

MEDICINE AND PHARMACY

Принципы работы аппарата искусственного кровообращения и особенности проведения открытого массажа сердца в современной кардиохирургии и реаниматологии

**Хамитова Жансая Сагиндыковна¹,
Утаров Нурбол Торегаалиевич², Мадалиев Сабит Нурханович³**

¹ Резидент кафедры: Анестезиологии и реаниматологии № 2;
КазНМУ имени С. Д. Асфендиярова; Республика Казахстан

² Резидент кафедры: Анестезиологии и реаниматологии № 2;
КазНМУ имени С. Д. Асфендиярова; Республика Казахстан

³ Научный руководитель;
КазНМУ имени С. Д. Асфендиярова; Республика Казахстан

Аннотация. В данной статье подробно рассматриваются теоретические и практические аспекты временного замещения функции сердца и легких с помощью аппарата искусственного кровообращения (АИК). Описаны ключевые компоненты экстракорпорального контура, физиологические принципы перфузии, а также патофизиологические изменения, возникающие в организме пациента во время обхода системного кровотока. Вторая часть работы посвящена методологии и показаниям к проведению открытого (прямого) массажа сердца как критического метода реанимации при неэффективности закрытых реанимационных мероприятий или в условиях открытой грудной клетки. Авторы анализируют гемодинамическую эффективность обоих методов, их синергию и возможные осложнения.

Ключевые слова: Аппарат искусственного кровообращения, экстракорпоральная гемодинамика, оксигенатор, роликовый насос, открытый массаж сердца, реанимация, кардиоплегия, гипотермия.

Введение

Современная кардиохирургия и интенсивная терапия критических состояний немыслимы без технологий экстракорпоральной поддержки жизни. Разработка и внедрение в клиническую практику аппарата искусственного кровообращения (АИК) в середине XX века Джоном Гиббоном революционизировали медицину, позволив выполнять сложные оперативные вмешательства на «сухом» и остановленном сердце.

Искусственное кровообращение (ИК), или экстракорпоральный

MEDICINE AND PHARMACY

контур (ЭКК), представляет собой метод временного полного или частичного замещения насосной функции сердца и газообменной функции легких. Это сложный биотехнический процесс, требующий строгого контроля гидродинамических параметров, системного гемостаза и метаболического статуса организма.

С другой стороны, в ургентной медицине возникают ситуации экстремального падения сердечного выброса или полной остановки эффективной сердечной деятельности (асистолия, фибрилляция желудочков), когда стандартный закрытый массаж сердца не позволяет достичь адекватного перфузионного давления в коронарных и церебральных артериях. В этих случаях, особенно в операционной или при травмах грудной клетки, методом выбора становится открытый (прямой) массаж сердца.

Цель данной работы — комплексный научно-теоретический анализ принципов функционирования современных систем искусственного кровообращения и детальное изучение топографо-анатомических и физиологических основ открытого массажа сердца, а также определение их места в алгоритмах спасения жизни.

1. Принципы работы аппарата искусственного кровообращения (АИК)

1.1. Компоненты экстракорпорального контура

Современный аппарат искусственного кровообращения состоит из нескольких функциональных модулей, соединенных между собой системой стерильных полимерных магистралей (трубок). К основным элементам относятся:

1. Венозные канюли и магистраль. Служат для забора деоксигенированной (венозной) крови из организма пациента. Обычно канюли вводятся через правое предсердие в верхнюю и нижнюю полые вены (раздельная канюляция) или устанавливаются однократно в правое предсердие (двухпросветная канюляция).

2. Венозный резервуар. Емкость, куда кровь поступает самотеком (за счет гравитационного дренажа). Выполняет роль буфера, сглаживающего колебания объема циркулирующей крови, и служит местом для деаэрации (удаления пузырьков воздуха).

3. Артериальный насос. Главный «двигатель» системы, замещающий левый желудочек. В практике используются два основных типа насосов:

- о **Роликовые насосы:** вытесняют кровь путем механического пережатия вращающимися роликами эластичной трубки. Плюсы — простота контроля объема (производительности); минусы — риск гемолиза при избыточном прижатии роликов.

