

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГИПЕРБАРИЧЕСКОЙ ОКСИГЕНАЦИИ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ КАРДИОХИРУРГИЧЕСКОЙ ПОМОЩИ

В.В. Крылов¹, Е.Я. Колчина²

¹ Московский областной научно-исследовательский клинический институт имени М.Ф. Владимирского, Москва, Российская Федерация

² Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования, Москва, Российская Федерация

Развитие кардиохирургии в современных условиях невозможно без постоянного совершенствования всех этапов оказания кардиохирургической помощи. Одним из перспективных способов достижения данной цели является активное использование гипербарической оксигенации на этапах предоперационной подготовки и послеоперационной реабилитации. В обзоре представлены краткая история развития гипербарической оксигенации в кардиохирургии, патофизиологические и патобиохимические механизмы лечебного действия метода и сценарии его применения при предоперационной подготовке и послеоперационной реабилитации кардиохирургических пациентов. Внедрение гипербарической оксигенации в кардиохирургическую практику способно привести к улучшению результатов хирургического лечения, а также сокращению сроков предоперационной подготовки и послеоперационной реабилитации кардиохирургических пациентов, что приведет к заметному повышению качества и эффективности кардиохирургической помощи.

Ключевые слова: кардиохирургия; гипербарическая оксигенация; предоперационная подготовка; послеоперационная реабилитация.

Для цитирования: Крылов В.В., Колчина Е.Я. Возможности применения гипербарической оксигенации на различных этапах кардиохирургической помощи. *Клиническая практика.* 2022;13(2): 88–97. doi: <https://doi.org/10.17816/clinpract104667>

Поступила 10.03.2022

Принята 22.03.2022

Опубликована 16.06.2022

POSSIBILITIES OF USING HYPERBARIC OXYGEN THERAPY AT DIFFERENT STAGES OF CARDIAC SURGERY

V.V. Krylov¹, E.Ya. Kolchina²

¹ Moscow Regional Research and Clinical Institute, Moscow, Russian Federation

² Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Moscow, Russian Federation

Nowadays, the evolution of cardiac surgery is impossible without a continuous improvement of all the treatment stages. One of the promising ways to achieve this goal is the active use of hyperbaric oxygen therapy in the preoperative preparation and postoperative rehabilitation. In this review, we present a short history of the hyperbaric oxygen therapy development in cardiac surgery, the pathophysiological and pathobiochemical mechanisms of its therapeutic effect and the scenarios for its use in the preoperative preparation and postoperative rehabilitation of cardiac surgery patients. The introduction of hyperbaric oxygen therapy into cardiac surgery can improve the results of the surgical treatment, as well as reduce the times of the preoperative preparation and postoperative rehabilitation of cardiac surgery patients, that will significantly increase the quality and efficiency of cardiac surgery.

Keywords: cardiac surgery; hyperbaric oxygen therapy; preoperative preparation; postoperative rehabilitation.

For citation: Krylov VV, Kolchina EYa. Possibilities of Using Hyperbaric Oxygen Therapy At Different Stages of Cardiac Surgery. *Journal of Clinical Practice.* 2022;13(2):88–97. doi: <https://doi.org/10.17816/clinpract104667>

Submitted 10.03.2022

Revised 22.03.2022

Published 16.06.2022

ВВЕДЕНИЕ

Активное развитие кардиохирургии обусловило широкую доступность высокотехнологичной медицинской помощи для пациентов. Однако необходимо помнить, что кардиохирургическая помощь не ограничивается только выполнением оперативного вмешательства, и успех лечения во многом зависит также от предоперационной подготовки и послеоперационной реабилитации пациентов. Оптимизация и совершенствование этих этапов позволит не только улучшить непосредственные, ближайшие и отдаленные клинические результаты, но и повысить общее качество жизни пациентов, и дополнительно снизить материально-технические и экономические затраты на их лечение.

Одним из перспективных методов такой оптимизации является внедрение гипербарической оксигенации (ГБО) на различных этапах кардиохирургической помощи.

Интраоперационному применению ГБО, подразумевающему выполнение кардиохирургических вмешательств непосредственно в барооперационной, посвящено множество публикаций, в том числе несколько монографий. Данная тема является обширной и имеет свои специфику и проблемы, поэтому в данной статье будут рассматриваться возможные сценарии применения ГБО на этапах предоперационной подготовки и послеоперационной реабилитации.

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ГИПЕРБАРИЧЕСКОЙ ОКСИГЕНАЦИИ

Первые попытки использования сжатого воздуха в медицине начались в середине XVII века и не прекращались в течение двух столетий. К концу XIX века накопились данные о лечебном действии кислорода и физических законах растворения газов. Это дало новый стимул к использованию повышенного давления для увеличения доставки кислорода в организм человека. Стоит отметить, что ГБО в своем современном виде сформировалась во многом благодаря активному развитию хирургии на открытом сердце. В середине 50-х годов, в эру становления кардиохирургии, коллектив авторов во главе с основоположником гипотермии голландским хирургом Ите Борема (Ite Boerema) предложил перед остановкой кровообращения насыщать организм пациента кислородом под давлением 3 абсолютных атмосферы. В 1956 г. были представлены первые результаты экспериментов, продемонстрировавшие увеличение срока безопасного времени остановки кровообра-

щения примерно в 2 раза по сравнению с контрольными наблюдениями при одинаковой температуре тела. А уже в 1960 г. была построена первая барооперационная, и способность ГБО создавать запас кислорода в тканях стала с успехом использоваться для обеспечения безопасности в ходе реконструктивных кардиохирургических вмешательств, выполнение которых требует непродолжительной остановки кровообращения (например, ушивание вторичного дефекта межпредсердной перегородки, вальвулопластика врожденного аортального стеноза или изолированного стеноза легочной артерии, атриосептэктомия при транспозиции магистральных сосудов). Основной этап указанных операций выполнялся в условиях кратковременной остановки кровообращения посредством окклюзии путей притока крови как в условиях нормотермии, так и при поверхностной или умеренной гипотермии [1, 2].

