

DOI: <https://doi.org/10.51922/2616-633X.2025.9.2.2642>

ФАКТОРЫ РИСКА РАЗВИТИЯ ИШЕМИЧЕСКИ-РЕПЕРФУЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ МИОКАРДА ПРИ КОРОНАРНОМ ШУНТИРОВАНИИ

Н.А. Шибeko, Л.Г. Гелис, Т.В. Русак, Е.С. Тарасик

Республиканский научно-практический центр «Кардиология», Минск, Беларусь
shibekonat@yandex.by

УДК 616.127-005.4:616-089.843

Ключевые слова: ишемическая болезнь сердца, коронарное шунтирование, искусственное кровообращение, ишемически-реперфузионные повреждения миокарда.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ. Н.А. Шибeko, Л.Г. Гелис, Т.В. Русак, Е.С. Тарасик. Факторы риска развития ишемически-реперфузионных повреждений миокарда при коронарном шунтировании. *Неотложная кардиология и кардиоваскулярные риски*, 2025, Т. 9, № 2, С. 2642–2651.

Современная кардиохирургия достигла значительных успехов в лечении ишемической болезни сердца. Однако, несмотря на высокую эффективность лечения, интервенционные технологии несут в себе потенциальную опасность развития осложнений. Немаловажную роль при этом играют реперфузионные повреждения.

Цель исследования: определить факторы риска, влияющие на развитие ишемически-реперфузионных повреждений миокарда при кардиохирургических вмешательствах у пациентов с ишемической болезнью сердца.

Материал и методы: проведено проспективное исследование, в которое включено 162 пациента, которым было выполнено коронарное шунтирование на «работающем сердце» – 25 пациентов (15,4%), коронарное шунтирование в условиях искусственного кровообращения (ИК) – 81 пациент (50%) и 56 пациентам (34,6%) в дополнение к реваскуляризации миокарда выполнена пластика или протезирование митрального и/или трикуспидального клапанов. Ишемически-реперфузионные повреждения встречались у 58 (35,8%) пациентов. Всем пациентам проводились эхокардиография, коронароангиография, магнитно-резонансная томография, а также вы-

полнялся комплекс клинично-лабораторных исследований, включающий маркеры кардиоваскулярного риска.

Результаты: при проведении исследования выявлено, что факторами риска, влияющими на развитие ишемически-реперфузионных повреждений миокарда, как при кардиохирургических вмешательствах в условиях искусственного кровообращения, так и при коронарном шунтировании на работающем сердце, являются индекс массы миокарда левого желудочка ($r = 0,75$; $p = 0,01$; $r = 0,68$; $p < 0,05$, соответственно), количество баллов по шкале SYNTAX Score ($r = 0,7$; $p = 0,01$; $r = 0,56$; $p < 0,05$, соответственно), а также исходный уровень высокочувствительного тропонина I ($r = 0,88$; $p = 0,001$; $r = 0,71$; $p = 0,01$; соответственно). Интраоперационными факторами риска развития реперфузионных повреждений миокарда служат время ишемии миокарда ($r = 0,65$, $p < 0,05$) и длительность искусственного кровообращения ($r = 0,72$; $p = 0,01$) при кардиохирургических вмешательствах в условиях искусственного кровообращения.

Таким образом, установлен ряд факторов риска, влияющих на развитие ишемически-реперфузионных нарушений миокарда при кардиохирургических вмешательствах.

RISK FACTORS OF ISCHEMIC-REPERFUSION MYOCARDIAL INJURY DURING CORONARY ARTERY BYPASS GRAFTING

N. Shybeka, L. Gelis, T. Rusak, E. Tarasik

Republican Scientific and Practical Center of Cardiology, Minsk, Belarus

Key words: ischemic heart disease, coronary artery bypass grafting, artificial circulation, ischemia-reperfusion myocardial injury.

FOR REFERENCES. N. Shybeka, L. Gelis, T. Rusak, E. Tarasik. Risk factors of ischemic-reperfusion myocardial injury during coronary artery bypass grafting. *Neotlozhnaya kardiologiya i kardiovaskulyarnye riski* [Emergency cardiology and cardiovascular risks], 2025, vol. 9, no. 2, pp. 2642–2651.

Modern cardiac surgery has made significant advances in the treatment of coronary artery disease. Despite the high effectiveness of treatment, interventional techniques, however, suggest a potential risk of complications, reperfusion injury playing a significant role in this.

The aim of the study was to identify risk factors influencing the development of ischemia-reperfusion myocardial injury during cardiac surgery in patients with coronary heart disease.

Materials and Methods. This prospective study included 162 patients, of whom 25 patients (15.4%) underwent off-pump coronary artery bypass grafting, 81 patients (50%) survived on-pump coronary artery bypass grafting and 56 patients (34.6%) underwent mitral and/or tricuspid valve repair or replacement in addition to myocardial revascularization. Ischemia-reperfusion injury was observed in 58 (35.8%) patients. All patients underwent echocardiography, coronary angiography, magnetic resonance imaging and

a comprehensive clinical and laboratory analysis, including markers of cardiovascular risk.

Results: The study revealed that risk factors influencing the development of ischemia-reperfusion myocardial injury, both during cardiac surgery using artificial circulation and during coronary artery bypass grafting on a beating heart, are the left ventricular myocardial mass index ($r = 0.75$; $p = 0.01$; $r = 0.68$; $p < 0.05$, respectively), points on the SYNTAX Score scale ($r = 0.7$; $p = 0.01$; $r = 0.56$; $p < 0.05$, respectively), as well as the initial level of high-sensitivity troponin I ($r = 0.88$; $p = 0.001$; $r = 0.71$; $p = 0.01$; respectively). Intraoperative risk factors for the development of myocardial reperfusion injury include the duration of myocardial ischemia ($r = 0.65$, $p < 0.05$) and the duration of artificial circulation ($r = 0.72$; $p = 0.01$) during cardiac surgery using artificial circulation.

