

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ФЛОУМЕТРИИ ДЛЯ ИНТРАОПЕРАЦИОННОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОРОНАРНОГО ШУНТИРОВАНИЯ

Шевченко Ю.Л.¹, Zaichuk R.², Борщев Г.Г.*¹,
Землянов А.В.¹, Ульбашев Д.С.¹

DOI: 10.25881/BPNMSC.2019.74.65.020

¹ Клиника грудной и сердечно-сосудистой хирургии им. Св. Георгия,
ФГБУ «Национальный медико-хирургический Центр им. Н.И. Пирогова»
Минздрава России, Москва

² Rush University Medical Center, Chicago, IL, USA

Резюме. Качественная и количественная оценка функционирования шунтов во время операции коронарного шунтирования способна дать дополнительные данные и предупредить развитие осложнений. Рассмотрены основные виды измерения скорости кровотока – методы лазерной и ультразвуковой флоуметрии. Приведены измеряемые показатели, дана их характеристика и необходимые пороговые значения для оценки эффективности коронарного шунтирования. Показано, что TTFM является безопасным и эффективным методом, который дает важную интраоперационную информацию о состоянии и функционировании каждого отдельного трансплантата.

Ключевые слова: коронарное шунтирование; контроль качества; скорость потока крови по шунтам.

Введение

В настоящее время одним из самых распространенных кардиохирургических вмешательств является коронарное шунтирование (КШ), важность которого при лечении больных ишемической болезнью сердца (ИБС) не вызывает сомнений. Главной задачей этой операции является эффективная реваскуляризация миокарда. Ближайшие и отдаленные результаты КШ во многом зависят от проходимости и функциональной состоятельности сформированных шунтов [1; 2].

По данным литературы наилучшую проходимость в отдаленном периоде имеют аутоартериальные шунты, так как в меньшей степени подвержены дегенеративному и атеросклеротическому изменениям [3; 4]. Ресурс жизнеспособности аутовенозных шунтов ограничен: так, в 1-й год после КШ наблюдается окклюзия 15–20% венозных шунтов, а в каждый последующий год дополнительно закрываются от 1 до 4% шунтов [5].

Количественным показателем адекватности КШ является оценка характеристик кровотока по коронарным шунтам во время операции и в ближайшем послеоперационном периоде. Наиболее надежным методом, позволяющим судить о состоянии кондуитов, является рентгенконтрастная ангио-шунтография. Однако, несмотря на высокую достоверность результатов, она не находит широкого применения из-за инвазивного характера, высокой стоимости, технической сложности

TRANSIT TIME FLOWMETRY FOR INTRAOPERATIVE BYPASS GRAFT FLOW MEASUREMENT

Shevchenko Yu.L.¹, Zaichuk R.², Borshchev G.G.*¹, Zemlyanov A.V.¹, Ulbashev D.S.¹

¹ Pirogov National Medical and Surgical Center, Clinic of Thoracic and Cardiovascular Surgery St. George's, Moscow

² Rush University Medical Center, Chicago, IL, USA

Abstract. Qualitative and quantitative control of the intraoperative graft evaluation in coronary artery bypass graft (CABG) surgery can provide additional data and prevent the development of complications. The main types of measurement of blood flow – laser and TTFM. The measured parameters, their characteristics and the necessary threshold values for assessing the effectiveness of coronary artery bypass grafting are given. TTFM is safe and effective method that provides important intraoperative information on the condition and functioning of each individual graft.

Keywords: coronary surgery; Quality control; Transit time flow measurement.

и наличия лучевой нагрузки, кроме того, применение ангио-шунтографии сопряжено с возможностью развития нежелательных побочных реакции и осложнений.

Прогрессирующее увеличение количества операций прямой реваскуляризации миокарда при лечении больных ИБС диктует необходимость апробации и совершенствования методов инвазивной оценки проходимости коронарных шунтов, которые бы не уступали в эффективности рентгенконтрастной шунтографии, но являлись бы безопасными, легко воспроизводимыми и доступными широкому кругу врачей.