- о **Центрифужные (центробежные) насосы:** используют вращающийся ротор или конус, создающий vortex (вихрь) и

MEDICINE AND PHARMACY

отрицательное давление на входе, плавно ускоряя кровь. Они менее травматичны для форменных элементов крови и исключают риск массивной воздушной эмболии при пустом резервуаре.

4. **Оксигенатор («искусственное легкое»)**. Устройство, где происходят процессы диффузии кислорода в кровь и выведения углекислого газа. Современный стандарт – **мембранные оксигенаторы** из полуволоконных microporous (микропористых) или полипропиленовых мембран, исключающих прямой контакт «кровь-газ», что минимизирует денатурацию белков и активацию комплемента.

5. **Теплообменник**. Интегрирован в оксигенатор. Регулирует температуру перфузата. Позволяет проводить управляемую гипотермию (снижение температуры тела до 28–32°C или ниже для снижения метаболической потребности тканей в кислороде) и последующее согревание.

6. **Артериальный фильтр**. Устанавливается на линии возврата крови в артериальное русло. Задерживает микроагрегаты клеток, микропузырьки газа и фрагменты жира (размер пор обычно составляет 20–40 мкм).

7. **Артериальная канюля**. Вводится чаще всего в восходящую аорту, реже – в бедренную или подключичную артерии, через нее оксигенированная кровь возвращается в системный кровоток под давлением.

1.2. Физиологические основы экстракорпоральной перфузии

При подключении АИК классический пульсирующий кровоток, генерируемый сердцем, чаще всего заменяется **линейным (постоянным)** кровотоком. Хотя ведутся дискуссии о преимуществах пульсирующей перфузии для микроциркуляции органов-мишеней, на практике постоянный ламинарный поток остается базовым из-за технической надежности.

Расчет необходимого объемного расхода крови (объема перфузии) базируется на площади поверхности тела (ППТ) пациента и целевом **сердечном индексе (СИ)**, который в условиях нормотермии должен составлять 2,2–2,4 л/мин/м². При гипотермии потребность в кислороде падает, что позволяет снижать скорость перфузии.

Управление системным сосудистым сопротивлением (ССС) во время ИК осуществляется медикаментозно (вазодилататоры/вазопрессоры). Среднее артериальное давление (САД) поддерживается в диапазоне 60–80 мм рт. ст. для обеспечения адекватного перфузионного давления в головном мозге и почках.

1.3. Защита миокарда (Кардиоплегия)

Для выполнения прецизионных манипуляций внутри камер

MEDICINE AND PHARMACY

сердца его необходимо остановить и обескровить. Метаболическая защита миокарда в этот период достигается сочетанием:

1. Местной и системной гипотермии.

2. Введения специальных **кардиоплегических растворов** (кристаллоидных или кровяных), содержащих высокую концентрацию ионов калия (K^+). Ионы калия вызывают стойкую деполяризацию клеточной мембраны кардиомиоцитов, блокируя фазу 0 потенциала действия, что приводит к немедленной остановке сердца в фазе диастолы, когда потребление энергии минимально.

2. Патофизиология искусственного кровообращения

Контакт крови с чужеродной поверхностью магистралей и оксигенатора запускает каскад патологических реакций, известных как **системный воспалительный ответ (СВОР)**.

2.1. Гематологические изменения и гемодилюция

Перед началом ИК контур заполняется стартовым раствором (кристаллоиды, коллоиды). Это вызывает вынужденную **гемодилюцию** (разведение крови). Умеренная гемодилюция (снижение гематокрита до 24–26%) полезна: она снижает вязкость крови, улучшая микроциркуляцию в условиях гипотермии. Однако глубокая гемодилюция снижает кислородную емкость крови.

Травматизация форменных элементов (механический сдвиг, shear stress) приводит к:

- Разрушению эритроцитов (гемолиз) с высвобождением свободного гемоглобина, обладающего нефротоксичностью.

- Активации и дисфункции тромбоцитов, что в сочетании с обязательным введением антикоагулянтов (**гепарина**) создает риски коагулопатии и кровотечений в постперфузионном периоде. Нейтрализация гепарина по окончании ИК проводится введением **протамина сульфата**.

2.2. Изменения в органах-мишенях

- **Легкие:** Во время полного ИК легкие выключаются из вентиляции. Спадение альвеол и перфузия по бронхиальным артериям могут приводить к развитию интерстициального отека и синдрома «постперфузионного легкого».