В нашей стране исследования по изучению ГБО начались почти одновременно с работами голландских исследователей. Научные работы по использованию ГБО в разных областях клинической медицины велись в Москве, Ленинграде, Куйбышеве, Воронеже, Ярославле. В середине 70-х годов в СССР была создана специализированная служба ГБО, объединившая более тысячи отделений ГБО в многопрофильных стационарах, госпиталях, санаторных учреждениях и даже амбулаториях [1].

В 1969 г. в Институте сердечно-сосудистой хирургии имени А.Н. Бакулева АМН СССР под руководством Л.А. Бокерия были начаты исследования по применению ГБО в кардиохирургии. Первые экспериментальные работы, выполненные на животных, позволили определить режимы насыщения крови кислородом под повышенным давлением с целью создания оптимальных условий для защиты организма в разных температурных условиях (нормотермии, поверхностной, умеренной и глубокой гипотермии), а также при различной патологии. Уже в 1970 г. была введена в строй полноценная барооперационная, и в ней полученный в эксперименте опыт был с успехом внедрен в клиническую практику. В общей сложности Л.А. Бокерия выполнил более 230 операций на открытом сердце в условиях ГБО под давлением 3–3,5 абсолютных атмосферы (рис. 1). В 1974 г. вышла в свет монография В.И. Бураковского и Л.А. Бокерия «Гипербарическая оксигенация в сердечно-сосудистой хирургии», а в 1976 г. коллектив авторов, занимавшихся клинико-экспериментальными исследованиями по использованию ГБО в кардиохирургии (В.И. Бура-



Рис. 1. Операция в барооперационной Института сердечно-сосудистой хирургии имени А.Н. Бакулева АМН СССР (из архива ФГБУ «НМИЦ ССХ им. А.Н. Бакулева» Минздрава России).

Fig. 1. Operation in the barooperative room of the A.N. Bakulev Institute of Cardiovascular Surgery Academy of Medical Sciences of the USSR (from the archive of A.N. Bakulev National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation).

ковский, Л.А. Бокерия, В.А. Бухарин), был удостоен высшей научной награды СССР — Ленинской премии. Активные исследования интраоперационного применения ГБО в кардиохирургии в институте сердечно-сосудистой хирургии продолжались вплоть до конца 90-х годов и были направлены на

уточнение показаний и противопоказаний к применению метода, а также разработку безопасных режимов работы медицинского персонала в условиях повышенного давления кислорода [3, 4].

Клиническое использование ГБО подкреплялось также активной научной работой, координируемой созданным в 1974 г. крупнейшим в Европе бароцентром (барогоспиталем), входившим в состав Всесоюзного научно-исследовательского института клинической и экспериментальной хирургии (в настоящее время Российский научный центр хирургии имени академика Б.В. Петровского). Под руководством академика РАН С.Н. Ефуни только за последние 10 лет работы бароцентра было проведено более 120 тыс. сеансов ГБО больным с различной патологией как в одноместных, так и многоместных барокамерах, выполнено более 600 операций в условиях повышенного давления кислорода у пациентов с высокой степенью операционного риска (рис. 2, 3).

В бароцентре путем естественного родоразрешения и оперативных пособий появилось на свет более 160 детей, чьи матери страдали тяжелыми пороками сердца. Монография С.Н. Ефуни «Руководство по гипербарической оксигенации», вышедшая в 1986 г., и в настоящее время является крупнейшим отечественным руководством, охватывающим множество теоретических и практических аспектов гипербарической медицины. Большое количество клинических и экспериментальных исследований позволило сформировать обширную теоретическую



Рис. 2. Бароцентр Всесоюзного НИИ клинической и экспериментальной хирургии Минздрава СССР (из архива кафедры анестезиологии и реаниматологии ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России).

Fig. 2. Barocenter of the All-Union Research Institute of Clinical and Experimental Surgery of the Ministry of Health of the USSR (from the archive of anesthesiology and intensive care department of the Russian Medical Academy of Continuous Professional Education of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation).



Рис. 3. Операция в барооперационной бароцентра (из архива кафедры анестезиологии и реаниматологии ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России).

Fig. 3. Operation in the barooperative room of the Barocenter (from the archive of anesthesiology and intensive care department of the Russian Medical Academy of Continuous Professional Education of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation).

базу для использования ГБО в различных клинических ситуациях — в кардиореаниматологии (В.В. Родионов), неврологии (М.В. Высоцкий), при гнойно-септических состояниях (Г.И. Лыскин). Огромную роль в развитии теоретических вопросов гипербарической медицины сыграла уникальная биохимическая лаборатория (Е.А. Демуров) [5, 6].

Ликвидация в начале 90-х годов во многом уникального бароцентра, а также закрытие многих отделений ГБО резко снизили интенсивность научных исследований и интерес к применению метода среди клиницистов. В это же время за рубежом с середины 90-х годов интерес к ГБО как методу лечения острых патологических состояний и ряда хронических заболеваний начал неуклонно расти, что позволило некоторым авторам говорить даже о возрождении и новом витке развития ГБО. Например, по данным крупнейших национальных и международных ассоциаций специалистов в области подводной и гипербарической медицины, таких как Европейское подводное и биомедицинское общество (European Underwater and Baromedical Society, EUBS), Подводное и гипербарическое медицинское общество (Undersea and Hyperbaric Medical Society, UHMS) и Европейский комитет по гипербарической медицине (European Committee on Hyperbaric Medicine, ECHM), к настоящему времени в Европе функционирует не менее 400, а в США — более 1300 подразделений ГБО, оснащенных одностанными и/или многостанными воздушными барокомплексами. Большая часть подобных подразделений в Европе и не менее 1/3 в США включены в структуру крупных многопрофильных лечебных учреждений, исследовательских центров и университетских клиник [1, 7].

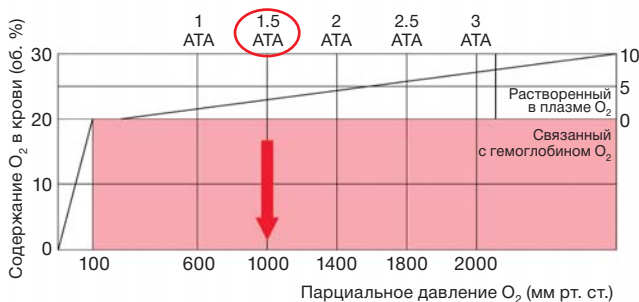


Рис. 4. Изменение содержания кислорода в крови (об. %) под воздействием гипербарической оксигенации (адаптировано из [8]).

