ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ПРЕДПОЛАГАЕМОЙ РЕВАСКУЛЯРИЗАЦИИ СЕРДЦА У БОЛЬНЫХ С ИБС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КРОВОТОКА В ОБЛАСТИ СТЕНОЗА

Е.В. Фомичев – сердечно-сосудистый хирург, ординатор отд.[1]
Г.В. Чудинов – д-р мед. наук, зав. отд.[2]
А.В.Поддубный – к.м.н., сердечно-сосудистый хирург, зав. отд.[1]

[1] ГУ здравоохранения Ростовская областная клиническая больница,

[2] Центр кардиологии и сердечно-сосудистой хирургии Ростов-на-Дону

Современные методы реваскуляризации миокарда (РМ) у больных с ишемической болезнью сердца (ИБС) позволяют достоверно улучшить качество жизни и прогноз заболевания у пациентов с многососудистым поражением коронарного русла (КР).

Цель. А всем ли больным необходимо проведение полной реваскуляризации миокарда? Ведь имеет место множество факторов, препятствующих ее достижению. Выполнение адекватной неполной РМ должно иметь под собой доказательную базу с учетом особенности гемодинамики коронарных сосудов.

Материалы и методы. В работе представлены способы оценки коронарного кровотока с использованием математической модели, позволяющей вычислить потерю расхода крови. Она дает возможность количественно оценить изменение потока крови при наличии стенозов в КР.

Выводы. Полученные данные позволяют сделать вывод о необходимости выполнения пациенту полного либо адекватного аортокоронарного шунтирования.

Ключевые слова: *полная реваскуляризация миокарда, математическое моделирование, оценка коронарного кровотока, адекватное аортокоронарное шунтирование.*

Введение

Совершенствование хирургической техники, появление эндоваскулярных методов лечения, адекватная антиагрегантная и гиполипидемическая терапия привели к тому, что операции хирургической реваскуляризации миокарда (РМ) получили широкое применение в клинической практике большинства стран.

Проведенные ранее исследования показали достоверное улучшение качества жизни и прогноза заболевания у больных с многососудистым поражением коронарного русла (КР) после полной реваскуляризации миокарда (ПРМ) с помощью аортокоронарного шунтирования (АКШ) [1].

Статья поступила в редакцию в декабре 2009 г.

В то же время встает вопрос: всем ли больным необходимо ее проведение? Есть множество факторов, снижающих частоту достижения ПРМ. Это морфология атеросклеротической бляшки, дистальный тип поражения КР, сниженная функциональная способность миокарда левого желудочка, тяжесть состояния больных (нестабильная стенокардия, острый инфаркт миокарда – ОИМ), тяжелые сопутствующие заболевания [2].

Объективно оценить возможность выполнения неполной, но адекватной для больного реваскуляризации миокарда (НРМ), а также прогнозировать состояние пациента в отдаленном послеоперационном периоде можно только с учетом понимания процессов реологии в КР на основании количественной оценки с использованием законов гидродинамики.

В последнее время в биологии и медицине ярко выразилась тенденция к применению точных математических методов и средств вычислительной техники для исследования процессов, происходящих в организме человека и, в частности, в его основной физиологической системе – кровообращения.

Материалы и методы

В исследование участвовали 182 пациента с различными формами ИБС, перенесших ПРМ в 2005–2008 гг. на базе ЦКССХ РОКБ Ростова-на-Дону.

Постановка диагноза «ИБС» основывалась на клинико-анамнестических данных, показателях ЭКГ в покое и полученных при велоэргометрии, результатах суточного мониторирования ЭКГ, данных сцинтиграфии миокарда, Эхо-кардиостимуляции (Эхо-КС), а также на лабораторных методах исследования.

Показания к выполнению селективной коронароангиографии – наличие стенокардии, положительный результат нагрузочных проб, ишемические признаки, выявленные при Эхо-КС, холтеровском мониторировании, чреспищеводном электрофизиологическом исследовании, и другие клинико-инструментальные данные, свидетельствующие о нарушении коронарного кровоснабжения сердца.

Были образованы 2 группы больных.

В 1-ю (98 пациентов) включили тех, кому была выполнена ПРМ. Таковой считалась РМ в случае шунтирования или стентирования всех пораженных артерий диаметром более 1,5 мм и сужением просвета сосуда более 50%.

