основе данных из медицинских атласов и по образцу большого круга. Малый круг имеет свои характерные особенности и отличия от большого круга, поэтому моделирование кровотока в этом контуре не может быть осуществлено без учета этих особенностей.

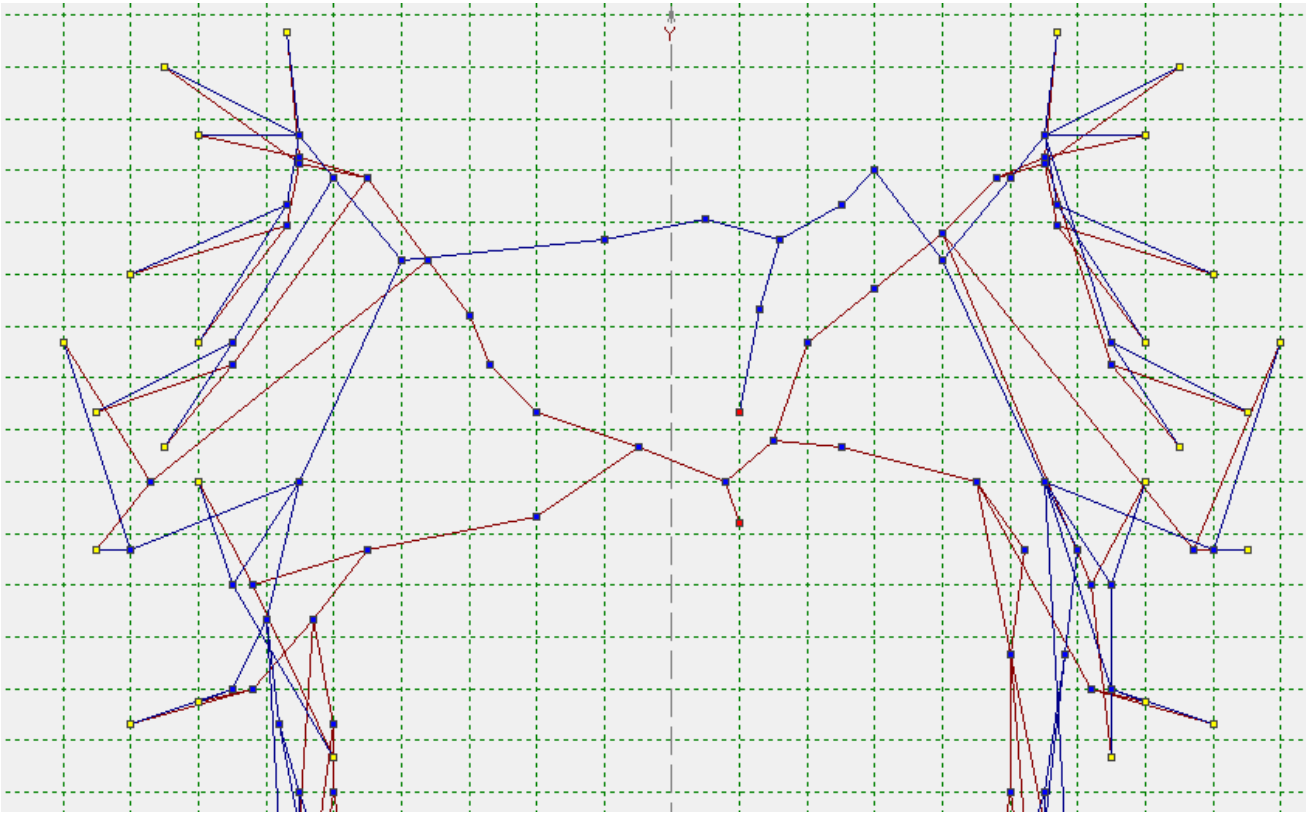


Модификация базового графа

- Для моделирования работы сердца и корректной работы с графом необходимо создать замкнутую систему, то есть нужно, чтобы в графе было две особые вершины – «начало» и «конец» сосудистого русла.
- Моделирование сети капилляров бинарным деревом. Базовый граф реализован по подобию большого круга кровообращения, где падение давления осуществляется на мышечных тканях. В действительности в малом круге ткани и резистивные сосуды отсутствуют, есть лишь густая сеть капилляров, в которой и происходит падение давления.
- Выбор подходящей модели нагнетательной функции сердца.
- Подбор входных данных (параметров сосудов) для приближения результатов расчетов к реальным физиологическим показателям.