Примечание. ATA — абсолютное давление (кгс/см²).

Fig. 4. Changing content of oxygen in blood (vol. %) under the hyperbaric oxygenation (adapted from [8]).

Note: ATA — absolute pressure (kgf/cm²).

Аналогичный рост интереса к использованию ГБО в комплексной терапии целого ряда заболеваний и патологических состояний наблюдается в Китае, Австралии, Японии, Израиле, Турции и других регионах мира, особенно экономически развитых и быстроразвивающихся [1, 7].

МЕХАНИЗМЫ ЛЕЧЕБНОГО ДЕЙСТВИЯ ГИПЕРБАРИЧЕСКОЙ ОКСИГЕНАЦИИ

Антигипоксический и гипероксический эффект

Практически с самого начала клинического применения ГБО в отечественной школе выделяли антигипоксический и гипероксический эффекты использования кислорода под давлением. И если антигипоксический эффект более или менее известен практикующим врачам, то гипероксический часто лежит за пределами их понимания.

Традиционное использование ГБО как антигипоксического метода основывается на известных законах физики. При нормальном объеме кровотока ГБО позволяет создать значительные запасы кислорода в жидких средах организма посредством резкого увеличения капиллярно-тканевого градиента по кислороду, а в условиях гипотермии — также за счет увеличения коэффициента проницаемости кислорода (рис. 4). Повышение растворимости кислорода в плазме в условиях ГБО может быть использовано для компенсации сниженной кислородной емкости крови и служить неким «протезирующим» методом, позволяющим выигрывать время при проведении радикальных лечебных мероприятий. Это приобретает особую значимость, например, при выполнении кардиохирургических операций в условиях искусственного кровообращения с высокой степенью гемодилюции. Профилактика циркуляторной гипоксии, возникающей при снижении минутного объема кровотока, при использовании ГБО достигается также за счет поддержания необходимого объема тканевой перфузии вследствие улучшения сократительной способности миокарда. При этом создание кислородного резерва позволяет надежно профилактировать гипоксическое повреждение структуры и нарушение функции различных физиологических систем организма (в первую очередь, сердечно-сосудистой и центральной нервной) [7, 8].

Необходимо отметить, что в периоде, непосредственно следующем за сеансом ГБО, происходит постепенное исчезновение избытка кислорода, попавшего в организм при проведении сеанса.

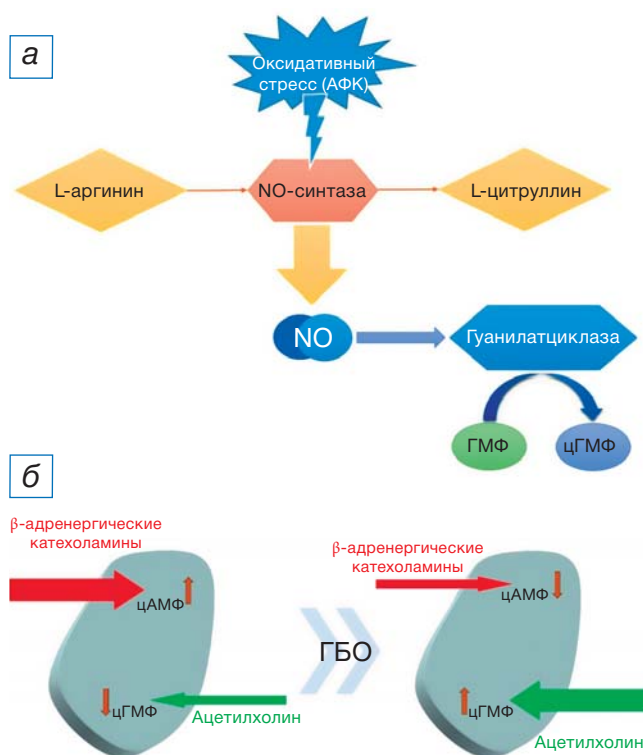


Рис. 5. Схема изменения соотношения вторичных мессенджеров под воздействием гипербарической оксигенации: а — активация NO-синтазы под действием оксидативного стресса; б — изменение соотношения цАМФ и цГМФ в клетке. АФК — активная форма кислорода; ГБО — гипербарическая оксигенация; цАМФ — циклический аденозинмонофосфат; цГМФ — циклический гуанозинмонофосфат.

Fig. 5. Scheme of changing ratio of the secondary messengers under the hyperbaric oxygenation: а — NO-synthase activation under oxidative stress; б — changing ratio of cAMP and cGMP in a cell. АФК — active oxygen form; ГБО — hyperbaric oxygenation; цАМФ — cyclic adenosine monophosphate; цГМФ — cyclic guanosine monophosphate.

Антигипоксический эффект при этом сохраняется, но уже является следствием не увеличенной доставки и утилизации кислорода, а влияния на функционирование кислородного каскада за счет изменения соотношения вторичных мессенджеров (рис. 5) и увеличения эффективности окислительного фосфорилирования [7–9].

К антигипоксическим эффектам ГБО можно отнести восстановление энергетических ресурсов и сократительной способности миокарда, уменьшение периферического шунтирования и восстановление органной перфузии, улучшение реологических свойств крови, увеличение эластичности эритроцитов и нормализацию сродства гемоглобина к кислороду, а также улучшение вен-

тиляционной функции легких вследствие снижения интерстициального отека альвеолокапиллярной мембраны и уменьшения функционального объема кишечника (так называемое «антигипоксическое последствие»). Немаловажную роль в восстановлении нормального соотношения между доставкой кислорода и его потреблением играет также α-адреноблокирующий эффект ГБО. Именно «антигипоксическое последствие» обуславливает относительную стойкость лечебного эффекта сеанса ГБО. В то же время гипероксический эффект ГБО заключается в провокации окислительного стресса и стимуляции реакций, вовлеченных в противодействие данному процессу. При этом создание посредством краткого и интенсивного воздействия ГБО дозированного окислительного стресса приводит к активации синтеза ферментов антиоксидантной системы, что позволяет в дальнейшем снижать негативные эффекты избыточного образования активных форм кислорода [8, 10].