Thus, a number of risk factors influencing the development of myocardial ischemia-reperfusion disorders during cardiac surgery were established.

Введение

Современная кардиохирургия достигла значительных успехов в лечении ишемической болезни сердца. Несмотря на высокую эффективность лечения, интервенционные технологии несут в себе потенциальную опасность развития осложнений [1, 2, 3]. Немаловажную роль при этом играют реперфузионные повреждения [4]. Реперфузионное повреждение миокарда – это парадоксальный феномен, при котором восстановление кровотока в ранее ишемизированном миокарде не только не восстанавливает его функцию, но и приводит к дополнительному, порой необратимому, повреждению кардиомиоцитов. В кардиохирургии это повреждение возникает в момент восстановления коронарного кровотока после периода искусственно вызванной ишемии, необходимой для выполнения операции на открытом сердце в условиях кардиopleгии [5]. В основе этого феномена лежит каскад взаимосвязанных реакций: массивный оксидативный стресс, вызванный взрывным образованием активных форм кислорода, нарушение внутриклеточного кальциевого гомеостаза, активацией провоспалительных цитокинов и запуска апоптоза кардиомиоцитов, который проявляется нарушением сократительной функции миокарда, аритмиями, микрососудистой дисфункцией и в конечном итоге может привести к обширному некрозу, сводя на нет положительный эффект от операции [6, 7, 8, 9]. Несмотря на глубокое изучение патофизиологических механизмов данного феномена, его клиническая значимость остается малоизученной. Именно поэтому, выявление и контроль факторов риска развития реперфузионных повреждений являются одной из наиболее актуальных задач интра- и послеоперационного ведения пациентов, так как именно эти повреждения во многом определяют прогноз операции и отдаленные результаты лечения.

Цель: определить факторы риска, влияющие на развитие ишемически-реперфузионных повреждений миокарда при кардиохирургических вмешательствах у пациентов с ишемической болезнью сердца.

Материал и методы

В проспективное исследование включено 162 пациента, которым было выполнено оперативное вмешательство: коронарное шунтирование (КШ) на «работающем сердце» – 25 пациентов (15,4%), КШ в условиях искусственного кровообращения (ИК) – 81 пациент (50%) и у 56 пациентов (34,6%) в дополнение к реваскуляризации миокарда выполнена пластика или протезирование митрального и/или трикуспидального клапанов (рисунок 1).

Все операции выполнялись по стандартной методике из срединной стернотомии в условиях нормотермического 34-360 искусственного кровообращения или на работающем сердце. При проведении операций на «сухом» сердце применялся комплексный метод защиты миокарда на основе крови. Всем пациентам, включенным в проспективное исследование, проводились общеприня-

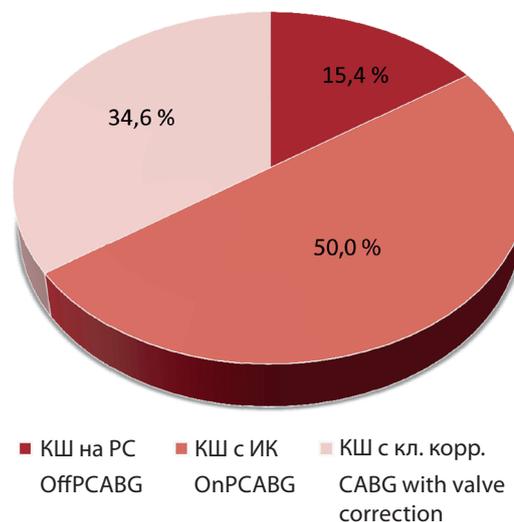


Рисунок 1.
Структура кардиохирургических вмешательств

Figure 1.
The structure of cardiac surgery

тые клинико-инструментальные и лабораторные методы обследования, включавшие в себя сбор анамнестических данных, физикальные исследования, электрокардиограмма (ЭКГ) в 12 отведениях, эхокардиография (ЭхоКГ), коронароангиография и магнитно-резонансная томография (МРТ). Дисфункция миокарда оценивалась с помощью чреспищеводного эхокардиографического исследования (исходно и интраоперационно). Оценивались характер и степень поражения коронарного русла и полнота реваскуляризации миокарда. Проводился комплекс клинико-лабораторных исследований, включающий общий анализ крови, биохимический анализ крови, а также маркеры кардиоваскулярного риска. С целью определения вклада в развитие реперфузионных повреждений исходно были исследованы уровни высокочувствительного тропонина (hsTnI), NT-pro-BNP, галектина-3, стимулирующего фактора роста (sST2), высокочувствительного Ц-реактивного белка (hs CRP), белков апоптоза Bcl-2 и Вах, каспазы-3, супероксиддисмутазы (СОД), а также оценивалась их динамика через 6 ч, 12 ч, 24 ч и 7 суток после оперативного лечения.

Статистическая обработка полученных результатов проведена с применением общепринятых методов математической статистики (программы MS EXCEL XP, STATSOFT STATISTICA 10.0 for Windows). Результаты представлены в виде частоты (%) для качественных переменных, а для количествен-

ных переменных в виде среднего и стандартного отклонения ($M \pm SD$). Для сравнения средних по независимым выборкам использовался t-критерий Стьюдента. Уровень значимости отличий принят менее 0,05 ($p < 0,05$). Для выявления силы и направления связей между исследуемыми переменными использовался корреляционный анализ с расчетом непараметрического коэффициента корреляции Спирмена.