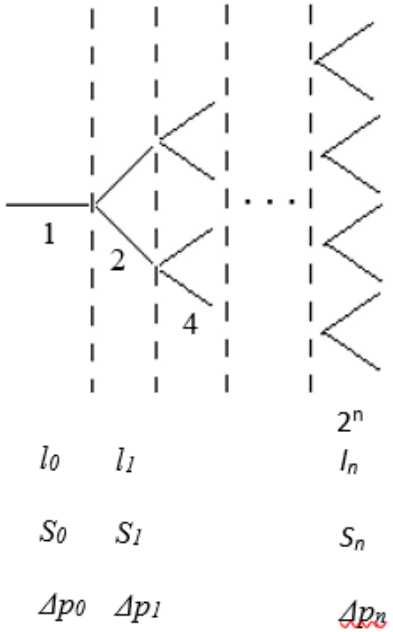
Изменение топологии базового графа

Топология базового графа была изменена, с тем чтобы иметь возможность проводить расчет на замкнутой системе кровообращения и иметь два граничных узла, соответствующих входу и выходу в малый круг.

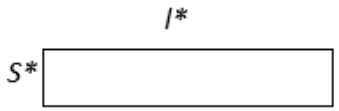


Замена тканей эффективными сосудами

Ветвление сосудов представим как двоичное дерево. Параметры эффективного сосуда подбираются так, чтобы при заданном перепаде давления и потоке крови сохранялся объем.



замена на эффективный сосуд



$$\sum_{i=0}^{n} s_i l_i 2^i = V \text{ - общий объем} \qquad \sum_{i=0}^{n} s_i l_i 2^i = l^* s^*$$

$$l^* = \frac{\sum_{i=0}^{n} s_i l_i 2^i}{s^*} \qquad s^* = \left(\frac{\sum_{i=0}^{n} s_i l_i 2^i}{\sum_{i=0}^{n} \frac{l_i}{2^i s_i^2}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Пусть соседние сосуды заданы следующим соотношением:

$$\begin{cases} s_i = \alpha s_i \\ l_i = \beta l_i \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} s_i = s_0 \alpha \\ l_i = l_0 \beta \end{cases}$$

Подставим это соотношение в s^*:

$$s^* = \left(\frac{\sum_{i=0}^{n} s_0 l_0 2^i \alpha^i \beta^i}{\sum_{i=0}^{n} \frac{l_0 \beta^i}{2^i s_0^2 \alpha^{2i}}} \right)^{\frac{1}{3}} = s_0 \left(\frac{\sum_{i=0}^{n} 2^i \alpha^i \beta^i}{\sum_{i=0}^{n} \frac{\beta^i}{2^i \alpha^{2i}}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Получим формулы s^* и l^* в подстановке α и β:

$$s^* = s_0 \left(\frac{2\alpha^2 - \beta}{2\alpha^2 (1 - 2\alpha\beta)} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$l^* = l_0 \left(\frac{2\alpha^2}{(1 - 2\alpha\beta)^2 (2\alpha^2 - \beta)} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Оценка параметров эффективных сосудов:

