

УДК 616.12.008.331+616.12.009.72

Влияние извитости коронарной артерии на объемную потерю кровотока у пациентов с коронарным синдромом X: экспериментальные данные

Себов Д. М.

Одесский национальный медицинский университет, г. Одесса, Украина

Резюме. Проведен анализ коронарных ангиографий 112 пациентов, больных ишемической болезнью сердца (ИБС) с коронарным синдромом X (КСХ) и выраженной извитостью коронарных артерий. Расчет относительной потери объема кровотока (E_Q) извитого отрезка коронарной артерии в сравнении с прямым участком при прочих равных условиях проводился по собственной физико-математической модели. Доказано самостоятельную гемодинамическую значимость ($E_Q > 40\%$) извитости коронарной артерии в ограничении локального коронарного резерва у 71,4 % больных ИБС с КСХ. Проведенный корреляционный анализ показал тесную связь между E_Q на извитом отрезке с количеством витков коронарной артерии (коэффициент корреляции = 0,75; $\alpha = 0,01$).

Ключевые слова: ишемическая болезнь сердца, коронарный синдром X, выраженная извитость коронарной артерии.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

В последнее время в научном кругу все большее значение уделяется неатеросклеротическим поражениям коронарных артерий. Это внимание связано с тем, что большой удельный вес коронарных ангиографий (КАГ), проведенных в связи с выявленными объективными признаками ишемии миокарда, не выявляет атеросклеротических изменений в стенках артерий. Данный феномен получил название коронарный синдром X, который встречается в 7–15 % случаев всех КАГ, проведенных на стабильной ишемической болезни сердца (ИБС) [1].

В данном контексте все большее внимание уделяется извитости коронарных артерий, которая может быть одним из существенных факторов обеднения коронарного кровотока. Так, определен феномен выраженной извитости коронарных артерий (ВИКА), или «Severe Coronary Tortuosity» [2]. Феномен ВИКА определяется как два и более последовательных 180-градусных поворота в крупной эпикардиальной коронарной артерии, визуально оцениваемые при КАГ, и распознается как самостоятельный гемодинамический фактор риска развития атеросклероза за счет возникающих гемодинамических эффектов (турбуленция, эффект «раскачивания» артерии и т. д.) [2]. Однако изучение влияния ВИКА на изменение скорости кровотока и потерю объемного кровотока до сих пор не проводилось, а общепринятые достоверные способы определения гемодинамической значимости ВИКА в ограничении коронарного резерва, снижения объемной потери артериального кровотока, включая прямые инвазивные или косвенные методики, на данный момент отсутствуют.

Коронарный синдром X встречается в 7–15 % случаев всех коронарных ангиографий, проведенных на стабильной ишемической болезни сердца.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель работы – изучить самостоятельную гемодинамическую значимость извитости сосудистого русла для ограничения локального коронарного резерва

ва путем определения объемной потери кровотока на извитом отрезке коронарной артерии у пациентов с ИБС и коронарным синдромом X.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследованы данные 148 пациентов, которым установлен диагноз ИБС и коронарного синдрома X (объективные признаки ишемии миокарда при отсутствии атеросклеротического поражения крупных эпикардиальных коронарных артерий). Процедура КАГ выполнялась по стандартной методике селективным методом [3]. При процедуре использовались неионные рентгеноконтрастные вещества (йопромид, йогексол).

Принимая во внимание данные Groves S. S. при изучении феномена ВИКА [2], нами установлены следующие критерии включения в исследование для ангиографических данных:

– отсутствие признаков атеросклеротического поражения коронарных артерий;

– при визуальной оценке данных КАГ на одном отрезке крупной эпикардиальной коронарной артерии (средне-дистальные сегменты правой коронарной артерии (ПКА), передней межжелудочковой ветви левой коронарной артерии (ПМЖВ ЛКА) и/или огибающих ветвей левой коронарной артерии (ОВ ЛКА)) имеется более чем два последовательных поворота (то есть три и более);

– максимальное количество последовательных витков, оцениваемых при исследовании, ограничивается девятью, так как дальнейшая извитость трудно поддается унификации в связи с крайне дистальной ее локализацией.