Следует отметить, что продукция и накопление различных активных форм кислорода во время ишемии с последующим повреждением сосудистой стенки (увеличение ее проницаемости и выход в интерстиций плазмы и форменных элементов с развитием отека и воспаления) и форменных элементов крови (развитие стаза эритроцитов и микротромбоза) лежит в основе патофизиологии реперфузионного синдрома. В многочисленных экспериментальных и клинических исследованиях установлено, что в период ишемии угнетается активность антиоксидантной системы. Увеличение емкости и активности данной системы при использовании ГБО значительно уменьшает повреждающее действие большого количества образующихся активных форм кислорода, что позволяет достичь необходимого равновесия, не останавливая процесса. Применение ГБО в предоперационном периоде дает возможность провести подготовку антиоксидантной системы к предстоящему всплеску перекисного окисления (так называемое ишемическое прекондиционирование) [7, 11–14].

Адаптивный эффект

Эффект управляемого оксидативного стресса обуславливает и адаптивное действие ГБО, которое реализуется через систему нейрогуморальной регуляции посредством стимуляции или ингибирования метаболической активности различных клеток.

Важным компонентом нейрогуморальной регуляции является эндокринное звено, включающее надпочечники, гипоталамус и кору больших полушарий. Гипероксия посредством воздействия на хеморецепторы способствует уменьшению симпатического воздействия на сердечно-сосудистую систему, снижению высвобождения и увеличению запасов норадреналина в сердечной мышце и адреналина в надпочечниках. Таким образом, ГБО можно рассматривать в качестве неспецифического эффектора регуляции симпатoadреналовой системы, обуславливающего уменьшение ее активности и профилактику гиперметаболизма [7, 8].

Влияние на раневой процесс

В зависимости от фазы раневого процесса эффекты ГБО различны.

Эффекты ГБО в первой фазе раневого процесса заключаются в уменьшении проницаемости капилляров, снижении миграции и увеличении эффективности первичного фагоцитоза за счет активации в нейтрофилах «респираторного взрыва», усилении лимфообразования и лимфооттока, уменьшении дегрануляции тучных клеток, потенцировании образования демаркационной зоны, повышении интенсивности экссудации и резорбции раневого отделяемого в капилляры, активации миграции макрофагов в рану. Данные процессы приводят к повышению эффективности и сокращению сроков первой фазы раневого процесса [7, 8, 15, 16].

Эффекты ГБО во второй фазе раневого процесса обусловлены потенцированием формирования грануляционной ткани, стимуляцией эпителизации, регуляцией процессов синтеза и распада коллагена, моделированием гипоксического эффекта на фоне гипероксии (эффект «относительной гипоксии» без отрицательных последствий недостатка кислорода), потенцирующего процессы синтеза коллагена и неоангиогенез. Все это обуславливает интенсификацию второй фазы раневого процесса на фоне эффекта «относительной гипоксии» и приводит к закономерному сокращению ее сроков [7, 8, 15, 16].

Важно отметить, что различные фазы раневого процесса требуют применения разных режимов и длительности воздействия ГБО, что диктует необходимость четкого определения фазы раневого процесса.

Антимикробный эффект

Помимо прямого антимикробного действия активных форм кислорода, применение ГБО способствует повышению эффективности антимикробных

препаратов. Это происходит за счет увеличения активности антибиотиков, облегчения и ускорения их проникновения в зону воспаления, снижения общетоксического действия и увеличения продолжительности постантибиотического эффекта. Ускорение поступления антимикробных препаратов в зону воспаления происходит за счет уменьшения периферического шунтирования, улучшения микроциркуляции, уменьшения отека в зоне воспаления и снижения миграции нейтрофилов [7, 8].

ПРИМЕНЕНИЕ ГИПЕРБАРИЧЕСКОЙ ОКСИГЕНАЦИИ НА ДООПЕРАЦИОННОМ ЭТАПЕ

Нестабильная стенокардия и ишемическая болезнь сердца

В литературе встречаются примеры успешного применения ГБО при нестабильной стенокардии и остром инфаркте миокарда [17–22]. Однако данные работы носят характер клинического эксперимента и не признаются большинством кардиологов. В патогенезе нестабильной стенокардии одна из ключевых ролей принадлежит повреждающему действию активных форм кислорода, а лечебный диапазон использования ГБО достаточно узок, что обуславливает высокий риск гиперпродукции активных форм кислорода и ухудшения состояния миокарда [23–25].

Более эффективно и безопасно можно использовать ГБО для подготовки ишемизированного миокарда к предстоящему оперативному вмешательству. Особенно это актуально для больных с обширным поражением коронарного русла, исходно низкими резервами миокарда и наличием постинфарктной аневризмы левого желудочка. Прекондиционирование миокарда в условиях ГБО способно уменьшить кислородную задолженность и повысить резистентность кардиомиоцитов к ишемии, что в условиях предстоящей ишемии миокарда во время пережатия аорты становится особенно актуально при длительных многокомпонентных кардиохирургических вмешательствах [6, 25–32].

Инфекционный эндокардит

Применение ГБО в сочетании с антибактериальной и дезинтоксикационной терапией на этапе предоперационной подготовки у пациентов с инфекционным эндокардитом приведет к уменьшению выраженности и активности инфекционного процесса, а также снижению степени деструкции тканей, что сделает возможным применение реконструктивных методик [33, 34].

ПРИМЕНЕНИЕ ГИПЕРБАРИЧЕСКОЙ ОКСИГЕНАЦИИ НА ЭТАПЕ ПОСЛЕОПЕРАЦИОННОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ

Ишемическая болезнь сердца и реперфузия миокарда

Применение ГБО в послеоперационном периоде у больных ишемической болезнью сердца способствует увеличению поступления кислорода в миокард и ускоряет метаболические процессы, что способствует более быстрому выведению токсических продуктов. Это позволяет снизить проявления реперфузионного синдрома, что особенно актуально у пациентов с большим объемом поражения коронарного русла, тяжелым течением ишемической болезни сердца и длительным временем интраоперационной ишемии миокарда (например, при выполнении помимо прямой реваскуляризации миокарда реконструктивных вмешательств на левом желудочке или клапанах сердца) [6, 11, 14, 26, 27, 29–32, 35, 36].