Результаты. Все прооперированные лица были разделены на 2 группы в зависимости от наличия ишемически-реперфузионных нарушений миокарда. В 1-ю группу вошли 58 (35,8 %) пациентов, у которых имелась ишемически-реперфузионная дисфункция миокарда, 2-ю группу составили 104 (64,2 %) человека, у которых не было зарегистрировано данного нарушения.

Исходно группы сопоставимы по возрасту и полу. Так, средний возраст пациентов 1-ой группы составил ($58,2 \pm 7,3$) лет и ($56,8 \pm 6,5$) лет во 2-ой группе. Кроме этого, группы сопоставимы по сопутствующей патологии, функциональным классам (ФК) стенокардии и сердечной недостаточности, а также по фракции выброса левого желудочка (таблица 1).

Структура реперфузионных нарушений у пациентов с КШ в условиях ИК представлена в таблице 2 и у пациентов с КШ и клапанной коррекцией в таблице 3.

Таблица 1. Клинико-анамнестическая характеристика пациентов в зависимости от развития ишемически-реперфузионной дисфункции миокарда

Показатель	Пациенты с развившейся ишемически-реперфузионной дисфункцией миокарда	Пациенты без ишемически-реперфузионной дисфункции миокарда
Количество пациентов, n (%)	58 (35,8 %)	104 (64,2 %)
Средний возраст, лет	$58,2 \pm 7,3$	$56,8 \pm 6,5$
ФК стенокардии напряжения, n (%)	$2,4 \pm 0,5$	$2,3 \pm 0,4$
Инфаркт миокарда в анамнезе	6 (17,6 %)	15 (16,5 %)
ФК сердечной недостаточности (NYHA)	$2,2 \pm 0,5$	$2,1 \pm 0,4$
Фракция выброса левого желудочка, %	$44,5 \pm 10,0$	$46,4 \pm 11,5$
Сахарный диабет, n (%)	5 (23,7 %)	12 (21,2 %)
Артериальная гипертензия, n (%)	20 (58,8 %)	43 (56,3 %)
Скорость клубочковой фильтрации СКД-EPI, мл/мин, $1,73 \text{ м}^2$	$70,5 \pm 19,5$	$68,2 \pm 20,7$

Примечание: * Достоверность различий между группами ($p < 0,05$).

Table 1. Clinical and anamnestic characteristics of patients depending on the development of ischemia-reperfusion myocardial dysfunction

Parameters	Patients with ischemia-reperfusion myocardial dysfunction	Patients without myocardial ischemia-reperfusion dysfunction
Patients, n (%)	58 (35.8 %)	104 (64.2 %)
Mean age, years	58.2 ± 7.3	56.8 ± 6.5
Stable angina FC	2.4 ± 0.5	2.3 ± 0.4
History of MI, n (%)	6 (17.6 %)	15 (16.5 %)
NYHA FC	2.2 ± 0.5	2.1 ± 0.4
Left ventricular ejection fraction, %	44.5 ± 10.0	46.4 ± 11.5
Diabetes mellitus, n (%)	5 (23.7 %)	12 (21.2 %)
Arterial hypertension, n (%)	20 (58.8 %)	43 (56.3 %)
Glomerular filtration rate CKD-EPI, ml/min, 1.73 м^2	70.5 ± 19.5	68.2 ± 20.7

Note: * statistical significance between groups ($p < 0.05$).

Вид ишемически-реперфузионного нарушения	Частота
Нарушения ритма (желудочковая тахикардия)	25,5 %
Депрессия или подъем сегмента ST более 4 ч	72,8 %
Интраоперационное снижение фракции выброса левого желудочка и увеличение индекса локальной сократимости	58,5 %
Признаки МРТ (отек, некроз, микроваскулярная обструкция)	68 %

Type of ischemia-reperfusion disorder	Incidence
Heart rhythm disturbances (ventricular tachycardia)	25.5 %
ST-segment depression or elevation for more than 4 hours	72.8 %
Intraoperative decrease in left ventricular ejection fraction and increase in local contractility index	58.5 %
MRI findings (edema, necrosis, microvascular obstruction)	68 %

Вид ишемически-реперфузионного нарушения	Частота
Нарушения ритма (желудочковая экстрасистолия, желудочковая тахикардия)	28,6 %
Депрессия или подъем сегмента ST более 4 ч	78,5 %
Интраоперационное снижение фракции выброса левого желудочка и увеличение индекса локальной сократимости	65,5 %
Признаки МРТ (отек, некроз, микроваскулярная обструкция)	73 %

Type of ischemia-reperfusion disorder	Incidence
Heart rhythm disturbances (ventricular tachycardia)	28.6 %
ST-segment depression or elevation for more than 4 hours	78.5 %
Intraoperative decrease in left ventricular ejection fraction and increase in local contractility index	65.5 %
MRI findings (edema, necrosis, microvascular obstruction)	73 %

Из таблиц видно, что количество ишемически-реперфузионных нарушений выше в группе КШ и клапанной коррекции, однако по частоте встречаемости этих нарушений группы сопоставимы ($p > 0,05$).

В группе с КШ в условиях ИК ишемически-реперфузионные нарушения встречались у 25 пациентов (43,1 %), в группе с КШ и клапанной коррекцией – у 27 пациентов (46,6 %).