Во 2-ю (84 пациента) группу вошли пациенты, которым была выполнена НРМ. Ее причины – диффузное поражение коронарных артерий с неудовлетворительным состоянием дистального русла, интрамиокардиальное расположение артерий, отсутствие жизнеспособного миокарда в бассейне пораженной артерии, нестабильная стенокардия, ОИМ, тяжелые сопутствующие заболевания головного мозга, почек, а также высокая степень анестезиологического риска. 2-ю группу разделили на 2 подгруппы. В 1-ю (43 пациента) вошли те, кому была выполнена НРМ с положительным результатом. Во 2-ю (41 больной) подгруппу – пациенты, которым была выполнена НРМ без положительного результата в ближайшем и отдаленном послеоперационном периоде. Отрицательным считали отсутствие изменения функционального класса (ФК) стенокардии либо хронической сердечной недостаточности (ХСН).

Был проанализирован клинический статус больных на момент выполнения операций по восстановлению

Была выделена частота повреждения коронарных артерий в 1-й группе. У 59 (32,4%) пациентов отмечалось поражение ствола левой коронарной артерии (ЛКА), ПМЖВ пора-

Таблица 1.

Распределение ФК стенокардии в 1-й и 2-й группах

	ПРМ	НРМ
Стенокардия напряжения ФК I	2 (2%)	3 (3,6%)
Стенокардия напряжения ФК II	13 (13,3%)	11 (13,1%)
Стенокардия напряжения ФК III	42 (42,9%)	40 (47,6%)
Стенокардия напряжения ФК IV	41 (41,8%)	30 (35,7%)

Примечания: ФК – функциональный класс; ПРМ - полная реваскуляризация миокарда; неполная реваскуляризация миокарда

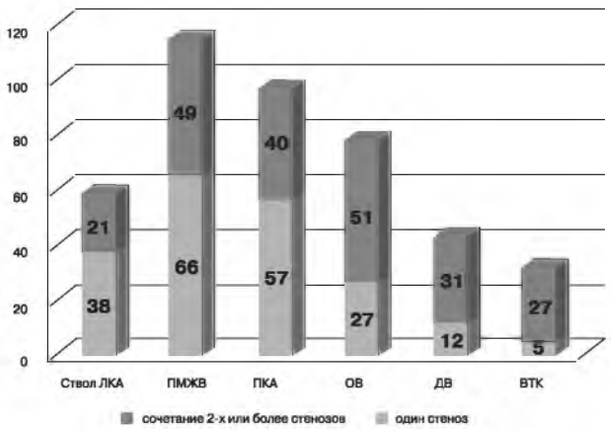

Рис. 1. *Исходные данные поражения коронарных артерий*

Примечания: ЛКА – левая коронарная артерия; ПМЖВ – передняя межжелудочковая ветвь; ПКА – правая коронарная артерия; ОВ – огибающая ветвь; ДВ – диагональная ветвь; ВТК – ветвь тупого края.

жена у 115 (63,2%) больных, правая коронарная артерия (ПКА) – у 97 (53,3%) пациентов, ОВ ЛКА – у 78 (42,9%) больных. Повреждение двух сосудов обнаружено у 62 (34%) больных, трех и более – у 31 (17%) пациента.

Вычисление потери расхода крови с использованием математического моделирования течения крови в кровеносном сосуде со стенозом

В исследованиях некоторых авторов [3–5] описано, что кровь в артериальном кровотоке ведет себя как ньютоновская жидкость, поэтому такие движения необходимо рассматривать, опираясь на линейные уравнения Навье – Стокса. На их базе с использованием численных методов в ряде работ [6, 7] было изучено движение крови в крупных сосудах.

Рассматривалось ламинарное и турбулентное движение крови в сужающемся коническом сосуде при наличии стенозов (рис. 2).