Так, извитость одной или нескольких коронарных артерий, в том числе ПМЖВ ЛКА, установлена у 112 (75,7 %) пациентов, ОВ ЛКА – у 23 (15,5 %) пациентов, ПКА – у 13 (8,8%) пациентов. Таким образом, для унификации методики измерений и расчетов, стандартизации исследования по коронарной анатомии принято решение включить в исследования пациентов с ВИКА только в бассейне ПМЖВ ЛКА. Наибольшее количество пациентов, которые вошли в исследование, имели 4–6 последовательных витков крупной эпикардиальной артерии, а среднее их количество в ПМЖВ ЛКА составило $6,1 \pm 0,2$.

Все КАГ проводились на ангиографической установке Phillips BV Pulsera (Голландия), частота излучения рентгеновского импульса у которой составляет 100 мс, то есть оптимальная запись видеоизображения на установке составляет 10 кадров в секунду.

Разработана физико-математическая модель определения относительной потери объемного расхода кровотока в извитой и нормальной (прямой) коронарных артериях. Исходными данными послужила КАГ пациентов, где определялись следующие данные:

1) участок коронарной артерии (ПМЖВ) с извитостью, с видеорегистрацией сосуда в левой кривой краниальной проекции, который можно аппроксимировать в виде неправильной синусоиды по оси Z_{0-w} , где: D_w – усредненный диаметр извитого участка артерии (среднее арифметическое проксимального и дистального концов отрезка); n – количество витков; A_i – амплитуда (высота) i -го витка в мм; l_i – ширина i -го витка в мм (рисунок 1);

2) прямой (неизвитый) участок коронарной артерии относительно похожего с извитым участком диаметра, наиболее подходящий сосуд – ОВ ЛКА среднего сегмента, представленный в виде прямого сосуда диаметром D_0 (мм), длиной Z_{0-w} (мм), то есть идентичной длине оси извитого участка артерии ($\sum l_{0-n}$). Измерение данного показателя производится в другой ангиографической проек-

ции (чаще всего – прямая каудальная), где искомый участок артерии ОВ ЛКА имеет прямое направление, в таком случае отсутствует погрешность в вычислении его длины.

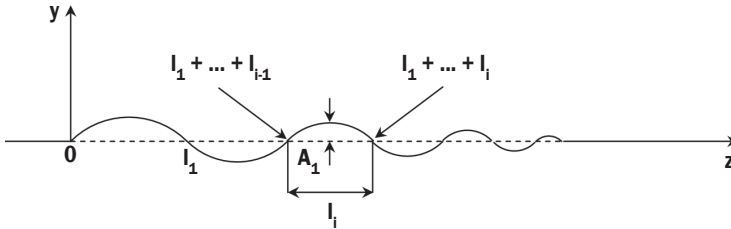


Рисунок 1
Извитый участок коронарной артерии, аппроксимированный в виде неправильной синусоиды на оси координат (объяснение в тексте)

Также вычисляется время заполнения контрастным веществом извитого (T_w) и прямого (T_0) участков коронарной артерии (производится одновременно на видеофильме одной проекции – левой косою краниальной), учитывая, что запись цифрового видеофильма производилась со скоростью 10 кадров в секунду. Так, например, если полное заполнение контрастом изучаемого отрезка коронарной артерии происходило за 4 кадра, то это свидетельствует о том, что время заполнения равняется 0,4 с и т. д.

Чтобы определить протяженность участка извитой артерии (L_w), ее аппроксимируют в виде разных синусоид и определяют длину каждой синусоиды (L_i):

$$L_i = \int_0^{l_i} \sqrt{1 + \frac{(A_i \pi)^2}{l_i^2} \cos^2 \frac{\pi z}{l_i}} dz \quad (1),$$

тогда:

$$L_w = L_1 + L_2 + \dots + L_n \sum_{i=1}^n L_i \quad (2).$$

Зная длину сосуда и время его заполнения, можно найти усредненную скорость движения (U_w) контрастного вещества (жидкости) в извитом отрезке артерии:

$$U_w = \frac{L_w}{T_w} \quad (3).$$

Идентично вычисляется усредненная скорость движения контрастного вещества в нормальном отрезке артерии (U_0).