Наиболее удобным способом оценки коронарного кровотока является флоуметрия, которая считается инвазивным методом, позволяющим оценить скорость потока крови по шунтам (Transit-time flow measurement – TTFM) и его эффективность, что, несомненно, помогает кардиохирургу избежать технических ошибок и послеоперационных осложнений.

Флоуметрия: история развития, виды, принцип методики

Попытки оценить кровоток по шунтам интраоперационно во время хирургической реваскуляризации миокарда предпринимались хирургами практически сразу же после широкого внедрения КШ в клиническую практику. Первые работы по определению проходимости шунтов были выполнены уже в 70–80 годах прошлого века [6]. Эволюция метода прошла путь от

* e-mail: glebcenter@mail.ru

использования обычных ультразвуковых (УЗ) аппаратов для общеклинической практики к разработке узкоспециализированных систем, позволяющих дать всестороннюю оценку и характеристику параметрам объемного кровотока. Существуют две разновидности флоуметрии, применяемых в сердечно-сосудистой хирургии: лазерная и ультразвуковая. Данные методы оценки основаны на определении времени транзитного кровотока через шунт [7]. Согласно Рекомендациям 2014 г. Европейского общества кардиологов (ESC) и Европейской ассоциации кардиоторакальных хирургов (EACTS) (2014 ESC/EACTS Guidelines on myocardial revascularization), следует рутинно применять интраоперационное измерение объемного кровотока для подтверждения или исключения технических проблем в графтах (класс рекомендаций: IIa, уровень доказательности: C) [8].

Метод лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) основывается на определении перфузии ткани кровью путём измерения доплеровского сдвига частот, возникающего при зондировании ткани лазерным излучением (гелий-неоновым, $\lambda = 632,8$ нм), с последующей регистрацией излучения, отражённого от подвижных и неподвижных компонентов ткани (Рис. 1) [9].

Лазерная флоуметрия используется для оценки состояния кровотока в мельчайших сосудах системы микроциркуляции: артериолы, кровеносные, лимфатические капилляры, венулы, а также интерстициальное пространство [10; 11]. Метод лазерной флоуметрии не нашел широкого применения в коронарной хирургии из-за несовершенства техники и больших затрат времени на одно измерение (от 20–30 мин.).

Метод УЗ-флоуметрии применяется для оценки скорости, а также свойств потока крови по шунтам. Используется зонд подачи ультразвукового сигнала, который содержит в себе два датчика и имеет П-образную форму, что позволяет полностью фиксировать перпендикуляр трансплантата. Импульсные ультразвуковые сигналы передаются от датчиков на входе и выходе по направлению тока крови через рефлектор (Рис. 2). Время, необходимое для прохождения ультразвуковой волны от одного преобразователя к другому (время прохождения), определяется расходомером, обеспечивающим точное измерение объема потока.

Основные измеряемые показатели и их характеристики

Для полноценной оценки кровотока оцениваются основные переменные: средняя объемная скорость кровотока (Q_{mean} или MGF), индекс пульсации (PI) и процент диастолического объемного наполнения (DF).

MGF оценивается реже остальных показателей, так как ее величина не обязательно является хорошим критерием качества анастомоза, и ее данные в значительной степени зависят от нативной коронарной артерии. MGF измеряют в мл/мин и изображают в виде кривой потока, которая отображает систолическое и диастолическое

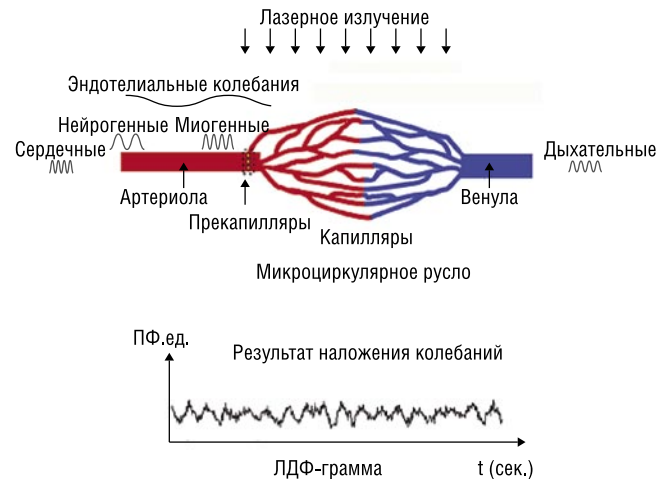


Рис. 1. Принцип лазерной флоуметрии [12].