Основными проявлениями реперфузии миокарда в послеоперационном периоде являются миокардиальная слабость и различные нарушения ритма сердца: в среднем частота данных осложнений составляет 3–5 и 40–45% соответственно [33, 34, 37–40]. Соответственно, применение ГБО позволяет нивелировать такие клинические проявления реперфузионного синдрома, как нестабильность центральной гемодинамики, транзиторная сердечная недостаточность и нарушения ритма, а следовательно, ускорить восстановительный период у данной категории больных и улучшить качество их реабилитации [13, 26, 29, 30, 31, 34].

Системные реперфузионные осложнения

Проблема отрицательного влияния искусственного кровообращения на органы и ткани не теряет своей актуальности на современном этапе развития кардиохирургии. Нефизиологичность аппаратного кровотока и частое несоответствие объема кровоснабжения потребностям органов и тканей обуславливает развитие их ишемии с последующим реперфузионным синдромом в послеоперационном периоде [33, 34].

Проявлениями этих процессов становятся снижение диффузионной функции легких с формированием транзиторной дыхательной недостаточности, транзиторная почечная недостаточность, послеоперационный панкреатит, послеоперационный парез кишечника, острое нарушение мозгового кровообращения, постгипоксическая энцефалопатия, невриты [37–40].

В настоящее время единого регистра внекардиальных осложнений после кардиохирургических операций в условиях искусственного кровообращения не существует, и приводимые различными авторами данные значительно варьируют. В среднем частота развития внекардиальных осложнений такова: транзиторная дыхательная недостаточность — 2–3%, транзиторная почечная недостаточность — 2–3%, послеоперационный панкреатит — 4–5%, послеоперационный парез кишечника — 3–4%, острое нарушение мозгового кровообращения — 3–5%, постгипоксическая энцефалопатия — 30–40%, невриты — 2–4%.

Следует заметить, что одним из важнейших механизмов ГБО является улучшение органной перфузии, поэтому применение ГБО позволяет нивелировать негативные последствия ишемии и реперфузии на органном уровне. Это будет способствовать снижению частоты вышеуказанных осложнений и предупреждению развития полиорганной недостаточности в послеоперационном периоде, особенно у коморбидных пациентов, и в целом ускорит послеоперационное восстановление [8, 12, 41].

Клапаны сердца

Хирургия клапанов сердца является сложной проблемой современной кардиохирургии. Активное развитие и внедрение в практику реконструктивных методик ставит новые вопросы. Появление новых данных о патофизиологических процессах, протекающих в тканях створок клапанов, способствует поиску новых мишеней фармакологического и физического воздействия. В частности, описаны процессы гистологической перестройки ткани створок митрального клапана под влиянием хронической ишемии миокарда у пациентов с ишемической болезнью сердца. Воздействие ГБО на данное звено патогенеза потенциально способно приводить к обратному ремоделированию ткани створок, что, например, будет способствовать улучшению результатов реконструктивных операций на митральном клапане при недостаточности ишемического генеза и предупреждению развития рецидива митральной недостаточности в отдаленном послеоперационном периоде [42–44].

Другим перспективным направлением применения ГБО является улучшение заживления тканей при реконструкции клапанов с использованием аутоперикарда (реконструкция створок, операция Озаки).

Следует отметить, что применение ГБО при клапанной патологии требует дальнейшего активного изучения.

Инфекционный эндокардит

Положительное влияние ГБО при лечении инфекционных процессов доказано неоднократно. Применение данного метода приобретает особое значение при инфекционном поражении сердечных структур. Во время оперативного вмешательства не всегда удается добиться 100% санации инфекционного очага вследствие затрудненного доступа к определенным сердечным структурам и необходимости ограничения элиминации инфекционно-измененных тканей. При этом успех оперативного вмешательства в частности и лечения в целом во многом зависит от эффективности антибактериальной терапии, в особенности при имплантации механических клапанных протезов [33, 34, 45, 46].

Метод ГБО обладает как непосредственным антимикробным действием, так и потенцирует действие антибактериальных препаратов, что позволяет повышать эффективность и сокращать сроки лечения у данной категории пациентов.

Медиастинит и гнойные осложнения

Несмотря на активное развитие миниинвазивных технологий в кардиохирургии, в значительном количестве случаев оперативные вмешательства выполняются из стандартного стернотомного доступа. Забор венозного аутооттрансплантата подразумевает также достаточно большой объем интраоперационной травматизации. А неуклонный рост числа пациентов с множественной сопутствующей патологией (в частности, сахарным диабетом, генерализованным атеросклерозом, метаболическими нарушениями) обуславливает актуальность проблемы замедленного заживления и нагноения послеоперационных ран [33, 34, 45, 46].

В современных условиях средняя частота развития инфекционных осложнений у кардиохирургических пациентов составляет 2–4% [45–47].

Применение ГБО в послеоперационном периоде у пациентов с замедленным заживлением и нагноением послеоперационных ран способствует улучшению репаративных процессов, усиливает действие антибактериальной терапии, а также обладает иммуномодулирующим эффектом, что при адекватной системной антибактериальной терапии и местном лечении позволит ускорить течение раневого процесса, улучшит заживление послеоперационных ран и позволит избежать повторных оперативных вмешательств, что, безусловно, сократит сроки послеоперационной реабилитации и повысит ее качество [15, 16, 48].

Применение ГБО при серозном и гнойном медиастините, возникающем в исходе кардиохирургиче-

ских вмешательств, требует дальнейшего изучения в вопросах эффективности и безопасности. Общие закономерности влияния ГБО на инфекционный процесс обуславливают повышение эффективности антибактериальной терапии и снижение интоксикации, однако в большинстве случаев остается необходимость хирургического устранения источника инфекции (санация средостения, реостеосинтез грудины) [24, 45–47].