Кроме клинико-anamnestических признаков, оценивалась ангиографическая характеристика пациентов. Пациенты с развитием ишемически-реперфузионной дисфункции миокарда имели достоверную раз-

ницу только по количеству баллов SYNTAX Score. Количество пораженных артерий и полнота реваскуляризации, суммарное поражение коронарных артерий, диаметр шунтируемых артерий и прогнозируемый операционный риск по шкале EuroSCORE II достоверных различий не имели в этих группах пациентов (таблица 4).

При определении вклада в развитие ишемически-реперфузионной дисфункции миокарда, анализировались не только стандартные эхокардиографические показатели, но и данные тканевой доплерографии, в частности деформация и скорость деформации миокарда (таблица 5).

Показатель	Пациенты с развившейся ишемически-реперфузионной дисфункцией миокарда	Пациенты без ишемически-реперфузионной дисфункции миокарда
Суммарное поражение коронарных артерий, %	103,4 ± 33,6	98,2 ± 24,3
Данные коронароангиографии (среднее количество пораженных артерий)	3,02 ± 1,01	2,9 ± 0,9
Характеристика поражения коронарного русла, %		
1 сосудистое	11,2 %	11,8 %
2-х сосудистое	25,8 %	23,7 %
3-х сосудистое	42,4 %	44,1 %
4-х сосудистое	20,6 %	20,4 %
EuroSCORE II, %	5,4 ± 1,6	4,8 ± 2,2
SYNTAX Score, баллы	98 ± 7	52 ± 5*
Полнота реваскуляризации, %	93	96

Примечание: * Достоверность различий между группами ($p < 0,05$).

Таблица 2. Структура ишемически-реперфузионных нарушений при коронарном шунтировании в условиях искусственного кровообращения

Table 2. The structure of ischemia-reperfusion disorders in coronary artery bypass grafting using artificial circulation (on-pump)

Таблица 3. Структура ишемически-реперфузионных нарушений при коронарном шунтировании с клапанной коррекцией

Table 3. The structure of ischemia-reperfusion disorders in coronary artery bypass grafting with valve correction

Таблица 4. Исходная ангиографическая характеристика пациентов, прооперированных в условиях искусственного кровообращения, в зависимости от наличия ишемически-реперфузионной дисфункции миокарда

Table 4. Baseline angiographic characteristics of postoperative patients after on-pump surgery depending on the presence of ischemia-reperfusion myocardial dysfunction

Parameters	Patients with ischemia-reperfusion myocardial dysfunction	Patients without myocardial ischemia-reperfusion dysfunction
Total coronary artery lesion, %	103.4 ± 33.6	98,2 ± 24,3
Average number of damaged arteries	3.02 ± 1.01	2,9 ± 0,9
Characteristics of coronary lesion, n (%)		
1 vessel	11.2 %	11,8 %
2 vessels	25.8 %	23,7 %
3 vessels	42.4 %	44,1 %
4 or more vessels	20.6 %	20,4 %
EuroSCORE II, %	5.4 ± 1.6	4,8 ± 2,2
SYNTAX Score, points	98 ± 7	52 ± 5*
Completeness of revascularization, %	93	96

Note: * – statistical significance between groups (p < 0.05).

Таблица 5. Исходные эхокардиографические показатели в зависимости от наличия ишемически-реперфузионной дисфункции миокарда при операциях в условиях искусственного кровообращения

Показатель	Пациенты с развившейся ишемически-реперфузионной дисфункцией миокарда	Пациенты без ишемически-реперфузионной дисфункции миокарда
Конечно-диастолический диаметр, мм	46,6 ± 18,0	44,5 ± 15,5
Конечно-систолический диаметр, мм	38,4 ± 11,0	33,5 ± 14,2
Конечно-систолический объем, мл	43,6 ± 15,5	41,8 ± 14,8
Конечно-диастолический объем, мл	105,7 ± 12,5	103,0 ± 15,0
Конечно- диастолический индекс, мл/м ²	78,2 ± 14,0	66,7 ± 10,4
Конечно- систолический индекс, мл/м ²	35,4 ± 7,8	29,6 ± 16,8
Фракция выброса левого желудочка, %	44,5 ± 10,0	46,4 ± 11,5
Фракция выброса правого желудочка, %	48,9 ± 11,0	46,8 ± 10,5
Индекс локальной сократимости, баллы	1,4 ± 0,5	1,2 ± 0,3
Индекс массы миокарда левого желудочка, г/м ²	138,5 ± 15,0	104,6 ± 16,0*
Индекс относительной толщины стенки левого желудочка	0,74 ± 0,06	0,45 ± 0,05*
Деформация миокарда, %	11,5 ± 1,5	19 ± 1,3*
Скорость деформации миокарда, с ⁻¹	0,7 ± 0,3	1,4 ± 0,2*

Примечание: * Достоверность различий между группами (p < 0,05).

Table 5. Baseline echocardiographic parameters depending on the presence of ischemia-reperfusion myocardial dysfunction during on-pump surgery

Parameters	Patients with ischemia-reperfusion myocardial dysfunction	Patients without myocardial ischemia-reperfusion dysfunction
End-diastolic dimension, mm	46.6 ± 18.0	44.5 ± 15.5
End-systolic dimension, mm	38.4 ± 11.0	33.5 ± 14.2
End-systolic volume, ml	43.6 ± 15.5	41.8 ± 14.8
End-diastolic volume, ml	105.7 ± 12.5	103.0 ± 15.0
End-diastolic index, ml/m ²	78.2 ± 14.0	66.7 ± 10.4
End-systolic index, ml/m ²	35.4 ± 7.8	29.6 ± 16.8
Left ventricular ejection fraction, %	44.5 ± 10.0	46.4 ± 11.5
Right ventricular ejection fraction, %	48.9 ± 11.0	46.8 ± 10.5
Regional contractility index, points	1.4 ± 0.5	1.2 ± 0.3
Left ventricular myocardial mass index, g/m ²	138.5 ± 15.0	104.6 ± 16.0*
Left ventricular relative wall thickness index	0.74 ± 0.06	0.45 ± 0.05*
Myocardial deformation, %	11.5 ± 1.5	19 ± 1.3*
Myocardial deformation rate, с ⁻¹	0.7 ± 0.3	1.4 ± 0.2*

Note: * – statistical significance between groups (p < 0.05).