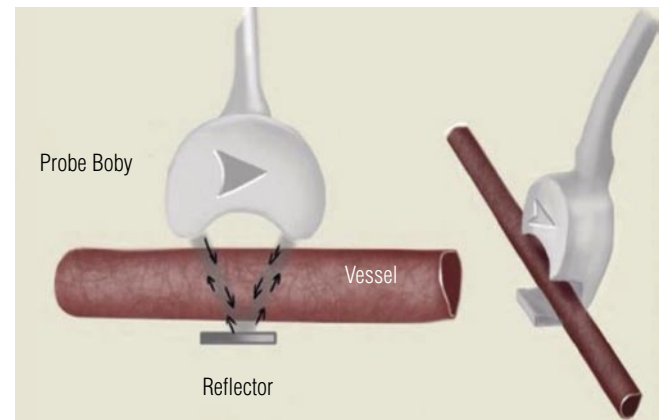


Рис. 2. Принцип УЗ-флоуметрии. УЗ-волны распространяются от входного датчика, проходят через ток крови, отражаются от рефлектора и достигают выходного датчика [13].

наполнение трансплантата через цветовое кодирование (систолическое: светло-красное, диастолическое: светло-синее) при взаимодействии с электрокардиографом. MGF зависит от многих переменных, включая: вязкость крови, размер и качество трансплантата, сопротивление в трансплантате, размер нативной коронарной артерии, качество оттока русла, спазм в артериальных трансплантатах и качество анастомоза [14].

PI является эффективным показателем потока по шунту и, следовательно, качества анастомоза. Рассчитывается по следующей формуле:

$$PI = \frac{\max \text{ flow} - \min \text{ flow}}{\text{mean flow}}$$

где: max flow – максимальная скорость потока, min flow – минимальная скорость потока, mean flow – средняя скорость потока.

В идеале значение PI должно быть между 1 и 3. Возможность технической ошибки в формировании анастомоза увеличивается при более высоких значениях PI [15]. Поток не может рассматриваться в качестве независимой переменной. PI, выраженный в абсолютном числе, представляет собой оценку сопротивления потоку в трансплантате и считается хорошим показателем структуры потока. Любой фактор, который увеличивает сопротивление потоку, включая стеноз трансплантата, дистальное атеросклеротическое изменение коронарной артерии или плохой поток в микроциркуляторном русле, будет влиять на PI.

DF является показателем хорошего антеградного кровотока во время диастолы для нормально функционирующего анастомоза. Этот показатель оценивает возможный небольшой ретроградный поток крови по шунту во время систолы (Saatvedt, et al.). Он выражает процент кровотока, направленного назад через место анастомоза по сравнению с общим прямым потоком в течение 1 сердечного цикла.

$$DF = \frac{Q_{diastole}}{Q_{systole} + Q_{diastole}}$$

где: Qdiastole – объемная скорость кровотока в диастолу, Qsystole – объемная скорость кровотока в систолу.

DF должен быть выше систолического потока, в особенности для бассейна левой коронарной артерии из-за более высоких градиентов трансмиокардиального давления левого желудочка. Измерение DF может быть получено только при подключении устройства TTFM к электрокардиографу. Если стеноз нативной коронарной артерии незначителен, то кровотока в трансплантате не будет превышать кровотока в шунтируемой зоне, и, таким образом, возникнет обратный поток во время систолы (конкурентный поток) [16]. DF выражает долю диастолического потока трансплантата в течение всего потока по трансплантату. Общий поток в диастолу по шунту должен превышать 50% MGF. Следует отметить, что измерения могут варьироваться в пределах отдельного трансплантата.

Существуют и другие менее используемые показатели, позволяющие оценить несостоятельность трансплантата: «максимальное ускорение потока» [17], «коэффициент недостаточности» (IR – процент от обратного потока крови) [18] «систолический обратный поток», который соответствует проценту площади кривой потока ниже нулевой линии (Рис. 3) [16].