Иммунодефицитные состояния

Особой проблемой нашего времени является увеличение числа пациентов с иммунодефицитными состояниями, обусловленными различными причинами (ВИЧ, иммуносупрессивная терапия, химиотерапия, метаболические нарушения, интоксикации, длительные инфекционные заболевания, нерациональная антибиотикотерапия). К одной из новейших причин снижения иммунного статуса организма можно отнести постковидный синдром [33, 34, 45].

Кардиохирургические вмешательства у данной категории пациентов сопряжены с высоким риском, в том числе вследствие осложненного течения послеоперационного периода. Применение ГБО позволит снизить риск развития инфекционных осложнений и ускорить репаративные процессы, что будет способствовать сокращению сроков послеоперационной реабилитации [7, 8, 24, 25].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Положительный эффект применения ГБО при широком спектре клинических сценариев, возникающих на различных этапах кардиохирургической помощи, не вызывает сомнений. В связи с этим целесообразно внедрение данного метода в кардиохирургическую практику. Использование ГБО приведет не только к улучшению результатов хирургического лечения кардиохирургических пациентов, но и к сокращению сроков предоперационной подготовки и послеоперационной реабилитации, что помимо клинического будет иметь значимый социальный, организационный и экономический эффект.

Внедрению ГБО в кардиохирургическую практику будут способствовать разработка современных методических рекомендаций, предусматривающих в том числе оптимальное расположение отделения ГБО в непосредственной близости от отделений реанимации и интенсивной терапии, что позволит сократить перемещения пациентов и обеспечит возможность выполнения сеансов ГБО даже у тяжелых больных.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. В.В. Крылов — анализ литературы, написание статьи, коррекция статьи, общее руководство; Е.Я. Колчина — методологическое обеспечение, корректура статьи. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Authors' contribution. V.V. Krylov — analysis of literature, writing the manuscript, editing the manuscript, general guidance; E.Ya. Kolchina — methodological support, proofreading of the manuscript. The authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Источник финансирования. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Funding source. The study had no sponsorship.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Акалаев Р.Н., Борисова Е.М., Евдокимов Е.А., и др. Гипербарическая медицина: история становления и путь развития // *Вестник экстренной медицины*. 2014. № 1. С. 85–94. [Akalaev RN, Borisova EM, Evdokimov EA, et al. Hyperbaric medicine: the history of formation and path of development. *Bulletin of Emergency Medicine*. 2014;(1):85–94. (In Russ).]
- Edwards ML. Hyperbaric oxygen therapy. Part 1: history and principles. *J Veterinary Emergency Critical Care (San Antonio)*. 2010;20(3):284–288. doi: 10.1111/j.1476-4431.2010.00535.x
- Бураковский В.И., Бокерия Л.А. Гипербарическая оксигенация в сердечно-сосудистой хирургии. Москва: Медицина, 1974. 236 с. [Burakovskii VI, Bokeriia LA. Hyperbaric oxygen therapy in cardiovascular surgery. Moscow: Meditsina; 1974. 236 p. (In Russ).]
- Бокерия Л.А., Глянцев С.П., Сафина И.Р. Предшествующий опыт и результаты экспериментальной научно-исследовательской работы в НИИЦ ССХ им. А.Н. Бакулева (1956–1976 гг.) // *Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН «Сердечно-сосудистые заболевания»*. 2018. Т. 19, № 4. С. 570–579. [Bokeriia LA, Gliantsev SP, Safina IR. Previous experience and results of experimental research work at the A.N. Bakulev National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery (1956–1976). *Biulleten NCSH im. A.N. Bakuleva RAMN «Cardiovascular diseases»*. 2018;(4):570–579. (In Russ).] doi: 10.24022/1810-0694-2018-19-4-570-579
- Петровский Б.В., Ефуни С.Н. Основы гипербарической оксигенации. Москва: Медицина, 1976. 344 с. [Petrovskii BV, Efuni SN. Fundamentals of hyperbaric oxygenation. Moscow: Meditsina; 1976. 344 p. (In Russ).]
- Ефуни С.Н. Руководство по гипербарической оксигенации. Москва: Медицина, 1986. 267 с. [Efuni SN. Guide to hyperbaric oxygen therapy. Moscow: Meditsina; 1986. 267 p. (In Russ).]