Так как исходные данные получены с видеофильма одной ангиографической проекции, то в дальнейшем представляется возможным произвести сравнение объемных расходов крови в прямом и извитом участках в разрезе Z_{0-w} , так как прочие условия (такие как вязкость жидкости, системное артериальное давление, число сердечных сокращений, общее периферическое сосудистое сопротивление и т. д.) для обоих участков сосуда можно считать равными.

Объем крови, который проходит за промежуток времени (Δt) в разрезе Z_{0-w} в извитом сосуде, рассчитаем по формуле:

$$\Delta U_w = U_w \frac{\pi D_w^2}{4} \Delta t \quad (4),$$

тогда объемный расход (Q_w) крови в разрезе Z_{0-w} извитой артерии будет:

$$Q_w = \frac{\Delta U_w}{\Delta t} = U_w \frac{\pi D_w^2}{4} \quad (5).$$

Объем крови (ΔU_n), который проходит в разрезе Z_{0-w} в неизвитой артерии:

$$\Delta U_0 = \frac{\pi D_0^2}{4} U_0 \Delta t \quad (6),$$

а объемный расход крови (Q_0) в разрезе Z_{0-w} в неизвитой артерии будет:

$$Q_0 = \frac{\Delta U_0}{\Delta t} = \frac{\pi D_0^2}{4} U_0 \quad (7).$$

Далее рассчитаем относительные величины – процентную потерю скорости и объемного расхода кровотока в извитой артерии по отношению к прямому отрезку при прочих равных условиях:

$$E_U = \frac{U_0 - U_w}{U_0} \times 100\% \quad (8),$$

$$E_Q = \frac{Q_0 - Q_w}{Q_0} \times 100\% \quad (9).$$

Пример расчета относительной потери скорости и объемного расхода кровотока у пациента с ИБС, коронарным синдромом Х и ВИКА

На рисунке 2 представлено ангиограмму пациентки с феноменом ВИКА на фоне атеросклеротически интактных коронарных артерий. Для расчетов выбрано ангиограмму в левой кривой краниальной проекции с извитым участком ПМЖВ ЛКА – девять последовательными витками (рисунок 2а), со средним диаметром артерии 1,7 мм. Время заполнения выбранного участка извитой артерии (T_w) составило 0,6 с (полное заполнение контрастом извитого участка по коронарной видеограмме составляло 6 кадров).

Рассмотрим пример расчета.

1. Аппроксимируем извитую артерию как неправильную синусоиду, вычисляем амплитуды ($A_1 \dots A_9$) и ширину каждого витка ($l_1 \dots l_9$), по формуле (1) определяем длину каждого витка (L_i) и определяем общую длину извитого участка (L_w) (2). Как показано в таблице 1, расстояние L_w , которое преодолевает контраст при прохождении этого участка, составляет:

$$L_w = \sum_{i=1}^n L_i = 60,98 \text{ мм.}$$

Таблица 1
Расчет длины синусоиды (L_i) каждого витка (i) с учетом его ширины (l_i) и амплитуды (A_i) на извитом участке передней межжелудочковой ветви левой коронарной артерии пациентки И. 1958 года рождения

i ($n = 9$)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Сумма, мм
A_i , мм	2,8	2,8	2,9	2,8	2,9	2	1,8	1,1	1,6	-
l_i , мм	6,7	6,8	5,6	4,3	4,6	3,5	5,0	2,6	2,5	41,6
L_i , мм	9,03	9,08	8,33	7,31	7,65	5,52	6,34	3,51	4,21	60,98

2. По формуле (3) рассчитаем усредненную скорость движения жидкости по извитому участку артерии: $U_w = 101,6$ мм/с, тогда по формуле (5) получается: $Q_w = 230,7$ мм³/с.