Рис. 2. *Схематическое изображение движения крови в сужающемся коническом сосуде при наличии стенозов*

В качестве исходной служила система уравнений Навье – Стокса в случае «тонкого слоя» для вязкой несжимаемой жидкости.

$$\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial v_z}{\partial r} = \frac{1}{j\mu}\frac{dP_i}{dz}$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0,$$

где V_z *– компонента вектора скорости,* j *– характеризует влияние турбулентности,* на который следует умножить вязкость, чтобы получить величину эффективной вязкости. Предполагается, что этот коэффициент можно выразить в виде такой функции числа Рейнольдса:

$$j = 0.0139 \cdot \mathrm{Re}^{0.657},$$

где $\mathrm{Re} = \frac{Ud}{v}$ *– число Рейнольдса в том диапазоне, который представляет интерес (Re > 2500) [8] (j = 1 в случае ламинарного движения крови в сосуде); U – характерная скорость сосуда; и – кинематический коэффициент вязкости.*

Построенная на базе уравнения Навье – Стокса математическая модель позволяет выявить зависимость профиля относительной скорости при различных значениях параметра, характеризующего максимальный радиус сечения в области стеноза.

Из этих зависимостей следует, что

- при увеличении степени стеноза происходит ускорение потока;
- с увеличением степени стеноза кривизна профиля скорости существенно увеличивается.

Были выведены зависимости безразмерного давления в каждой зоне (до стеноза, в области стеноза и после него) от отношения $\frac{A_1}{A_2}$ *(где* A_1 *– радиус артерии до стеноза,* A_2 *– радиус в зоне стеноза) и протяженности стеноза* z (рис. 3–5).

Особенно резкое уменьшение давления происходит при выходе из 1-й зоны, а во 2-й и 4-й наблюдается увеличение давления и ускорение скорости потока.

Построенная на безе уравнения Навье – Стокса математическая модель позволила провести численный анализ потери расхода крови в зоне стеноза ($\frac{Q_1}{Q_2}$) в зависимости от таких его параметров, как протяженность и диаметр.

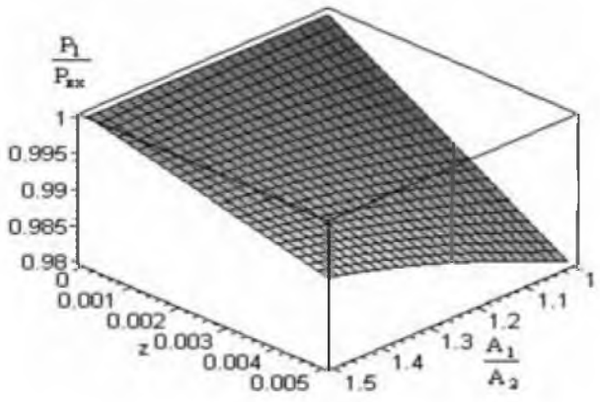

Рис. 3. *Зависимость безразмерного давления в 1-й зоне от отношения* $\frac{A_1}{A_2}$ *и протяженности стеноза z*

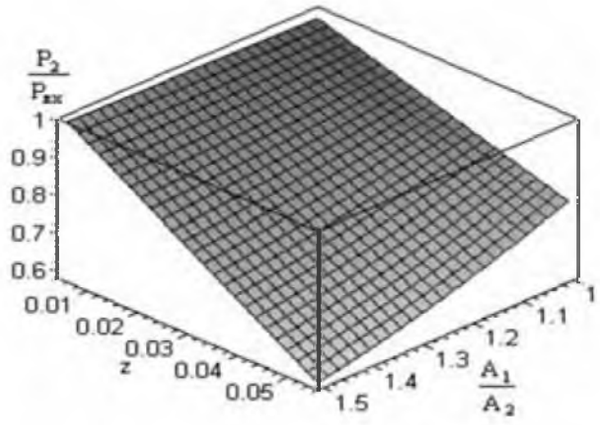

Рис. 4. *Зависимость безразмерного давления в 2-й зоне от отношения* $\frac{A_1}{A_2}$ *и протяженности стеноза z*

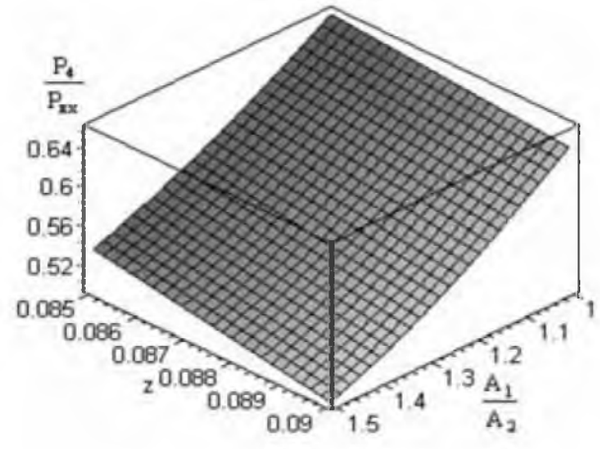

Рис. 5. *Зависимость безразмерного давления в 2-й зоне от отношения* $\frac{A_1}{A_2}$ *и протяженности стеноза z*

При этом Q_1 – величина расхода крови при отсутствии стеноза, Q_2 – расход крови при его наличии.