- Ortega MA, Fraile-Martinez O, Garcia-Montero C, et al. A general overview on the hyperbaric oxygen therapy: applications, mechanisms and translational opportunities. *Med (Kaunas)*. 2021;57(9):864–889. doi: 10.3390/medicina57090864
- Jain KK. Textbook of Hyperbaric Medicine, 6th ed. Cham: Springer International Publishing AG; 2017. 640 p. doi: 10.1007/978-3-319-47140-2
- Петровский Б.В., Ефуни С.Н., Демуров Е.А., Родионов В.В. Гипербарическая оксигенация и сердечно-сосудистая система. Москва: Наука, 1987. 328 с. [Petrovskii BV, Efuni SN, Demurov EA, Rodionov VV. Hyperbaric oxygen therapy and the cardiovascular system. Moscow: Nauka; 1987. 328 p. (In Russ).]
- Сазонтова Т.Г. Адаптация организма к изменению уровня кислорода — к гипоксии и гипероксии: роль активных форм кислорода и редокс-сигнализации // *Вопросы гипербарической медицины*. 2006. № 1. С. 4–19. [Sazonova TG. Adaptation of the body to changes in the level of oxygen — to hypoxia and hyperoxia: the role of reactive oxygen species and redox-signalisation. *Questions of hyperbaric medicine*. 2006;(1):4–19. (In Russ).]
- Francis A, Baynosa R. Ischaemia-reperfusion injury and hyperbaric oxygen pathways: a review of cellular mechanisms. *Diving Hyperbaric Med*. 2017;47(2):110–117. doi: 10.28920/dhm47.2.110-117
- Hentia C, Rizzato A, Camporesi E, et al. An overview of protective strategies against ischemia/reperfusion injury: the role of hyperbaric oxygen preconditioning. *Brain Behavior*. 2018;8(5):e00959. doi: 10.1002/brb3.959
- Godman CA, Chheda KP, Hightower LE, et al. Hyperbaric oxygen induces a cytoprotective and angiogenic response in human microvascular endothelial cells. *Cell Stress and Chaperones*. 2010;15(4):431–442. doi: 10.1007/s12192-009-0159-0
- Леонов А.Н. Гипероксия. Адаптационно-метаболическая концепция саногенеза // *Бюллетень гипербарической биологии и медицины*. 1994. № 1. С. 51–75. [Leonov AN. Hyperoxia. Adaptive-metabolic concept of sanogenesis. *Bulletin Hyperbaric Biol Med*. 1994;(1):51–75. (In Russ).]
- Lindenmann J, Smolle C, Kamolz LP, et al. Survey of molecular mechanisms of hyperbaric oxygen in tissue repair. *Int J Mol Sci*. 2021;22(21):11754. doi: 10.3390/ijms222111754
- Baiula M, Greco R, Ferrazzano L, et al. Integrin-mediated adhesive properties of neutrophils are reduced by hyperbaric oxygen therapy in patients with chronic non-healing wound. *PLOS ONE*. 2020;15(8):e0237746. doi: 10.1371/journal.pone.0237746
- Николаева А.А., Николаева Е.И., Попова Л.В., и др. Динамика адаптационных индексов, перекисное окисление липидов и антиоксидантная защита при нестабильной стенокардии // *Кардиология*. 1998. Т. 38, № 7. С. 16–21. [Nikolaeva AA, Nikolaeva EI, Popova LV, et al. Dynamics of adaptive indices, lipid peroxidation and antioxidant protection in unstable angina pectoris. *Cardiology*. 1998;38(7):16–21. (In Russ).]
- Жданов Г.Г., Соколов И.М. Новые пути использования ГБО при остром инфаркте миокарда // *Гипербарическая физиология и медицина*. 1998. № 1. С. 13–20. [Zhdanov GG, Sokolov IM. New ways of using HBO in acute myocardial infarction. *Hyperbaric Physiol Med*. 1998;(1):13–20. (In Russ).]
- Mehta SR, Cannon CP, Fox KA, et al. Routine vs selective invasive strategies in patients with acute coronary syndromes: a collaborative meta-analysis of randomized trial. *J Am Med Association*. 2005;293(23):2908–2917. doi: 10.1001/jama.293.23.2908
- Саливончик Д.П. Гипербарическая оксигенация при остром коронарном синдроме: современные предпосылки (обзор литературы) // *Проблемы здоровья и экологии*. 2009. Т. 1, № 19. С. 35–42. [Salivonchik DP. Hyperbaric oxygen therapy in acute coronary syndrome: current background (literature review). *Health Environmental Issues*. 2009;1(19):35–42. (In Russ).]
- Саливончик Д.П. Немедикаментозная терапия ИБС: роль и место гипербарической оксигенации (обзор литературы) // *Проблемы здоровья и экологии*. 2012. № 1. С. 27–36. [Salivonchik DP. Non-drug therapy of coronary artery disease: the role and place of hyperbaric oxygen therapy (literature review). *Health Environmental Issues*. 2012;1(31):27–36. (In Russ).]
- Bennett MH, Lehm JP, Jepson N. Hyperbaric oxygen therapy for acute coronary syndrome. *Cochrane Database Systematic Review*. 2015;2015(7):CD004818. doi: 10.1002/14651858.CD004818.pub4