Данные рандомизированных исследований

В настоящее время, несмотря на большое количество исследований, связанных с определением кровотока по шунтам во время операции, остаются вопросы оптимальности показателей проходимости трансплантатов.

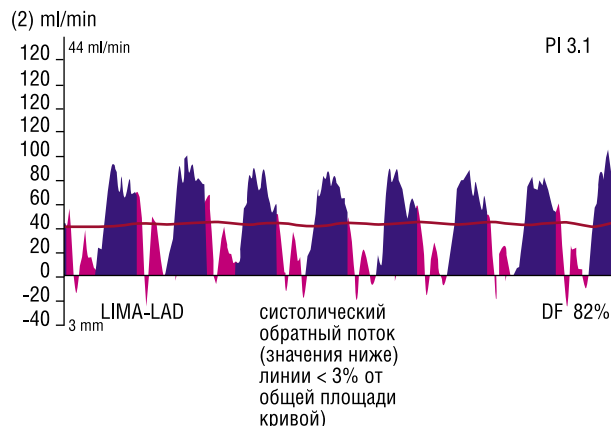


Рис. 3. Пример нормального уровня систолического обратного потока [19].

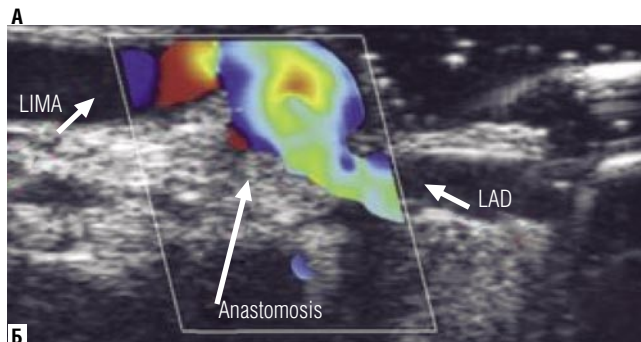
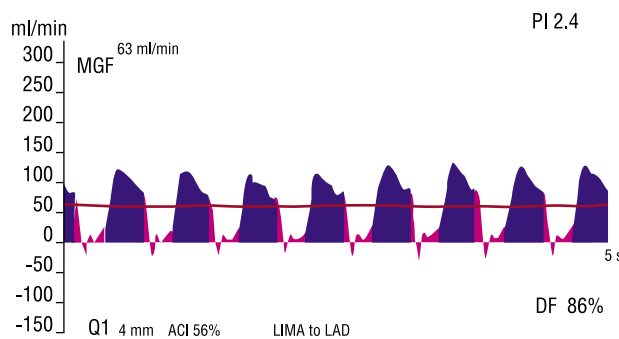


Рис. 4. Пример (А) уз-флоуметрии (TTFM) и (Б) ультразвукового (УЗИ) изображения для анастомоза лВГА (LIMA) к ПМЖВ (LAD) [13]. А – основные переменные TTFM представлены вместе с графическим представлением потока трансплантата. Разница в цвете различает диастолическую (синюю) и систолическую (красную) фазы. Информация о проценте диастолического потока (DF) также доступна при подключении индикатора электрокардиографа. Б – визуализация УЗИ дополняет функциональную оценку, проводимую при TTFM, позволяя четко визуализировать кровотока через анастомоз. Все измерения проводились с помощью устройства VeriQC (Medi-Stim AS, Осло, Норвегия) и регистрировались вне искусственного кровообращения. Индекс акустической связи (ACI) измеряет адекватность контакта зонда, цвет изменяется от зеленого к желтому и красному цвету по мере того как контакт ухудшается.

Согласно руководству по реваскуляризации миокарда Европейской Ассоциации кардио-торакальной хирургии (EACTS) и Европейскому обществу кардиологов (ESC) рекомендуемые значения среднего потока крови

по трансплантату (MGF) ≥ 20 мл/мин и индекса пульсации (PI) ≤ 5 являются признаком адекватного потока по шунту, но проведенные исследования позволяют сказать, что не все так однозначно и в некоторых случаях приходится использовать иные показатели и дополнительные параметры.