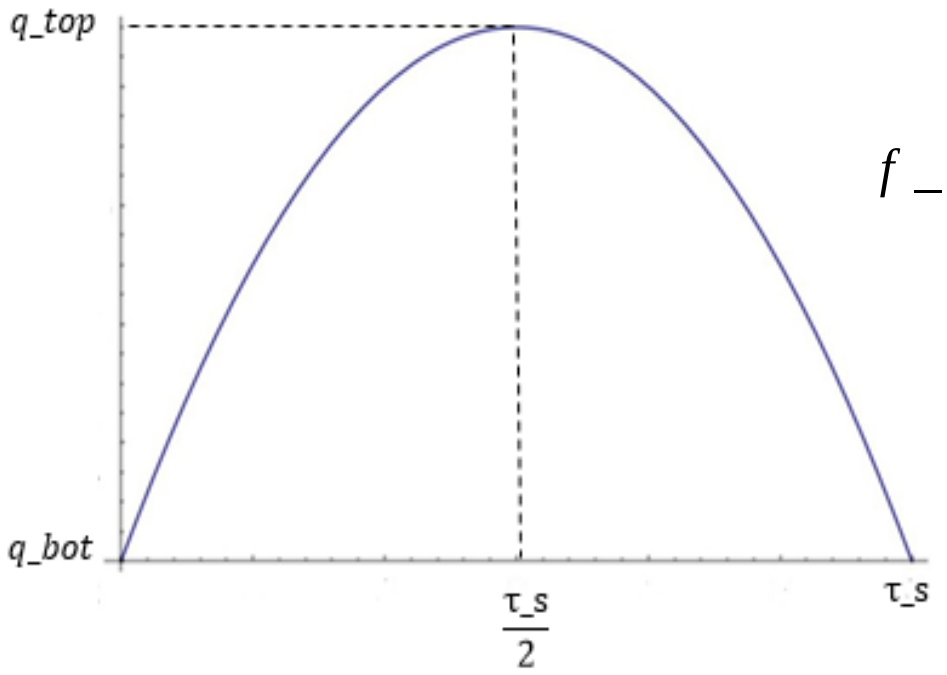
$$s^* = 1{,}0064 s_0$$

$$l^* = 64{,}7 l_0$$

Новая модель работы сердца

Модифицируем модель работы сердца так, чтобы соблюдались следующие условия:

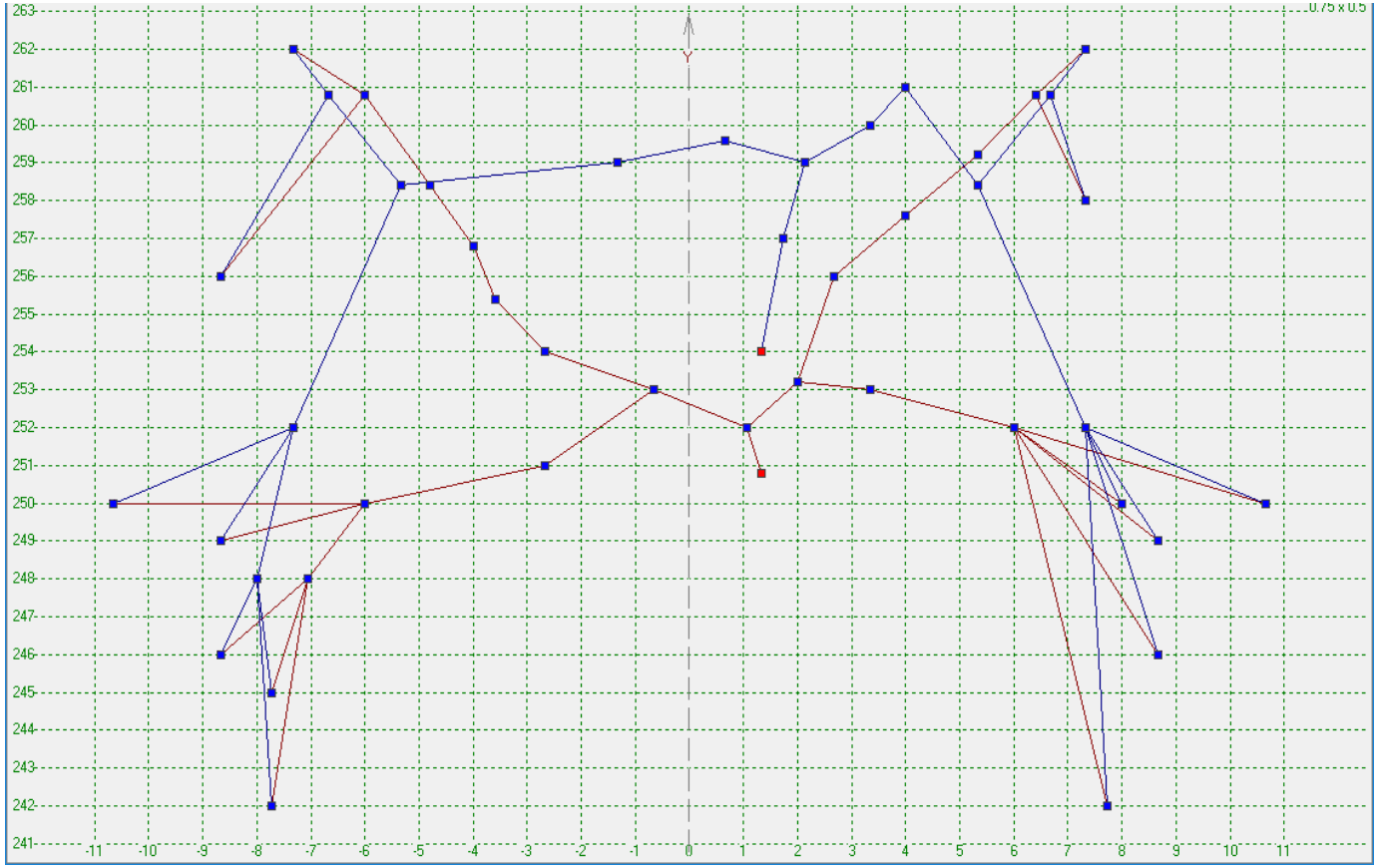
- функция выброса непрерывна;
- за время систолы (сердечного выброса) из сердца изгоняется требуемое количество крови.