23. Vlahovic A, Nesković AN, Dekleva M, et al. Hyperbaric oxygen treatment does not affect left ventricular chamber stiffness after myocardial infarction treated with thrombolysis. *Am Heart J*. 2004;148(1):e1. doi: 10.1016/j.ahj.2004.02.009
24. Mathieu D, Marroni A, Kot J. Tenth European Consensus Conference on Hyperbaric Medicine: recommendations for accepted and non-accepted clinical indications and practice of hyperbaric oxygen treatment. *Diving Hyperbaric Med*. 2017;47(1):24–32. doi: 10.28920/dhm47.1.24-32
25. Гипербарическая медицина: практическое руководство / под ред. Д. Матъе; пер. с англ. Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 720 с. [Hyperbaric medicine: a practical guide. Ed. by D. Mate; transl. from English. Moscow: BINOM. Laboratory Knowledge; 2009. 720 p. (In Russ).]
26. Tabrah FL, Tanner R, Vega R, Batkin S. Baromedicine today — rational uses of hyperbaric oxygen therapy. *Hawaii Med J*. 1994;53(4):112–119.
27. Пархоменко А.Н. Жизнеспособный миокард и кардиопротекция: возможности метаболической терапии при острой и хронической формах ишемической болезни сердца // *Украинский медицинский журнал*. 2001. Т. 3, № 23. С. 5–11. [Parkhomenko AN. Viable myocardium and cardioprotection: possibilities of metabolic therapy in acute and chronic forms of coronary heart disease. *Ukr Med J*. 2001;3(23):5–11. (In Russ).]
28. Доценко Э.А., Саливончик Д.П. Современная роль гипербарической оксигенации в терапии кардиоваскулярных заболеваний // *Проблемы здоровья и экологии*. 2010;3(25):58–64. [Dotsenko EA, Salivonchik DP. The modern role of hyperbaric oxygen therapy in the treatment of cardiovascular diseases. *Health Environmental Issues*. 2010;3(25):58–64. (In Russ).]
29. Li Y, Dong H, Chen M, et al. Preconditioning with repeated hyperbaric oxygen induces myocardial and cerebral protection in patients undergoing coronary artery bypass graft surgery: a prospective, randomized, controlled clinical trial. *J Cardiothoracic Vascular Anesthesia*. 2011;25(6):908–916. doi: 10.1053/j.jvca.2011.06.017
30. Allen MW, Golembe E, Gorenstein S, Butler GJ. Protective effects of hyperbaric oxygen therapy (HBO2) in cardiac care. A proposal to conduct a study into the effects of hyperbaric preconditioning in elective coronary artery bypass graft surgery (CABG). *Undersea Hyperbaric Med*. 2015;42(2):107–114.
31. Yin X, Wang X, Fan Z, et al. Hyperbaric oxygen preconditioning attenuates myocardium ischemia-reperfusion injury through upregulation of heme oxygenase 1 expression: PI3K/Akt/Nrf2 pathway involved. *J Cardiovascul Pharmacol Therapeutics*. 2015;20(4):428–438. doi: 10.1177/1074248414568196
32. Chen C, Chen W, Li Y, et al. Hyperbaric oxygen protects against myocardial reperfusion injury via the inhibition of inflammation and the modulation of autophagy. *Oncotarget*. 2017;8(67):111522–111534. doi: 10.18632/oncotarget.22869
33. Kouchoukos NT, Blackstone EH, Hanley FL, Kirklin JK. Kirklin/barratt-boyes cardiac surgery: morphology, diagnostic criteria, natural history, techniques, results, and indications. 4th ed. Philadelphia: Elsevier Saunders, 2013. 2256 p.
34. Ziemer G, Haverich A. Cardiac surgery: operations on the heart and great vessels in adults and children. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2017. 1158 p.
35. Киселев С.О. Новая версия саногенеза оксигенобаротерапии (адаптационно-физиологическая концепция) // *Гипербарическая физиология и медицина*. 1998. № 2. С. 3–14. [Kiselev SO. New version of sanogenesis of oxygenobarotherapy (adaptive-physiological concept). *Hyperbaric Physiol Med*. 1998;(2):3–14. (In Russ).]
36. Гордеев М.Л. Осложненные формы ИБС. Хирургия ремоделированного левого желудочка. Москва: ИД Академии им. Н.Е. Жуковского, 2019. 432 с. [Gordeev ML. Complicated forms of ischemic heart disease. Surgery of the remodeled left ventricle. Moscow: ID Akademii im. N.E. Zhukovskog; 2019. 432 p. (In Russ).]
37. Бураковский В.И., Рапопорт Я.Л. Классификация ранних послеоперационных осложнений в хирургии сердца // *Грудная хирургия*. 1969. № 6. С. 3–10. [Burakowski VI, Rapoport YL. Classification of early postoperative complications in cardiac surgery. *Thoracic Sur*. 1969;(6):3–10. (In Russ).]
38. Бураковский В.И., Рапопорт Я.Л., Гельштейн Г.Г., и др. Осложнения при операциях на открытом сердце. Москва: Медицина, 1972. 304 с. [Burakovskiy VI, Rapoport YL, Gelshtein GG, et al. Complications of open-heart surgery. Moscow: Meditsina; 1972. 304 p. (In Russ).]
39. Strasberg SM, Linehan DC, Hawkins WG. The accordion severity grading system of surgical complications // *Annals Sur*. 2009;250(2):177–186. doi: 10.1097/SLA.0b013e3181afde41
40. Казарян А.М., Акопов А.Л. Российская редакция классификации осложнений в хирургии // *Вестник хирургии им. И.И. Грекова*. 2014. № 2. С. 86–91. [Kazaryan AM, Akopov AL. Russian edition of complications in surgery. *Bulletin Sur Named After I.I. Grekov*. 2014;(2):86–91. (In Russ).]
41. Yang ZJ, Bosco G, Montante A, et al. Hyperbaric O2 reduces intestinal ischemia-reperfusion-induced TNF-alpha production and lung neutrophil sequestration. *Eur J Applied Physiology*. 2001;85(1–2):96–103. doi: 10.1007/s004210100391
42. Rausch MK, Tibayan FA, Miller DC, Kuhl E. Evidence of adaptive mitral leaflet growth. *J Mechanical Behavior Biomed Materials*. 2012;15:208–217. doi: 10.1016/j.jmbbm.2012.07.001
43. Beaudoin J, Dal-Bianco JP, Aikawa E, et al. Mitral leaflet changes following myocardial infarction clinical evidence for maladaptive valvular remodeling. *Circulation: Cardiovascular Imaging*. 2017;10(11):e006512. doi: 10.1161/CIRCIMAGING.117.006512
44. Calafiore AM, Totaro A, Testa N, et al. The secret life of the mitral valve. *J Cardiac Sur*. 2021;36(1):247–259. doi: 10.1111/jocs.15151
45. Бокерия Л.А., Белобородова Н.В. Инфекция в кардиохирургии. Москва: НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН, 2007. 580 с. [Bokeria LA, Beloborodova NV. Infection in cardiac surgery. Moscow: NCSH im. A.N. Bakuleva RAMN; 2007. 580 p. (In Russ).]
46. Чернявский А.М., Таркова А.Р., Рузматов Т.М., и др. Инфекции в кардиохирургии // *Хирургия*. 2016. № 5. С. 64–68. [Chernyavsky AM, Tarkova AR, Ruzmatov TM, et al. Infections in cardiac surgery. *Surgery*. 2016;(5):64–68. (In Russ).] doi: 10.17116/hirurgia2016564-68
47. Antunes PE, Bernardo JE, Eugenio L, et al. Mediastinitis after aorto-coronary bypass surgery. *Eur J Cardio-Thoracic Sur*. 1997;12(3):443–449. doi: 10.1016/s1010-7940(97)00179-6
48. Zhang Q, Chang Q, Cox RA, et al. Hyperbaric oxygen attenuates apoptosis and decreases inflammation in an ischemic wound model. *J Invest Dermatol*. 2008;128(8):2102–2112. doi: 10.1038/jid.2008.53

ОБ АВТОРАХ

Автор, ответственный за переписку:

Крылов Владислав Викторович;

адрес: Россия, 129110, Москва, ул. Щепкина, д. 61/2;

e-mail: malus5@yandex.ru; eLibrary SPIN: 6115-4291;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2706-3496>

Соавтор:

Колчина Елена Яковлевна, к.м.н., доцент;

e-mail: kafedragbo@yandex.ru;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0671-9783>

AUTHORS' INFO

The author responsible for the correspondence:

Vladislav V. Krylov, MD;

address: 61/2, Shepkina street, Moscow, 129110 Russia;

e-mail: malus5@yandex.ru; eLibrary SPIN: 6115-4291;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2706-3496>

Co-author:

Elena Ya. Kolchina, MD, PhD, Associate Professor;

e-mail: kafedragbo@yandex.ru;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0671-9783>