Особенно важно определение MGF при флоуметрии. Согласно исследованиям Lehnert оптимальные значения ≥ 20 мл/мин для трансплантатов ВГА и ≥ 40 мл/мин для аутовенозных шунтов [20]. При возрастании MGF на 1 мл/мин, риск несостоятельности сформированного шунта снижается на 2%. Другие исследования только подтверждают связь данных показателей с большей вероятностью положительного исхода [17]. Меньшие размеры коронарных артерий (диаметр $< 1,5$ мм) и более высокий риск недостаточности венозного трансплантата приводит к увеличению значения MGF ≥ 40 мл/мин по сравнению с аутоартериальным трансплантатом [21].

При оценке 204 трансплантатов у 75 последовательно выбранных пациентов лучшим предиктором ранней (< 6 месяцев) проходимости шунтов было значение PI меньше 3. Однако не было обнаружено статистически значимой корреляции между любой из переменных TTFM и соответствующими послеоперационными исходами, такими как инфаркт миокарда, инсульт или смерть [22; 23]. Наличие шунта с PI более 5, анастомоз которого не был исправлен интраоперационно, увеличивает риск внутрибольничных осложнений: продленной ИВЛ, повторной операции, послеоперационного коронарного вмешательства, периоперационного инфаркта миокарда и смерти [24; 18]. PI по данным многих исследований является важнейшим предиктором клинических исходов в краткосрочной перспективе. Однако мало информации о связи этих данных с отсроченными во времени результатами.

Более высокие показатели MGF и более низкие показатели PI являются важнейшими предикторами проходимости анастомоза с аутовенозным кондуитом [25; 26]. Это так же применимо и для аутоартериальных трансплантатов, но существует проблема в определении кровотока по ВГА при выделении ее «лоскутом» – необходима ее частичная «скелетизация» [27].

Показатель процента DF изолированно не может предсказать неудачу сформированного анастомоза, так как требуются значения совокупности показателей; однако есть данные о том, что уровень DF $> 50\%$ был оценен как один из критериев адекватного потока по шунту [28].

Существует прямая связь между увеличением обратного потока через трансплантаты и худшего исхода для сформированного анастомоза. Процент от ретроградного потока крови (систолический обратный поток, IR) $\geq 3\%$ является критерием неадекватности кровотока по кондуиту [16; 22].

Несомненно, что оценка скорости кровотока по шунтам является важным элементом для прогнозирова-

ния ранней несостоятельности трансплантата и среднесрочных результатов, что было доказано различными исследованиями [29; 30; 20].

Однако существуют и противоречащие данные о необходимости рутинного интраоперационного использования методов определения кровотока по кондуиту. С 2005 по 2008 г. при проведении исследования GRIP (The Graft Imaging to Improve Patency) в одной группе пациентов оценивали проходимость шунтов с использованием флоуметрии и индоцианиновой-зеленой ангиографии (IGA), в сравнении с контрольной группой без расчета скорости потока по шунту. Через год проводили контрольную ангиографию в двух группах. Исследование GRIP продемонстрировало, что выполнение интраоперационных измерений скорости кровотока по трансплантату безопасно и вполне выполнимо, однако рутинное их использование нецелесообразно, потому что статистически значимых различий между двумя группами через 1 год после оперативного вмешательства не было получено. Проведение оценки во время операции скорости потока по трансплантату, по мнению авторов, рационально только в тех случаях, когда есть клиническое подозрение на несостоятельность шунта или анастомоза [28].

Если существует подозрение на несостоятельность трансплантата, которая может возникнуть вследствие снижения исходного кровотока по шунту (сужение анастомоза, повреждение кондуита, конкурентное течение, недостаточный дистальный отток из-за уменьшения диаметра целевого сосуда и площади перфузии), использование Уз-флоуметрии во время операции помогает хирургу в выборе дальнейшей тактики, улучшает исход операции, предотвращает отдаленные нежелательные последствия (Рис. 5) [31; 32].

Выводы

Измерение скорости кровотока по шунту безопасно и выполнимо, а также дает важную и точную интраоперационную информацию о состоянии и функционировании каждого отдельного трансплантата. Это позволяет решить такие технические проблемы, как перегнутые или стенозированные трансплантаты, несостоятельные анастомозы, наиболее точно выявляет нарушения кровотока по шунту. Меняя тактику операции, благодаря флоуметрии во время вмешательства, снижаются ранние послеоперационные осложнения, улучшаются исходы. Особенно важно проведение интраоперационной оценки проходимости трансплантата при подозрении на несостоятельность анастомоза или кондуита.