$$f_su = -\frac{4(q_top)}{(\tau_s)^2}t^2 + \frac{4(q_top)}{\tau_s}t = -4(q_top)(\frac{t}{\tau_s})(\frac{t}{\tau_s} - 1)$$

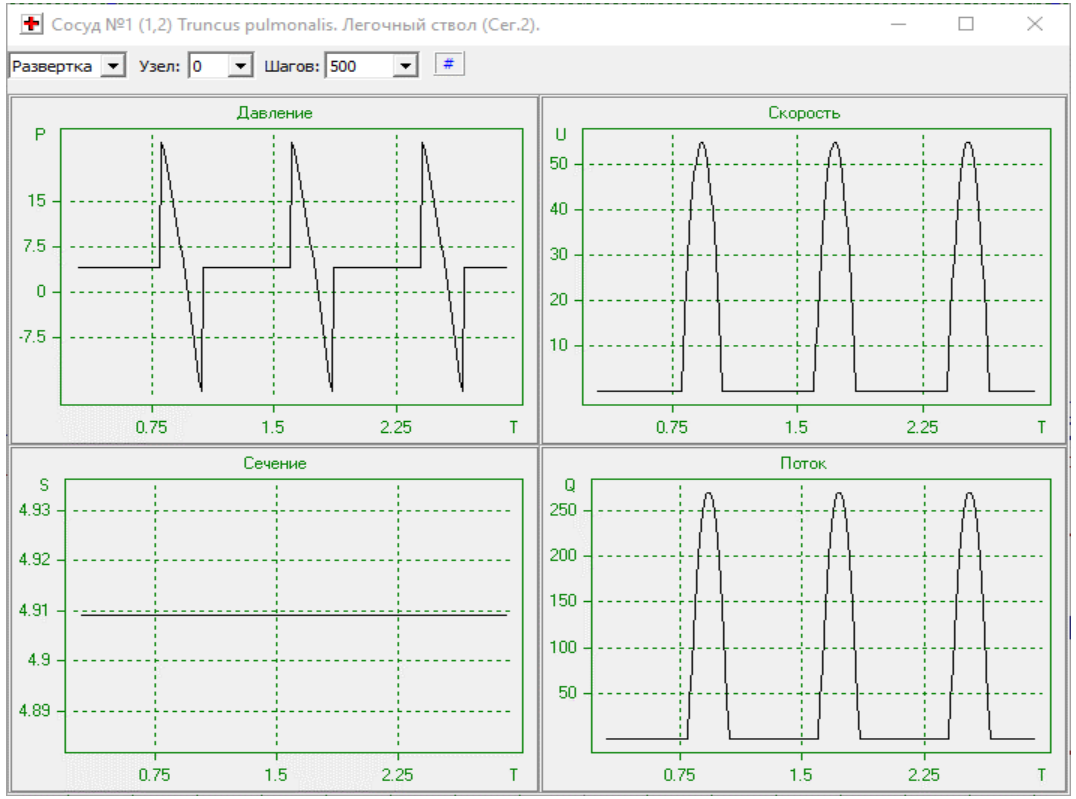
Уменьшение степени ветвления графа

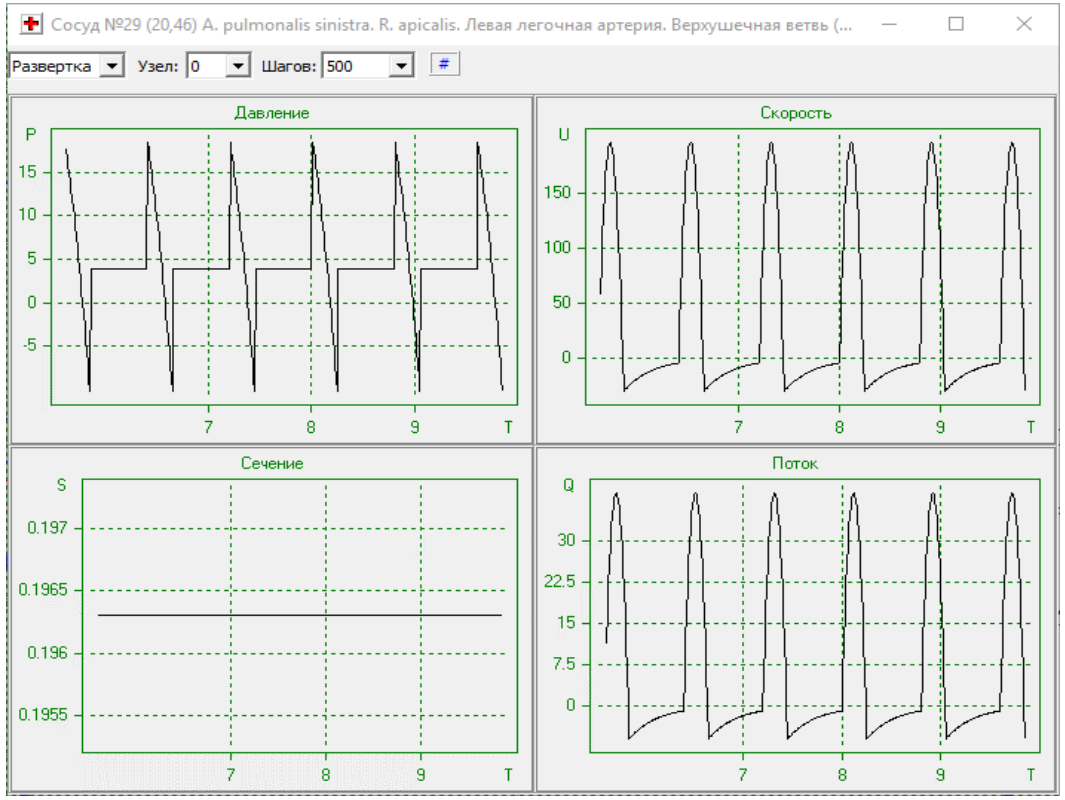
Для лучшего понимания закономерностей распределения давления, потоков и скоростей течения крови по сосудам легочного круга уменьшим степень ветвления базового графа:



Результаты расчетов

Используем предложенную модель функции сердечного выброса для такого графа:





Результаты расчетов улучшились относительно исходных, но еще не соответствуют реальным показателям, поэтому необходима корректировка параметров сосудов.

Подбор параметров

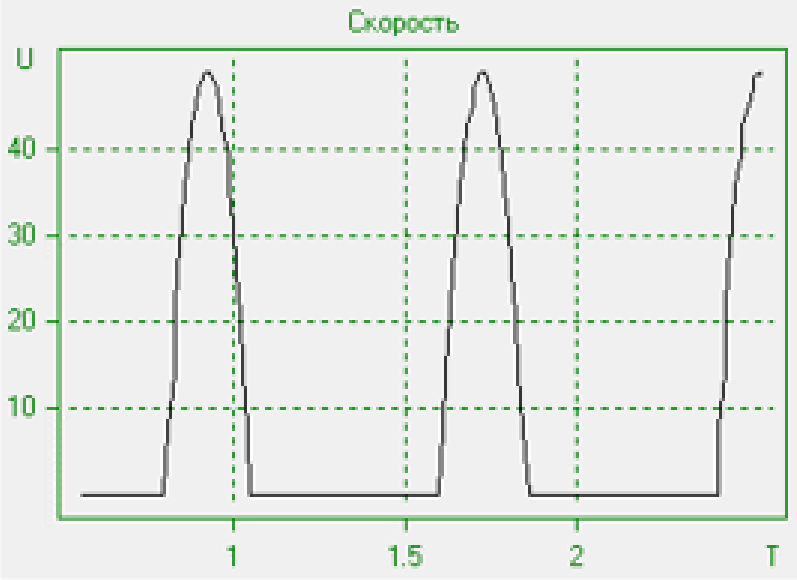
Среднестатистические целевые значения: во время систолы давление в правом желудочке возрастает до 22 мм рт. ст., давление в легочном стволе колеблется от 22 до 8 мм рт. ст., диаметр легочного ствола в среднем составляет 25 мм, его длина – около 40 мм, скорость кровотока из правого желудочка составляет 20-25 см/с и к концу малого круга падает до 1-3 см/с.