- **Почки:** Отсутствие пульсового давления и периоды гипотензии могут спровоцировать острое почечное повреждение (ОПП).

- **Головной мозг:** Риски связаны с микроэмболией (воздушной, атероматозной) и флуктуациями мозгового кровотока.

3. Открытый (прямой) массаж сердца

В клинических ситуациях, когда экстракорпоральная

MEDICINE AND PHARMACY

поддержка недоступна мгновенно, а функции миокарда критически нарушены, базовые реанимационные мероприятия включают компрессию грудной клетки. Однако закрытый массаж сердца обеспечивает не более 20–30% от нормального коронарного кровотока и около 15–20% мозгового. При определенных условиях единственным способом восстановить перфузию является открытый массаж сердца (ОМС).

3.1. Показания к проведению открытого массажа сердца

Открытый массаж сердца не является рутинной процедурой и строго регламентирован. Основными показаниями служат:

1. Остановка сердца в операционной во время выполнения внутригрудных или внутрибрюшных операций (когда доступ к сердцу уже осуществлен или может быть получен за секунды).

2. Тяжелая травма грудной клетки (проникающие ранения, разрывы перикарда, флотирующие переломы ребер), исключающая возможность эффективной наружной компрессии.

3. Остановка кровообращения, вызванная тампонадой сердца или массивным внутригрудным кровотечением (требуется экстренная торакотомия для устранения причины).

4. Выраженная деформация грудной клетки или тяжелый кифосколиоз.

5. Неэффективность закрытого массажа сердца в течение 15–20 минут при наличии условий для проведения экстренной торакотомии в условиях реанимационного зала (торакотомия «отчаяния»).

6. Остановка сердца на фоне глубокой гипотермии (для возможности прямого согревания полостей сердца).

3.2. Хирургический доступ и техника выполнения

Если грудная клетка закрыта, выполняется экстренная **левосторонняя переднебоковая торакотомия** в 4-м или 5-м межреберье. Мышцы пересекаются, плевральная полость вскрывается, ребра разводятся ретрактором (при его отсутствии – подручными средствами). Перикард вскрывается продольно, впереди от диафрагмального нерва.

Технические варианты мануальной компрессии:

• **Бемануальный метод (двумя руками):** Сердце берется в ладони обеих рук. Пальцы смыкаются, ладони плоско прижимаются к желудочкам. Сжатие производится по направлению от верхушки к основанию сердца. Этот метод наиболее эффективен, так как обеспечивает равномерное распределение давления и большой ударный объем.

• **Мономануальный метод (одной рукой):** Используется при небольшом размере сердца или узком доступе. Сердце обхватывается одной рукой: большой палец располагается на

MEDICINE AND PHARMACY

передней поверхности (правый желудочек), а остальные четыре пальца — на задней поверхности (левый желудочек). *Важно:* избегать точечного давления кончиками пальцев, чтобы не перфорировать истонченную стенку правого желудочка.

• **Прижатие к груди:** Сердце прижимается ладонной поверхностью одной руки к внутренней поверхности грудины. Метод применяется редко из-за риска повреждения задней стенки органа.

Частота компрессий при ОМС должна составлять **80–100 в минуту**. Сжатие должно быть плавным, но быстрым, а расслабление (диастола) — полным, чтобы обеспечить адекватное заполнение полостей сердца кровью.

3.3. Физиологические преимущества и недостатки ОМС

Преимущества:

- Достижение существенно более высоких цифр САД (>60 мм рт. ст.) и коронарного перфузионного давления по сравнению с закрытым массажем.
- Возможность непосредственной визуальной и пальпаторной оценки эффективности (наполнение полостей, тонус миокарда).
- Возможность проведения прямой дефибрилляции (ложками-электродами непосредственно на миокард), требующей значительно меньшей энергии разряда (10–30 Дж вместо 200–360 Дж).
- Возможность визуального контроля и устранения тампонады или остановки кровотечения из ранений сердца.