Ограничением методики TTFM является высокая стоимость оборудования, отсутствие стандартных кривых и значений скорости потока для различных типов трансплантатов и реваскуляризированных сосудов. Стандартизация результатов кровотока по шунту затруднена из-за большой биологической изменчивости среди

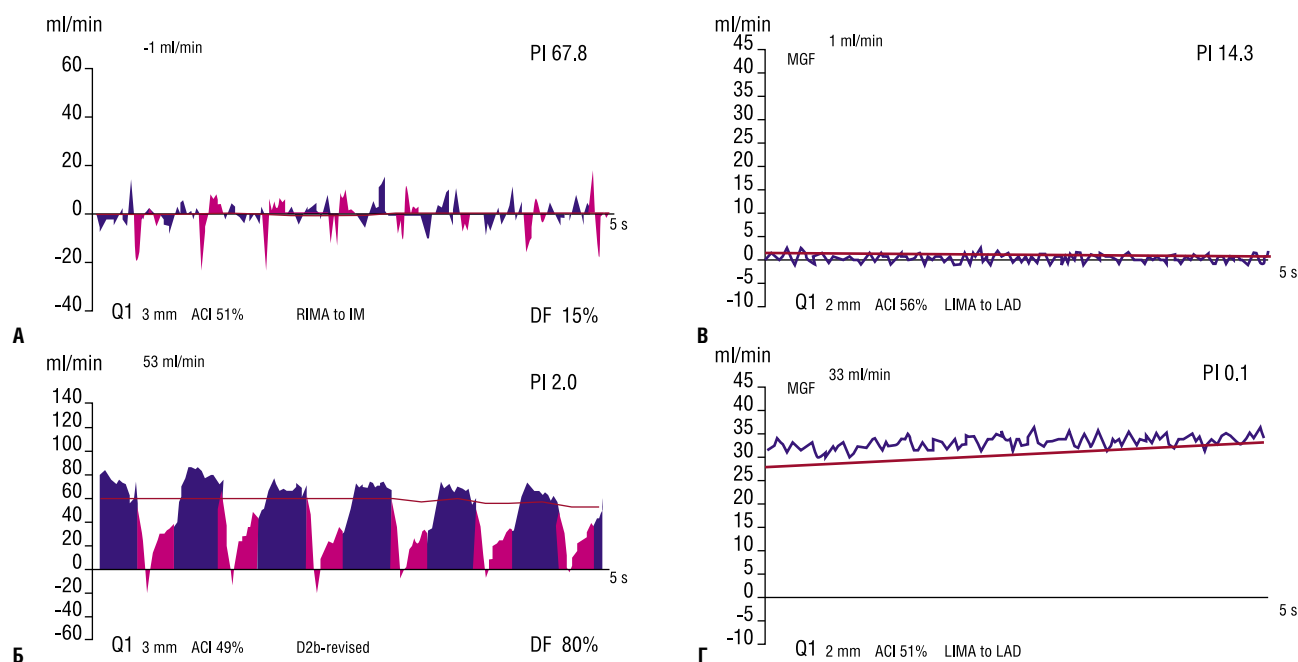


Рис. 5. Пример успешного применения УЗ-флоуметрии для принятия решения о повторном формировании анастомоза [13]. (А) и (Б) ТТФМ из анастомоза лВГА в ИМА, выполнено с искусственным кровообращением (ИК), А – изначальный поток. Б – после перешивания анастомоза. (В) и (Г) ТТФМ из анастомоза лВГА к ПМЖВ артерии. В – изначальный поток. Г – после перешивания анастомоза. Пересмотр трансплантата привел к значительному увеличению среднего потока трансплантата (MGF), связанного со снижением индекса пульсации (PI).

различных пациентов, а также внутри одного и того же пациента. Интерпретация кривых потока и параметров флоуметрии в значительной степени зависит от личного опыта хирурга. Возможность правильно оценивать значения увеличивается с приобретением клинического и экспериментального опыта.