Был рассчитан численный анализ (табл. 2), где потери расхода обозначены в случае рассмотрения течения как

- ламинарного – $\frac{Q_1}{Q_2}$ л. п.,
- турбулентного – $\frac{Q_1}{Q_2}$ т. п.

A_1 – радиус артерии до стеноза,
A_2 – радиус стеноза,
I_1 – протяженность стеноза,
I –длина основной коронарной артерии,
a – коэффициент, характеризующий конусность сосуда.

Для определения изменения степени расхода крови в определенной зоне была использована такая методика.

При анализе коронарограммы ЛКА определяли суммарную долю общего просвета видимых сосудов, кровоснабжающих соответствующие сегменты сердца. Для этого измеряли диаметры всех сосудов и их ветвей второго и третьего порядка, затем вычисляя среднее значение. Полученный коэффициент обозначали как $\sum$ S 1A.

Измеряли диаметры всех остальных сосудов после стеноза, не кровоснабжающих данные сегменты, и вычисляли среднее значение, обозначив полученный коэффициент как $\sum$ S 1B (рис. 6).

На основании разработанной модели кровотока в стенозированном коронарном сосуде вычисляли коэффициент изменения расхода в системе ЛКА – $\frac{Q_1}{Q_2}$ *ЛКА*.

Коэффициент, показывающий, на сколько уменьшится расход крови ($K_{ЛКА}$) в необходимых для исследования сегментах (на коронарокардиограмме обозначено как зона А), вычисляли по формуле

$$K_{ЛКА} = \frac{Q_2}{Q_1} ЛКА \times \frac{\sum S_{1A}}{\sum S_{1A} + \sum S_{1B}}$$

Если данная артерия подвергалась шунтированию (стентированию, баллонной ангиопластике), считали, что $K_{ЛКА=1}$

Таблица 2.

Расход кровоснабжения миокарда в зависимости от соотношения величины просвета стеноза и коронарного сосуда, а также протяженности стеноза

$\frac{Q_1}{Q_2}$ л.п.	%	$\frac{A_1}{A_2}$	$\frac{Q_1}{Q_2}$ т.п.	%	I (см)	I_1 (мм)	α ($см^{-1}$)	$A_1 - A_2$ (м)
1 0,79 0,7125 0,55 0,4	100 79 71,2 55 40	1 1,14 1,2 1,3 1,5	1 0,794 0,714 0,5589 0,4016	100 79,4 71,4 55,89 40,16	15	5	0,008	0 0,005 0,007 0,01 0,013
1 0,794 0,719 0,558 0,401	100 79,4 71,9 55,8 40,1	1 1,14 1,2 1,3 1,5	1 0,7942 0,717 0.5581 0,4017	100 79,42 71,7 55,81 40,17	15	10	0,008	0 0,005 0,007 0,01 0,013
1 0,792 0,715 0,556 0,4	100 79,2 71,5 55,6 40	1 1,14 1,2 1,3 1,5	1 0,7944 0,7175 0,55798 0,4017	100 79,44 71,75 55,798 40,17	15	10	0,008	0 0,005 0,007 0,01 0,013
1 0,805 0,73 0,574 0,418	100 80,5 73 57,4 41,8	1 1,14 1,2 1,3 1,5	1 0,806 0,7316 0,575 0,4183	100 80,6 73,16 57,5 41,83	17,5	30	0,008	0 0,005 0,007 0,01 0,013