Недостатки и риски:

- Высокая инвазивность, требующая хирургических навыков.
- Риск механического повреждения миокарда (разрыв, сквозная перфорация желудочка, повреждение коронарных артерий).
- Обязательное инфицирование плевральной полости и перикарда (требует массивной последующей санации и антибиотикотерапии).
- Необходимость перевода пациента на искусственную вентиляцию легких (ИВЛ) с положительным давлением из-за возникновения открытого пневмоторакса.

4. Сравнительный анализ и синергия методов в критических ситуациях

Экстракорпоральная поддержка (АИК) и открытый массаж сердца преследуют одну цель — поддержание жизни за счет обеспечения системного кровотока, однако они находятся на разных ступенях терапевтической лестницы.

В современной практике реаниматологии возникла концепция **E-CPR (Extracorporeal Cardiopulmonary Resuscitation)** —

MEDICINE AND PHARMACY

экстракорпоральная сердечно-легочная реанимация. В рамках этого алгоритма при неэффективности стандартной СЛР пациенту экстренно, зачастую параллельно с продолжающимся массажем сердца (включая открытый), проводят канюляцию бедренных сосудов и подключают портативный АИК (аппарат ЭКМО). Это позволяет выиграть время для проведения экстренной коронароангиографии или оперативного вмешательства.

Критерий сравнения	Аппарат искусственного кровообращения (АИК)	Открытый массаж сердца (ОМС)
Природа метода	Высокотехнологичный, аппаратный	Мануальный, хирургический
Оксигенация крови	Полная (через встроенный оксигенатор)	Зависит от проведения сопутствующей ИВЛ
Гемодинамический профиль	Стабильный, контролируемый (до 100% нормы)	Субкомпенсированный (30–50% от нормы)
Время развертывания	10–20 минут (требует сборки и заполнения контура)	1–3 минуты (экстренная торакотомия)
Продолжительность применения	Часы (при ЭКМО – дни и недели)	Ограничена физической усталостью хирурга (до 30–60 мин)

Заключение

Аппарат искусственного кровообращения представляет собой вершину инженерной и медицинской мысли, позволившую исключить фактор времени при проведении сложнейших реконструктивных операций на сердце. Понимание физических законов гидродинамики, газообмена и теплопередачи, заложенных в основу работы АИК, является обязательным для кардиохирургических бригад и перфузиологов.

В то же время, открытый массаж сердца остается важнейшим, жизнеспасющим приемом «последней надежды» в арсенале хирургов и реаниматологов. Обладая более высокой гемодинамической эффективностью по сравнению с закрытой компрессией грудной клетки, он требует жесткого соблюдения техники выполнения для минимизации ятрогенных повреждений миокарда.

Дальнейшее развитие данных направлений идет по пути миниатюризации систем экстракорпоральной поддержки, создания биосовместимых покрытий для контуров ИК и разработки четких

MEDICINE AND PHARMACY

междисциплинарных протоколов экстренного перехода от мануальной реанимации к механической поддержке кровообращения.

References:

- [1] Бураковский В. И., Бокерия Л. А. *Сердечно-сосудистая хирургия: руководство*. – М.: Медицина, 2015. – 752 с.
- [2] Локшин Л. С., Лурье Г. О., Дементьева И. И. *Искусственное кровообращение: практическое руководство*. – М.: НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН, 2012. – 416 с.
- [3] Неговский В. А., Мороз В. В. *Актуальные вопросы реаниматологии и патофизиологии критических состояний*. // *Общая реаниматология*. – 2018. – Т. 14, № 4. – С. 56–68.
- [4] Gravlee G. P., Davis R. F., Stammers A. H., Ungerleider R. M. *Cardiopulmonary Bypass: Principles and Practice*. – 4th ed. – Lippincott Williams & Wilkins, 2014. – 816 p.
- [5] Hensley F. A., Martin D. E., Gravlee G. P. *A Practical Approach to Cardiac Anesthesia*. – 5th ed. – Philadelphia: Wolters Kluwer Health, 2013. – 912 p.
- [6] Subramaniam K., Park K. W., Kellum J. A. *Acute Kidney Injury After Cardiac Surgery*. // *Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia*. – 2021. – Vol. 35, No. 6. – P. 1745–1755.
- [7] European Resuscitation Council Guidelines for Resuscitation 2021: Cardiac arrest in special circumstances. // *Resuscitation*. – 2021. – Vol. 161. – P. 152–219.