Несмотря на то, что во многих исследованиях приведен опыт использования интраоперационной флоуметрии, показана связь параметров оценки с результатами операций, остается множество нерешенных вопросов, которые непременно должны стать предметом будущих многочисленных исследований.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов (The authors declare no conflict of interest).

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Ancalmo NB. Minimally invasive coronary artery surgery: really minimal?. *The Annals of Thoracic Surgery*. 1997;64:928-929.
2. Алякин Б.Г., Бузиашвили Ю.И., Власов Г.П. Эндоваскулярная хирургия при лечении больных ИБС с множественными поражениями коронарных артерий // Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. – 1996. – № 6. – С. 230. [Alekyan BG, Buziashvili YUI, Vlasov GP. Endovaskulyarnaya hirurgiya pri lechenii bol'nyh IBS s mnozhestvennyimi porazheniyami koronarnykh arterij. *Grudnaya i serdchno-sosudistaya hirurgiya*. 1996;№ 6:230. (In Russ).]
3. Cameron AA, Green GE, Thornton JJ. Internal thoracic artery grafts: 20-year clinical follow-up. *American College of Cardiology*. 1995;25:188-92.
4. Tatoulis J, Buxton BF, Fuller JA. The right internal thoracic artery: the forgotten conduit-5,766 patients and 991 angiograms. *The Annals of Thoracic Surgery*. 2011; 92:9-15.

5. Ybarra LF, Ribeiro HB, Pozetti AH. Long-term followup of drug eluting versus bare metal stents in the treatment of saphenous vein graft lesions. *Catheterization and Cardiovascular Interventions*; 2013;82(7):856-63.
6. Marco JD, Barner HB, Kaiser GC. Operative flow measurements and coronary bypass graft patency. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 1976; 71(4):545-547.
7. NICE. The VeriQ system for assessing graft flow during coronary artery bypass graft surgery. *Medical technologies guidance*. 2011:1-25.
8. Windecker S, Kolh P, Alfonso F, Collet JP, Cremer J, Falk V, Filippatos G, Hamm C, Head S. ESC/EACTS myocardial revascularization Guidelines. *European Heart Journal*. 2014;35:3235-3241.
9. Козлов В.И., Соколов В.Г. Исследование колебаний кровотока в системе микроциркуляции. – 1998. – С. 8-13. [Kozlov VI, Sokolov VG. Issledovanie kolebanij krovotoka v sisteme mikrocirkulyacii. 1998;8-13. (In Russ).]
10. Козлов В.И. Гистофизиология системы микроциркуляции // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2003. – № 3. – С. 79-85. [Kozlov VI. Gistofiziologiya sistemy mikrocirkulyacii. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrocirkulyaciya*. 2003;3:79-85. (In Russ).]
11. Поленов С.А. Основы микроциркуляции // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2008. – № 1. – С. 5-19. [Polenov SA. Osnovy mikrocirkulyacii. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrocirkulyaciya*. 2008;1:5-19. (In Russ).]
12. Крупаткин А.И., Сидоров В.В. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови. – 2005. – С. 256. [Krupatkin AI, Sidorov VV. Lazernaya dopplerovskaya floumetriya mikrocirkulyacii krovi. 2005;256. (In Russ).]
13. Sanaz A, Gomes A, David P. Relationship of Intraoperative Transit Time Flowmetry Findings to Angiographic Graft Patency at Follow-Up. *The Annals of Thoracic Surgery*. 2016; 101:2001-2003.
14. Di Giammarco G, Pano M, Cirmeni S, Pelini P, Vitolla G, Di Mauro M. Predictive value of intraoperative transit-time flow measurement for short-term graft patency in coronary surgery. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2006;132:468-74.
15. D'Ancona G, Karamanoukian H, Ricci M, Schmid S, Bergsland J, Salerno T. Graft revision after transit time flow measurements in off-pump coronary artery bypass grafting. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*. 2000;17:287-93.