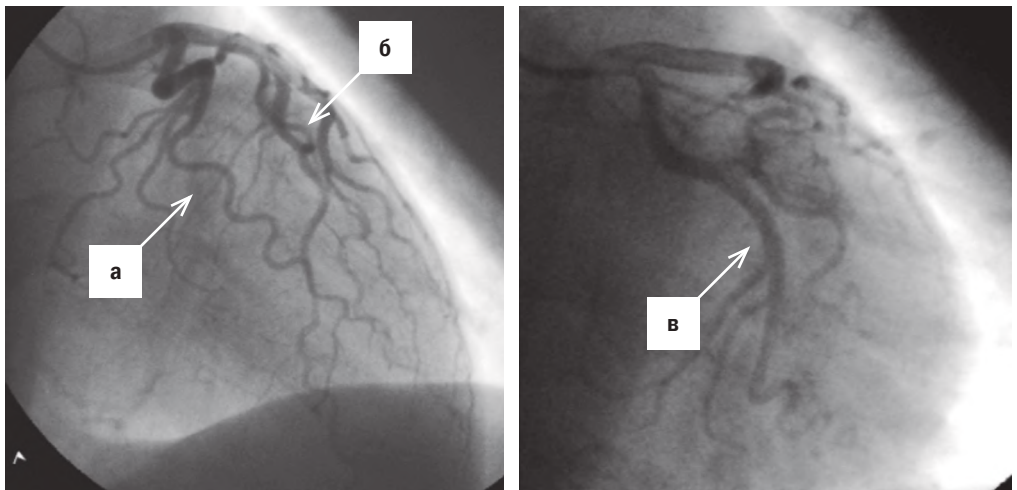
3. Выбираем прямой участок артерии – срединный сегмент ОВ ЛКА со средним диаметром сосуда 1,8 мм. В ангиограмме прямой каудальной проекции был выбран прямой отрезок ОВ ЛКА искомой длины: $L_0 = \Sigma (l_{1-9}) = 41,6$ мм (рисунок 2в). Путем перепроецирования отрезка артерии на прежнюю, левую косую краниальную проекцию (рисунок 2б), определялось время заполнения контрастным веществом (T_0) обозначенного участка артерии (для наблюдения равных условий), и в данном случае оно было равно 0,2 с. Тогда: $U_0 = L_0/T_0 = 208,00$ мм/с, а $Q_0 = 529,3$ мм³/с.

4. Рассчитаем процентную потерю скорости и объемного расхода в извитой артерии по отношению к прямому отрезку при прочих равных условиях (8, 9):

$$E_U = \frac{208,00 \text{ мм/с} - 101,00 \text{ мм/с}}{208,00 \text{ мм/с}} \times 100\% = 51,44 \%,$$

$$E_Q = \frac{529,30 \text{ мм}^3/\text{с} - 230,70 \text{ мм}^3/\text{с}}{529,30 \text{ мм}^3/\text{с}} \times 100\% = 56,41 \%.$$

Таким образом, у пациентки И. относительная потеря скорости кровотока при прохождении извитого отрезка коронарной артерии по сравнению с прямым участком идентичной по оси длины при прочих равных условиях составила 51,44 %, а относительная потеря объемного расхода кровотока – 56,41 %.



Левая косая краниальная проекция

Прямая каудальная проекция

Рисунок 2

Данные ангиограммы пациентки И. 1958 года рождения (объяснение в тексте)

5. Нами была найдена возможность определения гемодинамически значимого уровня относительной потери объемного расхода кровотока на извитом участке (с которым следует сравнивать значения расчета E_Q). Из интервенционной практики известно о методике измерения так называемого FFR (fractional flow reserve) – регионарного резерва кровотока [3]. Это прямой ин-

вазивный метод, в котором при помощи специального коронарного проводника с датчиком давления на конце измеряется кровяное давление на фоне максимальной гиперемии: $FFR = \frac{\text{давление в коронарной артерии дистальнее стеноза}}{\text{давление в аорте}}$.