Некоторые результаты серии тестовых расчетов:

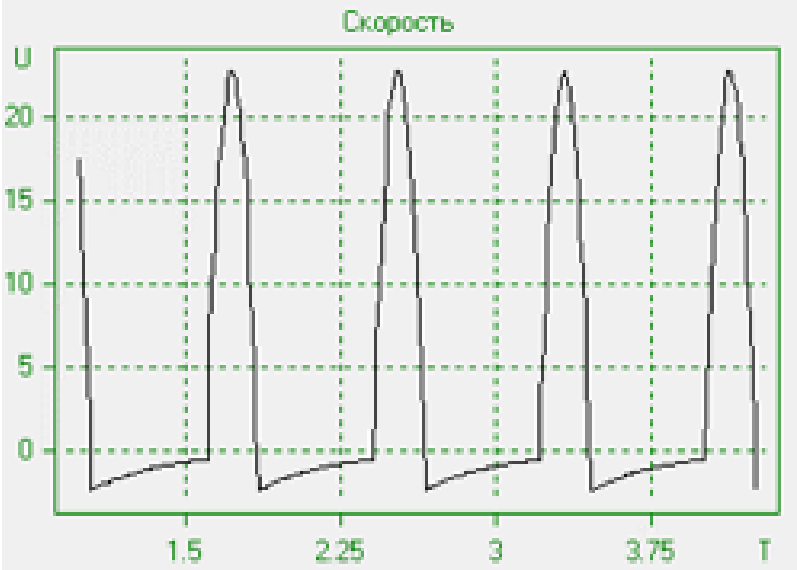
	Легочный ствол		Периферийная артерия		Периферийная вена		Легочные вены	
L, см	4	1	18	50	21	50	0,6	0,5
S, см²	2,5	5,5	0,196	0,3	0,196	0,3	5	5,5
P, мм рт.ст.	-20- 25	-15-25	-10 - 20	-10-20	2 - 5	2 - 6	3,5-4,5	3,5-4,5
Q, мл/с	270	270	9	7	5	4	270	270
U, см/с	0 - 90	0 - 45	-10 - 50	-2 - 22	-2 - 22	-1 - 12	2 - 50	2 - 45

Результаты расчетов

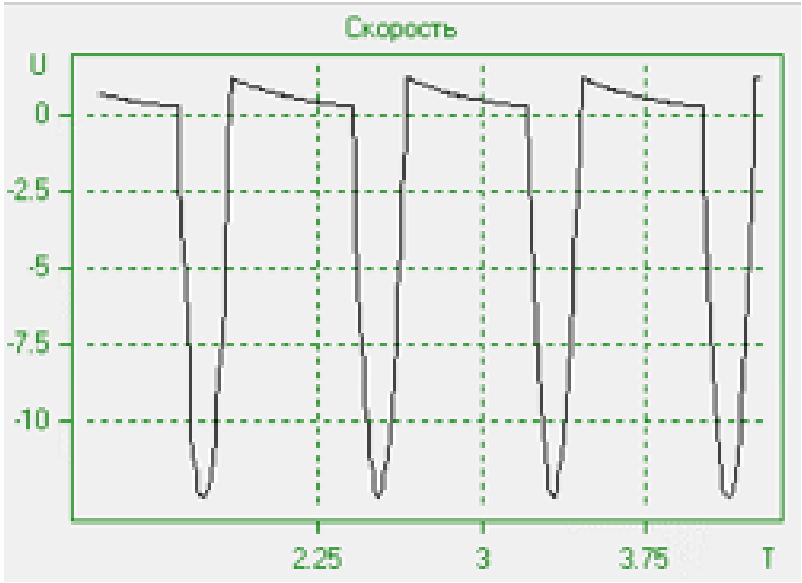
Скорости течения крови в различных сосудах:



Легочный ствол



Периферийная артерия



Периферийная вена

Выводы

- В ходе работы рассмотрены несколько моделей графа малого круга кровообращения, которые отличаются различными степенями подробности, а также параметрами сосудов (эластичностью, длиной, сечениями).
- Была реализована новая модель графа легочного круга, не содержащая тканей.
- Предложена и реализована модель работы сердца, подходящая для моделирования кровотока в малом круге кровообращения.
- Проведена серия расчетов для приведения параметров графа и параметров кровотока к физиологически адекватным показателям.

Спасибо за внимание!