16. Honda K, Okamura Y, Nishimura Y. Graft flow assessment using a transit time flow meter in fractional flow reserve-guided coronary artery bypass surgery. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2015;149:1622–1628.
17. Handa T, Orihashi K, Nishimori H, Fukutomi T, Yamamoto M, Kondo N. Maximal blood flow acceleration analysis in the early diastolic phase for in situ internal thoracic artery bypass grafts: a new transit-time flow measurement predictor of graft failure following coronary artery bypass grafting. *Interactive Cardiovascular and Thoracic Surgery*. 2015;20:449–457.
18. Jokinen JJ, Werkkala K, Vainikka T, Peräkylä T, Simpanen J, Ihlberg L. Clinical value of intra-operative transit-time flow measurement for coronary artery bypass grafting: a prospective angiography-controlled study. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*. 2011;39:918–923.
19. Потеев М.А., Якубов П.А. Интраоперационный менеджмент при коронарном шунтировании: флоуметрия как способ контроля качества // СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА ЗАКАМЬЯ. – № 4(17). –2017. – С. 13-17. [Poteev MA, Yakubov RA. Intraoperacionnyj menedzhment pri koronarnom shuntirovanii: floumetriya kak sposob kontrolya kachestva. SOVREMENNAYA MEDICINA ZAKAM'YA. 2017;4(17): 13-17. (In Russ).]
20. Lehnert P, Moller CH, Damgaard S, Gerds TA, Steinbruchel DA. Transit-time flow measurement as a predictor of coronary bypass graft failure at one year angiographic follow-up. *Journal of Cardiac Surgery*. 2015;30:47–52.
21. Ue D, Deb S, Chikazawa G, Kommaraju K, Tsuneyoshi H, Karkhanis R. Cut-off values for transit time flowmetry: are the revision criteria appropriate? *Journal of Cardiac Surgery*. 2013;28:3–7.
22. Jokinen JJ, Werkkala K, Vainikka T, Peräkylä T, Simpanen J, Ihlberg L. Clinical value of intra-operative transit-time flow measurement for coronary artery bypass grafting: a prospective angiography-controlled study. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*. 2011;39:918.
23. Uehara M, Muraki S, Takagi N, Yanase Y, Tabuchi M, Tachibana K. Evaluation of gastroepiploic arterial grafts to right coronary artery using transit-time flow measurement. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*. 2015;47:459–463.
24. Herman C, Sullivan JA, Buth K. Intraoperative graft flow measurements during coronary artery bypass surgery predict in-hospital outcomes. *Interactive Cardiovascular and Thoracic Surgery*. 2008;7:582–585.
25. Gao G, Zheng Z, Pi Y, Lu B, Lu J, Hu S. Aspirin plus clopidogrel therapy increases early venous graft patency after coronary artery bypass surgery a single-center, randomized, controlled trial. *Journal of the American College of Cardiology*. 2010;56: 1639–43.
26. Leacche M, Balaguer JM, Byrne JG. Intraoperative grafts assessment. *Seminars in Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2009;21:207–212.
27. Geha AS, Baue AE. Early and late results of coronary revascularization with saphenous vein and internal mammary. *The American Journal of Surgery*. 1979;137:456 – 463.
28. Singh SK, Desai ND, Chikazawa G, Tsuneyoshi H, Vincent J, Zagorski BM. The Graft Imaging to Improve Patency (GRIP) clinical trial results. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2010;139:294–301.
29. Tokuda Y, Song MH, Ueda Y, Usui A, Akita T. Predicting early coronary artery bypass graft failure by intraoperative transit time flow measurement. *The Annals of Thoracic Surgery*. 2007;84:1928–33.
30. Tokuda Y, Song MH, Oshima H, Usui A, Ueda Y. Predicting midterm coronary artery bypass graft failure by intraoperative transit time flow measurement. *The Annals of Thoracic Surgery*. 2008;86:532–536.
31. Kolozsvari R, Galajda Z, Ungvari T, Szabo G, Racz I, Szerafin T. Various clinical scenarios leading to development of the string sign of the internal thoracic artery after coronary bypass surgery: the role of competitive flow, a case series. *Journal of Cardiothoracic Surgery*. 2012;7:12.
32. Balacumaraswami L, Taggart DP. Intraoperative imaging techniques to assess coronary artery bypass graft patency. *The Annals of Thoracic Surgery*. 2007;83:22-51–2257.