Данный метод позволяет определить колебания давления до и после измененного (стенозированного) участка артерии. Также известно, что гемодинамически значимые изменения кровотока возникают при FFR менее 0,75 [4]. Хочется отметить, что метод FFR используется только для определения гемодинамической значимости стенозов (сужений) и не является пригодным при выраженной извитости коронарных артерий: продвижение инвазивного катетера по извитости представляет достаточно большую механическую трудность, причем погрешность измерения уже после второго последовательного извитого участка за счет турбулентности становится крайне высокой.

Нами использована формула зависимости объемного расхода от перепада давления Δp в изогнутой трубке, предложенная в работе Арет В. А. [5]:

$$Q = \frac{n\pi R}{3n + 1} \left(\frac{R\Delta p}{2Lk} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (10),$$

где R – радиус кривизны трубки, L – ее длина, n – индекс течения, а k – коэффициент консистенции. Из этой формулы следует, что снижение перепада давления на 25 % в изогнутой трубке ($\Delta p \rightarrow 0,75 \Delta p$) до гемодинамически значимого значения (по данным FFR) обуславливает снижение объемного расхода кровотока Q на 40 %:

$$E_{cr}^h = \frac{Q|_{\Delta p} - Q|_{0,75\Delta p}}{Q|_{\Delta p}} \times 100 \% = [1 - (0,75)^{\frac{1}{n}}] \times 100 \% = 40,247 \% \approx 40 \%.$$

Таким образом, непосредственная потеря объемного расхода кровотока на 56,41 % у пациентки И. является гемодинамически значимой ($E_Q > 40 \%$), что позволяет сделать вывод в данном конкретном случае о самостоятельном влиянии выраженной извитости сосуда на локальное ограничение коронарного резерва по сравнению с прямым участком артерии при прочих равных условиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведен сравнительный анализ средних относительных потерь скорости и объемного расхода коронарного кровотока в зависимости от количества витков (таблица 2). Усредненные показатели составили соответственно $46,18 \pm 1,06 \%$ и $48,01 \pm 1,09 \%$, а $E_Q > 40 \%$ прослеживалась на отрезках коронарной артерии с 5 витками, там средний показатель составил $44,32 \pm 2,47 \%$. Это дополнительно доказало самостоятельную гемодинамическую значимость извитости коронарных артерий в локальном ограничении коронарного резерва у пациентов с ИБС и коронарным синдромом Х.

Количество гемодинамически значимых извитостей в зависимости от числа витков в отрезке коронарной артерии распределилось следующим образом. Уже при 5 витках коронарной артерии гемодинамически значимая относительная потеря объемного расхода выявлена более чем у половины пациентов (57,1 %), а общее количество пациентов составило 71,4 %. При этом извитость на участках коронарных артерий из 8 и 9 витков была гемодинамически значимой во всех 100 % исследуемых клинических случаев.

Далее нами была предпринята попытка определения корреляционной зависимости между количеством витков в коронарной артерии с ВИКА и отно-

сительной потерей объемного расхода кровотока, а также проверки гипотезы о равенстве нулю генерального коэффициента корреляции при конкурирующей гипотезе $H_1: r \neq 0$, при уровне значимости 0,01. Для этого построено корреляционную таблицу (таблица 3), где по оси абсцисс отмечено количество витков в вычисляемом отрезке коронарной артерии, а по оси ординат – величины рассчитанной относительной потери объемного расхода.

Таблица 2

Усредненные относительная потеря скорости и объемного расхода кровотока, количество гемодинамически значимых ($E_0 \geq 0,4$) и незначимых ($E_0 < 0,4$) извитостей коронарных артерий в зависимости от числа витков изучаемого отрезка извитой коронарной артерии у пациентов с ИБС и коронарным синдромом X