В гипертрофированных желудочках повышен трансмуральный градиент, утолщение стенок желудочков механически усложняет реперфузию, что предрасполагает к ишемическому повреждению субэндокардиального слоя. Поэтому артериальная гипертензия с выраженной гипертрофией ЛЖ и коморбидными состояниями является дополни-

тельным фактором развития необратимых ишемически-реперфузионных повреждений при кардиохирургических вмешательствах. Особенно чувствителен к ишемии миокард у пациентов с хронической сердечной недостаточностью, сахарным диабетом, декомпенсированными пороками сердца и нестабильной гемодинамикой.

Критерии концентрического ремоделирования миокарда сыграли неблагоприятную роль в развитии ишемически-реперфузионной дисфункции миокарда, так как исходный патологический процесс повышает чувствительность миокарда к ишемическим и реперфузионным повреждениям. В гипертрофированных желудочках повышен трансмуральный градиент, утолщение стенок желудочков механически усложняет реперфузию, что предрасполагает к ишемическому повреждению субэндокардиального слоя, поэтому выраженная гипертрофия ЛЖ является дополнительным фактором риска развития необратимых ишемически-реперфузионных повреждений при кардиохирургических вмешательствах. Так, пациенты с ишемически-реперфузионной дисфункцией миокарда имели более высокие показатели индекса массы миокарда ЛЖ (ИММЛЖ) и относительной толщины стенки левого желудочка ($p < 0,05$) (таблица 5).

При анализе показателей тканевого доплера (оценка деформации миокарда – strain и скорости деформации) выявлено, что в обеих группах имеются нарушения деформации ЛЖ (таблица 5) и уменьшение ее скорости, которые наиболее выражены у пациентов ишемически-реперфузионной дисфункцией миокарда.

При изучении исходных уровней биомаркеров в зависимости от развития реперфузионных повреждений зафиксировано, что достоверно большее исходное значение в группе с реперфузионными повреждениями

имел только hsTnI (таблица 6), что может указывать на ишемическую дисфункцию миокарда и его прогностическую роль в оценке тяжести реперфузионного повреждения миокарда. Четкой связи между развитием реперфузионных повреждений и исходным уровнем других исследуемых биомаркеров в данных группах установлено не было (таблица 6).

Таким образом, дооперационными факторами риска, которые могут повлиять на развитие ишемически-реперфузионных повреждений при кардиохирургических вмешательствах в условиях ИК, являются количество баллов SYNTAX Score, ИММЛЖ, относительная толщина стенки левого желудочка, деформация миокарда, скорость деформации миокарда, а также исходный уровень hsTnI.

Кроме дооперационных факторов риска в исследовании анализировались интраоперационные показатели, которые представлены в таблице 7.

Необходимо отметить, что группа пациентов с КШ в условиях ИК и группа пациентов с КШ и клапанной коррекцией достоверно различались только по времени ишемии миокарда и времени искусственного кровообращения ($p < 0,05$). Наряду с этим, ишемически-реперфузионная дисфункция миокарда встречалась у пациентов, которые имели достоверно большее интраоперационное время ишемии миокарда ($p < 0,05$) и время искусственного кровообращения ($p < 0,05$) (таблица 8).

Показатель	Пациенты с развившейся ишемически-реперфузионной дисфункцией миокарда	Пациенты без ишемически-реперфузионной дисфункции миокарда
hsTnI, нг/мл	54,2 ± 15,6	18,4 ± 12,7*
NT-pro-BNP, пг/мл	1850 ± 370	1680 ± 420
галактин-3, нг/мл	15,6 ± 14,5	13,8 ± 12,8
hs CRP, мг/л	105,7 ± 12,5	103,0 ± 15,0
sST2, нг/мл	20,2 ± 9,4	19,7 ± 8,8
Супероксиддисмутаза, нг/мл	98,5 ± 13,5	96,6 ± 15,2

Примечание: * Достоверность различий между группами ($p < 0,05$).

Parameters	Patients with ischemia-reperfusion myocardial dysfunction	Patients without myocardial ischemia-reperfusion dysfunction
hsTnI, ng/ml	54.2 ± 15.6	18.4 ± 12.7*
NT- pro-BNP, pg/ml	1850 ± 370	1680 ± 420
galectin-3, ng/ml	15.6 ± 14.5	13.8 ± 12.8
hs CRP, mg/l	105.7 ± 12.5	103.0 ± 15.0
sST2, ng/ml	20.2 ± 9.4	19.7 ± 8.8
Superoxide dismutase, ng/ml	98.5 ± 13.5	96.6 ± 15.2

Note: * statistical significance between groups ($p < 0.05$).

