

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 клинико-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 запуском 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-

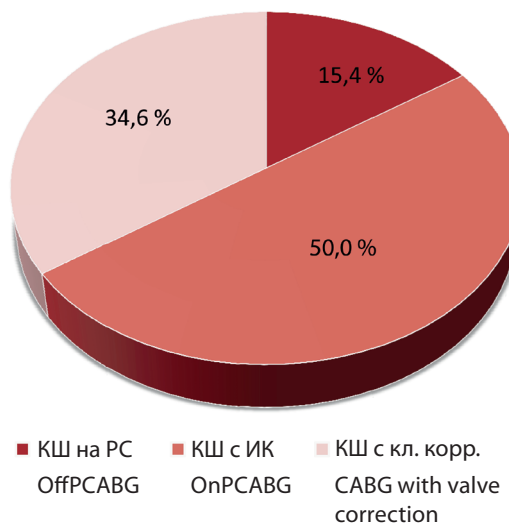


Рисунок 1.  
Структура кардиохирургических вмешательств

Figure 1.  
The structure of cardiac surgery

тые клинико-инструментальные и лабораторные методы обследования, включавшие в себя сбор анамнестических данных, физические 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	$58.2 \pm 7.3$	$56.8 \pm 6.5$
Stable angina FC	$2.4 \pm 0.5$	$2.3 \pm 0.4$
History of MI, n (%)	6 (17.6 %)	15 (16.5 %)
NYHA FC	$2.2 \pm 0.5$	$2.1 \pm 0.4$
Left ventricular ejection fraction, %	$44.5 \pm 10.0$	$46.4 \pm 11.5$
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, $1.73 \text{ м}^2$	$70.5 \pm 19.5$	$68.2 \pm 20.7$

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 %

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

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 %

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

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 %

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

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 %

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

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 клинко-анамнестических 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

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

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

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 <sup>2</sup>	78,2 ± 14,0	66,7 ± 10,4
Конечно-систолический индекс, мл/м <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	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 <sup>-1</sup>	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 <sup>2</sup>	78.2 ± 14.0	66.7 ± 10.4
End-systolic index, ml/m <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	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 <sup>-1</sup>	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 с 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 повреждения-

ми 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
галектин-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 &lt; 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 &lt; 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 &lt; 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 &lt; 0.05).

Кроме этого, в группах пациентов с реперфузионными повреждениями, оперированных в условиях ИК, по данным флуометрии регистрировался высокий пульсовой индекс ( $5,9 \pm 0,9$ ), 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 –  $48,6 \pm 25$  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, перекута 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, пульсовый 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, изменения 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  $32 \pm 18$  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 <sup>2</sup>	0,75	0,01
Относительная толщина стенки левого желудочка	0,56	< 0,05
Деформация миокарда, %	0,52	< 0,05
Скорость деформации миокарда, с <sup>-1</sup>	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 <sup>2</sup>	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 <sup>-1</sup>	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

1. 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).
2. Bokerija, L.A., Gudkova R.G. *Cardiovascular surgery – 2014; Diseases and congenital anomalies of the circulatory system*. Moscow, 2015, 225 p. (in Russian).
3. 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).
4. 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).
5. Dharmakumar R., Kloner R.A., Fishbein M., et al. Reperused Myocardial Infarction: The Road to CCS Classification of Acute MI and Beyond. *JACC Adv*, 2025, vol. 4(2), pp. 101528. DOI: 10.1016/j.jaccadv.2024.101528.
6. 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.
7. 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).
8. 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).
9. 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.
10. Gaudino 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.
11. 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.

Послупила 11.09.2025