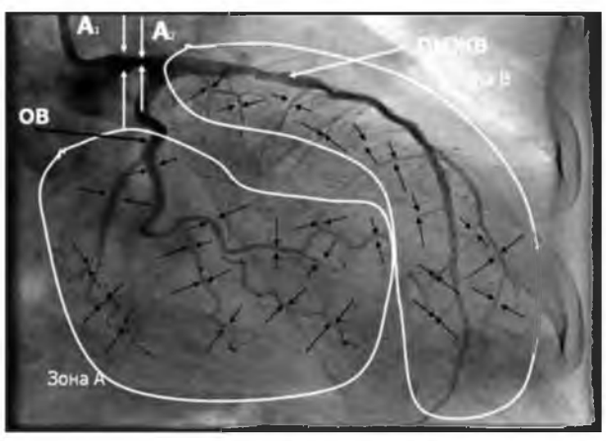

Рис. 6. *Анализ коронарограммы ЛКА*

Аналогично проводили анализ коронарограммы ПКА. При этом

$$K_{ПКА} = \frac{Q_2}{Q_1}ПКА \times \frac{\sum S_{2A}}{\sum S_{2A} + \sum S_{2C}}$$

Если ПКА подвергалась шунтированию (стентированию, баллонной ангиопластике), считали, что $K_{ПКА=1}$.

Общую степень потери расхода в необходимых сегментах вычисляли как сумму потерь расхода в системе ЛКА и ПКА.

Результаты

Были выполнены разнообразные виды РМ: АКШ с использованием аппарата искусственного кровообращения – 82 (45%) больным, АКШ beating heart – 31 (17%) пациенту, АКШ с применением параллельного искусственного кровообращения – 7 (4%) больным, стентирование коронарных артерий – 42 (23%) пациентам, маммаро-коронарное шунтирование – 14 (8%) больным, баллонная ангиопластика – 5 (3%) пациентам, На основе этих данных составлен график распределения изменений ФК стенокардии (рис. 7).

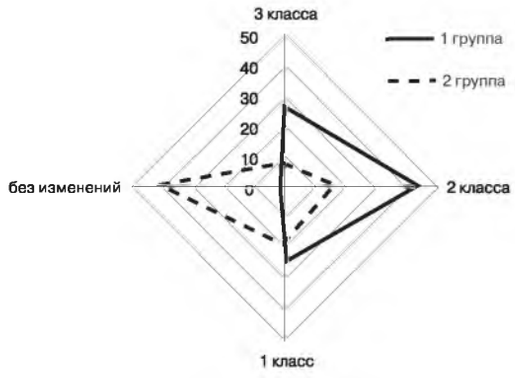

Рис. 7. Распределение изменения ФК стенокардии после реваскуляризации миокарда в рассматриваемых группах пациентов

Были проанализированы изменения ФК стенокардии в 1-й группе больных (табл. 3). Выявлено снижение на 3 класса – у 27 пациентов, на 2 класса – у 44 больных, на один – у 25 больных, без изменения класса – у 2 пациентов. Средняя величина коэффициента эффективности шунтирования (КЭШ) составила 1,699±0,47. Выявлено 96 (98%) пациентов с положительным результатом, КЭШ – 1,702±0,21.

Были проанализированы данные ФК стенокардии во 2-й группе больных (табл. 5), показавшие его изменение на 3 класса – у 8 пациентов, на 2 класса – у 16 пациентов, на один – у 21 больного, без изменения класса – у

Таблица 3.

Распределение изменения ФК стенокардии после реваскуляризации миокарда в рассматриваемых группах пациентов

Число больных	ФК до операции	ФК после операции	КЭШ
27	ФК IV	ФК I	1,83±0,31
29	ФК III	ФК I	1,71±0,29
13	ФК II	ФК I	1,58±0,48
2	ФК I	ФК I	1,53±0,23
15	ФК IV	ФК II	1,64±0,34
12	ФК III	ФК II	1,61±0,31

Примечания: ФК – функциональный класс; КЭШ – коэффициент эффективности шунтирования.

Таблица 4.

Сравнительный анализ ФК стенокардии до и после НРМ

Число большихФК	До операции	После операции	КЭШ
8	ФК IV	ФК I	1,69±0,32
9	ФК III	ФК I	1,58±0,59
4	ФК II	ФК I	1,41±0,38
7	ФК IV	ФК II	1,64±0,61
9	ФК III	ФК II	1,46±0,42
14	ФК II	ФК II	1,21±0,49
6	ФК IV	ФК III	1,47±0,53
17	ФК III	ФК III	1,19±0,51
10	ФК IV	ФК IV	1,25±0,24

Примечания: ФК – функциональный класс; КЭШ – коэффициент эффективности шунтирования.