Таблица 6. Исходные уровни биомаркеров в зависимости от развития реперфузионных нарушений миокарда при операциях в условиях искусственного кровообращения

Table 6. Baseline levels of biomarkers depending on the development of myocardial reperfusion disorders during on-pump surgery

Таблица 7.
Интраоперационные
данные

Интраоперационный показатель	Коронарное шунтирование в условиях искусственного кровообращения (n = 81)	Коронарное шунтирование и клапанная коррекция (n = 56)	Коронарное шунтирование на «работающем сердце» (n = 25)
Время ишемии миокарда, мин	60 ± 22	98 ± 28*	–
Время искусственного кровообращения, мин	94 ± 25	158 ± 29*	–
Среднее число дистальных анастомозов	2,78 ± 0,9	2,56 ± 1	2,76 ± 1
Применение левой внутренней грудной артерии, %	87,5 %	84,3 %	89%
Коррекция недостаточности митрального клапана, n %	–	42 (25,9 %)	–
Коррекция недостаточности трикуспидального клапана, n %	–	14 (8,6 %)	–

Примечание: * Достоверность различий между группами (p < 0,05).

Table 7.
Intraoperative data

Intraoperative indicator	On-pump coronary artery bypass grafting (n = 81)	Coronary artery bypass grafting and valve correction (n = 56)	Off-pump coronary artery bypass grafting (n = 25)
Myocardial ischemia time, min	60 ± 22	98 ± 28*	–
Artificial circulation time, min	94 ± 25	158 ± 29*	–
Average number of distal anastomoses	2.78 ± 0.9	2.56 ± 1	2.76 ± 1
Use of the left internal thoracic artery, %	87.5 %	84.3 %	89%
Correction of mitral valve insufficiency, n %	–	42 (25.9 %)	–
Correction of tricuspid valve insufficiency, n %	–	14 (8.6 %)	–

Note: * statistical significance between groups (p < 0.05).

Таблица 8.
Интраоперационная характеристика пациентов, оперированных в условиях ИК в зависимости от развития реперфузионных нарушений

Показатель	Пациенты с развившейся ишемически-реперфузионной дисфункцией миокарда	Пациенты без ишемически-реперфузионной дисфункции миокарда
Полнота реваскуляризации, %	92	94
Время ишемии миокарда, мин	118 ± 13	67 ± 15*
Время искусственного кровообращения, мин	172 ± 19	112 ± 14*
Скорость кровотока по шунтам, мл/мин	48,6 ± 25	32 ± 18*
Пульсовой индекс	5,9 ± 0,9	3,5 ± 0,6*

Примечание: * Достоверность различий между группами (p < 0,05).

Table 8.
Intraoperative characteristics of postoperative patients after on-pump surgery depending on the development of reperfusion disorders

Intraoperative indicator	Patients with ischemia-reperfusion myocardial dysfunction	Patients without myocardial ischemia-reperfusion dysfunction
Revascularization completeness, %	92	94
Myocardial ischemia time, min	118 ± 13	67 ± 15*
Artificial circulation time, min	172 ± 19	112 ± 14*
Blood flow rate by shunt, ml/min	48.6 ± 25	32 ± 18*
Pulsation index	5.9 ± 0.9	3.5 ± 0.6*

Note: * statistical significance between groups (p < 0.05).

Кроме этого, в группах пациентов с реперфузионными повреждениями, оперированных в условиях ИК, по данным флуометрии регистрировался высокий пульсовой индекс (5,9 ± 0,9), который является интраоперационным маркером высокого дистального сопротивления и чаще всего провоцируется дистальным микроэмболизмом, спазмом или неудовлетворительным дистальным руслом,

что позволяет расценивать его как патогенетическую основу феномена «no-reflow». Поэтому пульсовой индекс можно использовать для прямой оценки адекватности перфузии миокарда.

Кроме высокого пульсового индекса, в группе с реперфузионными повреждениями зафиксирована повышенная средняя скорость по шунтам – 48,6 ± 25 мл/мин (таблица 8).

С клинической точки зрения, высокая скорость может быть следствием гемодинамически значимого сужения шунта вследствие несоответствия диаметров сосудов, стеноза в области анастомоза, перекрута или диффузного спазма шунта, но при отсутствии субстрата для сужения сосуда, высокая скорость по шунтам также может являться фактором риска реперфузионного повреждения, особенно в сочетании с высоким пульсовым индексом.

Таким образом, интраоперационными факторами, которые могут влиять на развитие ишемически-реперфузионных повреждений при кардиохирургических вмешательствах в условиях ИК, являются время ишемии миокарда и время искусственного кровообращения, пульсовой индекс и средняя скорость по шунтам.

Ишемически-реперфузионные повреждения встречаются чаще при КШ в условиях ИК и клапанной коррекции, соответственно предполагается, что коронарное шунтирование без ИК связано с меньшим ишемически-реперфузионным повреждением миокарда. Однако при КШ без ИК существуют определённые риски, связанные, прежде всего, с необходимостью ротации и вертикализации сердца, а также временного пережатия коронарных артерий для формирования дистальных анастомозов. Доказано, что проведение основного этапа операции таким способом приводит к локальной ишемии миокарда, степень выраженности которой находится в зависимости от характера поражения сосуда и состояния коллатерального кровотока [10, 11].

В нашем исследовании ишемически-реперфузионные нарушения встречались у 6 пациентов (10,3%) из группы КШ на «работающем сердце».

Структура реперфузионных нарушений у пациентов с КШ на «работающем сердце» представлена в таблице 9. В этой группе па-

циентов достоверно чаще диагностировались реперфузионные повреждения по данным МРТ, изменениям сегмента ST ($p < 0,05$), а также по высокому уровню выявленных жизнеугрожающих нарушений ритма на ЭКГ.