Показатель	Количество витков							Всего
	3	4	5	6	7	8	9	
Всего пациентов с ВИКА ПМЖВ ЛКА, n	4	18	21	23	21	16	9	112
Средняя относительная потеря скорости (E_v) в извитой артерии, %	28,69 ± 1,79	33,78 ± 0,92	42,52 ± 2,33	46,24 ± 1,67	50,63 ± 1,62	55,48 ± 2,04	60,30 ± 2,39	46,18 ± 1,06
Средняя относительная потеря объемного расхода (E_Q) в извитой артерии, %	31,73 ± 3,16	34,69 ± 1,30	44,32 ± 2,47	47,79 ± 1,52	53,08 ± 1,63	57,59 ± 1,62	62,20 ± 3,30	48,01 ± 1,09
Количество пациентов с $E_0 < 0,4$ (гемодинамически незначимая извитость), n (%)	4 (100)	15 (88,3)	9 (42,9)	3 (13,0)	1 (4,8)	0	0	32 (28,6)
Количество пациентов с $E_0 \geq 0,4$ (гемодинамически значимая извитость), n (%)	0	3 (16,7)	12 (57,1)	20 (87,0)	20 (95,2)	16 (100)	9 (100)	80 (71,4)

Таблица 3

Корреляционная таблица зависимости количества витков в вычисляемом отрезке коронарной артерии (n) и величины относительной потери объемного расхода (E_Q) у пациентов с ИБС и коронарным синдромом X

E_Q (%) / n	3	4	5	6	7	8	9	Всего
20–30	1	3	2	0	0	0	0	6
30–40	3	12	7	3	1	0	0	26
40–50	0	3	4	10	5	1	1	24
50–60	0	0	8	10	11	10	2	41
60–70	0	0	0	0	4	4	3	11
70–80	0	0	0	0	0	1	3	4
Всего	4	18	21	23	21	16	9	112

Из исходных данных получены необходимые числовые характеристики: ковариация $Cov(x, y) = 14,41$, коэффициент корреляции $r_{xy} = Cov(x, y) / (\sigma_x \sigma_y) = 0,75$, ($t_{крит} = 2,467$).

Полученное уравнение линий регрессии $y(x)$:

$$y_x = 0,75 \frac{x - 6,098}{1,62} 11,91 + 48,304 = 5,49x + 14,83.$$

Полученное уравнение линий регрессии $x(y)$:

$$x_y = 0,75 \frac{y - 48,304}{11,91} 1,62 + 6,098 = 0,1 y + 1,19.$$

Итак, в эксперименте доказано наличие тесной связи между степенью выраженности ВИКА по данным КАГ и относительной потерей объема кровотока, определяемого при помощи разработанной физико-математической модели (коэффициент корреляции равен 0,75). А при помощи уравнения линий регрессии $x(y)$ мы также можем, подставляя значение $E_0 = 40\%$, определить количество витков, которые уже будут обладать самостоятельной гемодинамической значимостью: $x_y = 0,1 \times y + 1,19 = 0,1 \times 40 + 1,19 = 5,19 \approx 5$.

Так, отрезок коронарной артерии с пятью и более витками, как правило, обладает самостоятельной гемодинамической значимостью в ограничении локального коронарного резерва у пациентов с ИБС и коронарным синдромом X.

ВЫВОДЫ

1. Предложенная физико-математическая модель позволяет по данным коронарной ангиографии определить относительную потерю скорости и объемного расхода кровотока в извитой коронарной артерии по сравнению с ее прямым участком при прочих равных условиях.

2. При помощи предложенной физико-математической модели определено, что у 71,4 % пациентов с ИБС, коронарным синдромом X и выраженной извитостью коронарных артерий на извитом участке выявляется относительная потеря объемного расхода кровотока более чем на 40 % по сравнению с прямым участком артерии при прочих равных условиях, что доказывает самостоятельную гемодинамическую значимость извитости сосуда в ограничении локального коронарного резерва.

3. Проведенный корреляционный анализ доказал достоверную (с уровнем значимости $\alpha = 0,01$) тесную связь между относительной потерей объема кровотока в извитом участке сосуда и количеством витков на изучаемом отрезке коронарной артерии (коэффициент корреляции равен 0,75).

4. Необходимо дальнейшее изучение полученных расчетов: сопоставление гемодинамической значимости извитости коронарных артерий и имеющейся клинической картины ИБС у пациентов с коронарным синдромом X и ВИКА – тем самым будет определена клиническая значимость предложенной математической модели и выявлена зависимость клинической картины и объективных признаков ишемии миокарда от выраженности извитости коронарных артерий.