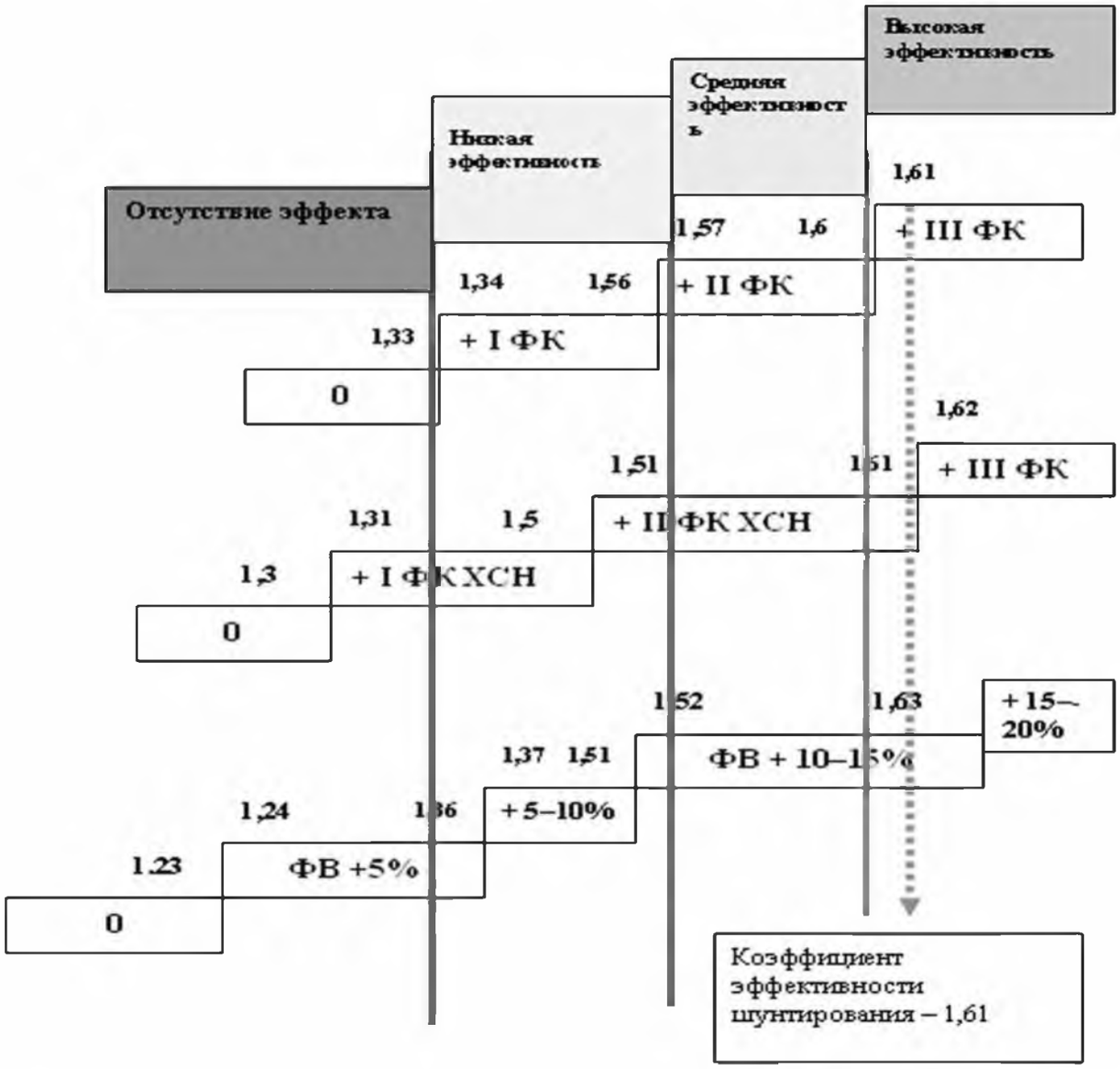

Рис. 8. *Комплексная оценка эффективности РМ в зависимости от КЭШ*

Примечания: КЭШ – коэффициент эффективности шунтирования; ФВ – фракция выброса; ФК ХСН – функциональный класс хронической сердечной недостаточности.