При анализе дооперационных факторов развития реперфузионных повреждений при КШ на «работающем сердце» достоверное значение имели такие же показатели Эхо-КГ (ИММЛЖ и относительной толщины стенки левого желудочка, $p < 0,05$), как и при операциях в условиях ИК. При проведении корреляционного анализа, установлена сильная корреляционная взаимосвязь между наличием реперфузионных повреждений и индексом массы миокарда левого желудочка ($r = 0,68$; $p < 0,05$), умеренная – с количеством баллов SYNTAX Score ($r = 0,56$; $p < 0,05$).

Достоверная разница по биомаркерам зарегистрирована только по уровню hsTnI, который был достоверно выше в группе с реперфузионными повреждениями ($p < 0,05$). Отличие от группы, оперированной в условиях ИК, заключалось в более низком исходном уровне hsTnI ($36,2 \pm 14,6$ нг/мл и $54,2 \pm 15,6$ нг/мл) соответственно, но корреляционная взаимосвязь с реперфузионными повреждениями все равно имела высокое значение ($r = 0,71$; $p = 0,01$). Активность антиоксидантной системы определялась по уровню СОД. Исходные уровни, а также статистически незначимое повышение СОД через 12 ч и 24 ч у пациентов после КШ на «работающем сердце» достоверной связи с развитием реперфузионных повреждений не имели, вероятно это обусловлено меньшим оксидативным стрессом в условиях работающего сердца.

Необходимо отметить, что в группе пациентов с КШ на «работающем сердце» среднее число дистальных анастомозов составило $2,76 \pm 1$ и достоверно не отличалось от количества анастомозов, применяемых при операциях в условиях ИК. При этом

Вид ишемически-реперфузионного нарушения	Частота
Нарушения ритма (желудочковая тахикардия)	57,3 %
Депрессия или подъем сегмента ST более 4 ч	68,7 %*
Интраоперационное снижение фракции выброса левого желудочка и увеличение индекса локальной сократимости	18 %
Признаки МРТ (отек, некроз)	88 %*

Примечание: * Достоверность различий между группами ($p < 0,05$).

Type of ischemia-reperfusion disorder	Incidence
Heart rhythm disturbances (ventricular tachycardia)	57.3 %
ST-segment depression or elevation for more than 4 hours	68.7 %*
Intraoperative decrease in left ventricular ejection fraction and increase in local contractility index	18 %
MRI findings (edema, necrosis)	88 %*

Note: * statistical significance between groups ($p < 0.05$).

Таблица 9.
Структура ишемически-реперфузионных нарушений при коронарном шунтировании на «работающем сердце»

Таблица 9.
The structure of ischemia-reperfusion disorders in off-pump coronary artery bypass grafting

левая внутренняя грудная артерии применялась в чаще (89%) (таблица 7).

Параметры флуометрии также имели свою неблагоприятную роль при КШ на «работающем сердце», как и при операциях в условиях ИК. Так в группах с реперфузионными нарушениями и без них пульсовой индекс и скорость в шунтах имели достоверную разницу ($5,9 \pm 0,9$ и $3,5 \pm 0,6$, $p < 0,05$; $48,6 \pm 25$ мл/мин и 32 ± 18 мл/мин).

В целом, количество реперфузионных повреждений при КШ на «работающем сердце» достоверно меньше ($p = 0,01$), что вероятно обусловлено отсутствием одного из неблагоприятных факторов риска – использование искусственного кровообращения и пережатия аорты. Однако при операции на «работающем сердце» временное пережатие коронарных артерий провоцирует в ряде случаев снижение сократительной функции ЛЖ, что подтверждается достоверно меньшим количеством (18 %) интраоперационного снижения фракции выброса ЛЖ и увеличения ИЛС у пациентов прооперированных без использования ИК ($p < 0,05$).

Для определения вклада выявленных дооперационных и интраоперационных факторов риска в развитие ишемически-реперфузионных нарушений проводился корреляционный анализ. В таблицах 10 и 11 представлены корреляционные матрицы связи показателей и ишемически-реперфузионных нарушений при оперативных вмешательствах в условиях искусственного кровообращения.

Из таблицы 10 видно, что сильная корреляционная взаимосвязь наблюдается между наличием реперфузионных нарушений и hsTnI ($r = 0,88$; $p = 0,001$), индексом массы миокарда левого желудочка ($r = 0,75$; $p = 0,01$), количеством баллов SYNTAX Score ($r = 0,7$; $p = 0,01$), умеренная взаимосвязь – с деформацией миокарда ($r = 0,52$; $p < 0,05$).

Сильная корреляционная взаимосвязь установлена между наличием реперфузионных нарушений и пульсовым индексом ($r = 0,78$; $p = 0,01$), временем искусственного кровообращения ($r = 0,72$; $p = 0,01$) умеренная взаимосвязь – со средней скоростью по шунтам и временем ишемии миокарда ($r = 0,56$, $r = 0,65$, $p < 0,05$ соответственно) (таблица 11).

Таблица 10. Корреляционная матрица связи дооперационных показателей и ишемически-реперфузионных нарушений при оперативных вмешательствах в условиях искусственного кровообращения (представлены корреляционные коэффициенты и уровень их значимости)

Исходный показатель	Коэффициент корреляции Спирмена, Кендалла (r)	p
hsTnI, нг/мл	0,88	0,001
Индекс массы миокарда левого желудочка, г/м ²	0,75	0,01
Относительная толщина стенки левого желудочка	0,56	< 0,05
Деформация миокарда, %	0,52	< 0,05
Скорость деформации миокарда, с ⁻¹	0,38	< 0,05
SYNTAX Score, баллы	0,7	0,01

Table 10. Correlation matrix of the relationship between preoperative parameters and ischemic-reperfusion disorders during on-pump surgical interventions (correlation coefficients and their level of significance are presented)