В эксперименте доказано наличие тесной связи между степенью выраженности ВИКА по данным КАГ и относительной потерей объема кровотока, определяемого при помощи разработанной физико-математической модели (коэффициент корреляции равен 0,75).

Effect of the coronary artery tortuosity on the volumetric blood loss in patients with coronary X syndrome: experimental data

Sebov D. M.

Odessa National Medical University, Odessa, Ukraine

SUMMARY

Objective. The severe coronary tortuosity (SCT) studying by proper physic-mathematic model, the action of SCT on the local coronary reserve limitation.

Methods. The coronary angiography data of 148 patients with coronary artery disease (CAD), coronary X syndrome (CXS) and severe coronary tortuosity were examined. The SCT in LAD were determined in 112 cases.

Results. Calculation of the relative loss of volume blood flow (E_0) in the tortuous coronary artery segment compared with the straight segment by angiographic data, ceteris paribus, was done on the basis of proposed physico-mathematical model. In 71.4 % patients demonstrate independent hemodynamic significance ($E_0 > 40\%$) of coronary tortuosity in the imitation of local coronary flow reserve in patients with CAD and CXS.

Conclusion. Correlation analysis showed a close relationship between E_0 in the tortuous coronary artery segment and the number of turns (correlation coefficient = 0.75; $\alpha = 0.01$), which proves the action of SCT on the local coronary reserve limitation.

Keywords: coronary artery disease, coronary X syndrome, severe coronary tortuosity.

ЛИТЕРАТУРА

1. Crea F., Lanza G. A. (2004) Angina pectoris and normal coronary arteries: cardiac syndrome X. *Heart*, vol. 90, pp. 457–463.
2. Groves S. S., Jain A. C., Warden B. E., Gharib W., Beto R. J. 2nd. (2009) Severe coronary tortuosity and the relationship to significant coronary artery disease. *West Virginia Medical Journal*, vol. 105, no. 4, pp. 14–17.
3. Baim D. S. (2006) *Grossman's Cardiac Catheterization, Angiography and Intervention*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 807 p.
4. Pijls N. H., De Bruyne B., Peels K., Van Der Voort P. H., Bonnier H. J., Bartunek J., Koolen J. J. (2006) Measurement of fractional flow reserve to assess the functional severity of coronary-artery stenoses. *New England Journal of Medicine*, vol. 334, no. 26, pp. 1703–1708.
5. Арет В. А. Влияние закругления трубы на движение неньютоновской жидкости / В. А. Арет, А. С., Щербаков, А. В. Кузнецов // Процессы и аппараты пищевых производств. – 2012. – № 2. – С. 26–32.

REFERENCES

1. Crea F., Lanza G. A. (2004) Angina pectoris and normal coronary arteries: cardiac syndrome X. *Heart*, vol. 90, pp. 457–463.
2. Groves S. S., Jain A. C., Warden B. E., Gharib W., Beto R. J. 2nd. (2009) Severe coronary tortuosity and the relationship to significant coronary artery disease. *West Virginia Medical Journal*, vol. 105, no. 4, pp. 14–17.
3. Baim D. S. (2006) *Grossman's Cardiac Catheterization, Angiography and Intervention*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 807 p.
4. Pijls N. H., De Bruyne B., Peels K., Van Der Voort P. H., Bonnier H. J., Bartunek J., Koolen J. J. (2006) Measurement of fractional flow reserve to assess the functional severity of coronary-artery stenoses. *New England Journal of Medicine*, vol. 334, no. 26, pp. 1703–1708.
5. Aret V. A., Scherbakov A. S., Kuznetsov A. V. (2012) Vliyanie zakrugleniya truby na dvizhenie nenyutonovskoy zhidkosti [Influence of the pipe curvature on the movement of non-newtonian fluids]. *Protsessy i apparaty pischevykh proizvodstv*, vol. 2, pp. 26–32. (in Russ.)

Рецензент: Поляков А. Е., д-р мед. наук, профессор, заведующий кафедры внутренней медицины № 3 Одесского национального медицинского университета

Статья поступила в редакцию 21.06.2015 г.