41 пациента. Средняя величина КЭШ – 1,39±0,41. Средняя величина КЭШ с положительным результатом – 1,56±0,34, а у тех, у кого не отмечено изменение класса после перенесенного вмешательства (41 пациент), – 1,21 ±0,29.

Схема позволяет предположить, как изменятся ФК стенокардии и хронической сердечной недостаточности (ХСН), а также фракция выброса левого желудочка (ФВЛЖ) в зависимости от коэффициента эффективности РМ. Так, при КЭШ 1,61 можно ожидать изменения ФК стенокардии на 3 класса, ФК ХСН – на 2 класса и ФВ – на 10–15%. В зависимости от того, в каких пределах находится КЭШ, можно предположить ожидаемый результат РМ.

Так, при его величине до 1,33 отмечен отрицательный итог РМ, от 1, 34 до 1,56 – ее низкая эффективность, от 1, 57 до 1,6 – средняя, а выше 1, 61 – высокая эффективность.

Таким образом, такое вычисление дает возможность прогнозировать результат РМ. При его величине выше 1,3 можно ожидать положительный эффект от оперативного вмешательства в случае НРМ.

Выводы

Полученные данные показывают, что математическая модель позволяет прогнозировать результат ПРМ. С учетом установленного КЭШ возможно определение оптимального объема РМ и уменьшение риска вмешательства.

Еще необходимы расширение и математическое описание таких факторов, как действие инерционных сил, пристеночный эффект, пульсирующее движение крови, эластичность стенки сосуда, а также других прогностических факторов успеха РМ, что позволит адаптировать метод для клинического использования. ■

Список литературы

1. Schaff H.V. et al. Survival and functional status after coronary artery bypass grafting. Results 10 to 12 years after surgery in 500 patients.
2. Circulation. 1983; 68: 11–200.
   Archer R., Ott D.A. Parravinici R. Coronary artery revascularisation without cardiopulmonary bypass. *Tex. Heart. Ins. J.* 1984; 11:
3. 5257.
   Каро К. и др. Механика кровообращения.
4. М.: «Мир». 1981; 179–187.
   Кантор Б.Я., Кунделев А.Ю. Моделирование периодического течения вязкой жидкости в толстостенном сосуде. Проблемы машиностроения. 1998; 1 (1): 11–17.
5. Cavalcanti S. Hemodynamics of an artery with midl stenosis. *J. Biomech.* 1995; 28 (4): 387–399.
6. Pedley T.J. The fluid mechanics of large blood vessels. London: Cambridge University Press. 1980; 540.
7. Stergiopulos N., Meister J.-J., Westerhof N. Simple and accurate way for estimating total and segmental arteria compliance.The pulse pressure method. *Ann. Biomed. Eng.* 1994; 22: 369–375.
8 Wilcock D.F. Designing Turbulent Thrust Bearings For Reduced Power Loss. Proceedings of Leeds-Lyons Symposium. Sept. 1975.

REGIONAL FLOW MATHEMATICAL MODELING FOR ASSESSING REQUIREMENTS OF DIRECT CORONARY REVASCULARIZATION

E.V. Fomichov, G,V, Chudinov, A.V. Poddubnyj

Contemporary methods of myocardial revascularization allow improving survival and quality of life in patients with multivessel disease. At the same time, there is still no satisfactory answer where and when one should perform complete myocardial revascularization. The latter is often a difficult task, and we consider well-reasoned incomplete adequate revascularization to be a valid alternative.
This study presents several methods of coronary flow assessment where regional ischemic deficiency is calculated in a mathematical model, evaluating thereby hemodynamic significance of coronary stenoses. Decision of complete or adequate incomplete revascularization can be rooted in these data.
Key words: *adequate myocardial revascularization, complete revascularization, mathematical modeling, coronary flow assessment.*

Адрес для корреспонденции:
Фомичев Евгений Викторович
Ростовская областная клиническая больница
344085 Ростов-на-Дону, Благодатная, 170
Тел.: (863) 297-02-65), (863) 253-56-69
Моб. 8-988-575-80-55, 8-918-557-01-87
e-mail: *Phomichev@yandex.ru*