Initial indicator	Spearman's correlation coefficient, Kendall's (r)	p
hsTnI, нг/мл	0.88	0.001
Left ventricular myocardial mass index, g/m ²	0.75	0.01
Relative thickness of the left ventricular wall	0.56	< 0.05
Myocardial deformation, %	0.52	< 0.05
Myocardial deformation rate, c ⁻¹	0.38	< 0.05
SYNTAX Score, баллы	0.7	0.01

Таблица 11. Корреляционная матрица связи интраоперационных показателей и ишемически-реперфузионных нарушений при оперативных вмешательствах в условиях искусственного кровообращения (представлены корреляционные коэффициенты и уровень их значимости)

Исходный показатель	Коэффициент корреляции Спирмена, Кендалла (r)	p
Время ишемии миокарда, мин	0,65	< 0,05
Время искусственного кровообращения, мин	0,72	0,01
Пульсовой индекс	0,78	0,01
Средняя скорость по шунтам, мл/мин	0,56	< 0,05

Table 11. Correlation matrix of the relationship between intraoperative parameters and ischemic-reperfusion disorders during on-pump surgical interventions (correlation coefficients and their level of significance are presented)

Initial indicator	Spearman's correlation coefficient, Kendall's (r)	p
Myocardial ischemia time, min	0.65	< 0.05
Artificial circulation time, min	0.72	0.01
Pulsation index	0.78	0.01
Blood flow rate by shunt, ml/min	0.56	< 0.05

Таким образом, с помощью корреляционного анализа выявлены у пациентов, прооперированных условиях ИК, факторы риска развития реперфузионных повреждений: ИММЛЖ ($r = 0,75$; $p = 0,01$), hsTnI ($r = 0,88$; $p = 0,001$), количество баллов SYNTAX Score и показатель флуометрии – пульсовой индекс ($r = 0,78$; $p = 0,01$).

Следовательно нами установлено следующее: дооперационными факторами риска, влияющими на развитие ишемически-реперфузионных нарушений миокарда, как при кардиохирургических вмешательствах в условиях ИК, так и при коронарном шунтировании на работающем сердце, являются индекс мас-

сы миокарда левого желудочка и количество баллов по шкале SYNTAX Score, а также исходный уровень высокочувствительного тропонина I. Интраоперационными факторами риска развития реперфузионных повреждений миокарда служат время ишемии миокарда и длительность искусственного кровообращения при кардиохирургических вмешательствах в условиях ИК, а также показатели флуометрии, которые вносят неблагоприятный вклад не только при операциях в условиях ИК, но и на работающем сердце.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

- Bokerija, L.A., Gudkova R.G. Results of scientific research on the problem of cardiovascular surgery in 2008. *Russian journal of thoracic and cardiovascular surgery*, 2009, no. 6, pp. 8–14. (in Russian).
- Bokerija, L.A., Gudkova R.G. *Cardiovascular surgery – 2014; Diseases and congenital anomalies of the circulatory system*. Moscow, 2015, 225 p. (in Russian).
- Buziashvili Yu.I., Koksheneva I.V., Shakhnazaryan L.S. et al. Functional state of myocardium in the early postoperative period in different techniques of coronary artery bypass grafting. The role of apoptosis mechanisms. *Russian journal of cardiology and cardiovascular surgery*, 2015, vol. 8(5), pp. 14–25. (in Russian).
- Shibeko N.A., Gelis L.G., Rusak T.V. Diagnostic signs of myocardial reperfusion injury after coronary artery bypass grafting. *Emergency cardiology and cardiovascular risks*, 2021, vol. 5(1), pp. 1167–1171. DOI: 10.51922/2616633X.2021.5.2.1167. (in Russian).
- Dharmakumar R., Kloner R.A., Fishbein M., et al. Reperfused Myocardial Infarction: The Road to CCS Classification of Acute MI and Beyond. *JACC Adv*, 2025, vol. 4(2), pp. 101528. DOI: 10.1016/j.jacadv.2024.101528.
- Anselmi A., Abbate A., Girola F. et al. Myocardial ischemia, stunning, inflammation, and apoptosis during cardiac surgery: a review of evidence. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2004, vol. 25(3), pp. 304–311. DOI: 10.1016/j.ejcts.2003.12.003.
- Bunenkov N.S., Komok V.V., Belyi S.A. et al. Prognostic value of troponin I after coronary artery bypass grafting (AMIRI-CABG study). *Russian journal of transplantology and artificial organs*, 2021, vol. 23(1), pp. 91–100. (in Russian).
- Kalinin R.A., Suchkov I.A., Klimentova E.H.A. et al. Effect of an antioxidant on vascular wall cell apoptosis markers after reconstructive operations. *Angiology and vascular surgery. Journal named after academician A.V. Pokrovsky*, 2021, vol. 27(3), pp. 8–15. (in Russian).
- Cai K., Jiang H., Zou Y. et al. Programmed death of cardiomyocytes in cardiovascular disease and new therapeutic approaches. *Pharmacol Res*, 2024, Aug. 206, pp. 107281 DOI: 10.1016/j.phrs.2024.107281.
- Gaudio M., Angelini G.D., Antoniadis C. et al. Off-Pump Coronary Artery Bypass Grafting: 30 Years of Debate. *J Am Heart Assoc*, 2018, vol. 7(16), e009934. DOI: 10.1161/JAHA.118.009934.
- Keronen J., Huttunen T., Mennander A. Early Graft Reperfusion and Arrhythmias After Coronary Artery Bypass Grafting. *Cureus*, 2024, vol. 16(7), e64285. DOI: 10.7759/cureus.64285.

Посмунула 11.09.2025