Mimotělní oběh a mimotělní membránová oxygenace

Tomáš Subota

Abstrakt

Tento článek se zabývá technologiemi, které zajišťují adekvátní perfuzi pacienta v situaci, kdy není organismus schopen zajistit potřeby organismu fyziologickým způsobem. Za tímto účelem se využívá mimotělní cirkulace krve umělým systémem, jehož činnost zastupuje funkci srdce a plic. Článek poskytuje přehled komponent, vhled do funkčního principu daných zařízení a exkurz do historického vývoje. Oba systémy jsou následně porovnány, v poslední části textu je pojednáno o obsluze technologií dle platné legislativy.

1. Úvod

Účelem mimotělního oběhu (MO) je zajištění potřeb organismu např. při chirurgickém výkonu na klidném srdci nebo během transplantace srdce či plic. Mimotělní membránová oxygenace (ECMO) umožňuje dlouhodobou podporu po dobu dnů až týdnů a užívá jako terapie doplňující nedostatečnou funkci těchto orgánů. ECMO může být indikováno např. u osob čekajících na trvalé řešení jejich zdravotního stavu.

2. Mimotělní oběh

Systém MO vytváří oběh krve kolující mimo tělo pacienta – odkysličená krev míří nejprve do rezervoáru, následuje její okysličení a návrat do vlastního oběhu pacienta. Posun krve okruhem zajišťuje krevní pumpa (Sarkar, Prabhu, 2017). Aby bylo možné přerušit činnost srdce a zároveň nebyla ohrožena bezpečnost pacienta, je bezpodmínečně nutné, aby

MO zajistil sérii úkonů. V první řadě zastává technologie krevní oběh podporovaného organismu, a to včetně čerpadla, které krev okruhem pohání. S vyřazeným srdcem se pojí nutnost odstavit plíce, na jejichž funkci není možné v průběhu operace spoléhat. Druhou nepostradatelnou schopností MO je proto okysličování krve a odstraňování oxidu uhličitého. Pacientova krev se během MO nepohybuje jen ve svém přirozeném prostředí, tedy v cévním systému lidského těla. Artificiální soustava hadic a komponent krev nežádoucím způsobem ovlivňuje – dalším úkolem MO je proto udržovat acidobazickou rovnováhu a požadovanou teplotu organismu (Ježek, 2017).

Pacientova krev je do systému pro MO přiváděna ze žilního systému (z pravé síně či horní nebo dolní duté žíly). Kanylami je krev dopravena do žilního rezervoáru, kde může být obohacena léčivy, transfuzními přípravky a roztoky. Následuje tepelný výměník a oxygenátor, do kterých je krev poháněna hlavním čerpadlem. Okysličená krev je z oxygenátoru navracena kanylou do tepenného systému - aorty - pacienta (Kušičková, 2019).

Před implantací pacienta na MO je aplikován primární roztok. Důvodem je maximální možné odvzdušnění systému před propojením s lidským organismem. Z preventivních důvodů se do primingu přidávají 3–4 jednotky heparinu (antikoagulační látka) na 1 ml roztoku. Pacientův předoperační stav může vyžadovat příměs krve dodanou do primární náplně. V průběhu výkonu je totiž nezbytné udržet organismus mezi hraničními hodnotami hematokritu, což by nadměrná hemodiluce mohla komplikovat (Sarkar, Prabhu, 2017).

Pro bezpečnou práci na srdci je činnost orgánu během operace zastavena za pomoci kardioplegického roztoku. Před prvním podáním je aorta uzavřena svorkou (Kušičková, 2019). Proximálně od svorky je zavedena kanyla dodávající kardioplegický roztok, distálně od svorky se nachází kanyla navracející do cévního systému okysličenou krev. K doručování kardioplegie je vyhrazena speciální pumpa. Dávkování může být nepřetržité nebo přerušované, kardioplegický roztok se používá v různých teplotách. Velmi rozšířená je kardioplegie na bázi draslíku, roztok může navíc obsahovat příměsi bikarbonátu, glukózy, hořčíku, vápníku atd (Sarkar, Prabhu, 2017).

MO patří k základnímu vybavení pro provedení kardiochirurgického výkonu. Přístup k srdci standardně zajišťuje sternotomie (Senst, Kumar, Diaz, 2020). Na svém počátku byla kardiochirurgie značně omezena, bylo možné operovat jen malé množství srdečních defektů, jako drobné trhliny perikardu a koronárních cév. Zavedení MO do praxe bylo impulzem pro rozvoj této disciplíny. Implantace pacienta na MO je indikována vždy, když je pro potřeby operace nezbytné odklonit tok krve mimo srdce, přičemž je všem orgánům i nadále dodávána

okysličená krev o požadované teplotě (Ismail, Semien, Miskolczi, 2021). MO nachází uplatnění v průběhu aortokoronárního bypassu, při nahrazení či léčbě srdeční chlopně a během zavádění zařízení pro dlouhodobé řešení zdravotního stavu (zařízení pro podporu komorové činnosti, umělé srdce, transplantace srdce) (National Institutes of Health). Využití MO není nikdy přímo kontraindikováno, ale některé zdravotní stavy podporu výrazně komplikují a je doporučeno tyto komorbidity odstranit. Jedná se o akutní poškození ledvin, akutní mozkovou mrtvici, infekci plic a dolních cest dýchacích a náhlé zhoršení astmatu (Ismail, Semien, Miskolczi, 2021).

3. ECMO

Extrakrporální membránovou oxygenaci lze popsat jako zjednodušený mimotělní oběh. Shodně s MO se jedná o mechanický okruh, který zajišťuje mimotělní oběh krve a její okysličování pomocí oxygenátoru. Krev je drénována z žilního řečiště, odkud ji krevní čerpadlo pohání do oxygenátoru a tepelného výměníku. Okysličená krev o požadované teplotě se vrací do cévního systému pacienta (Lequier, 2014).

Cévní přístup je volen v závislosti na orgánech, které má systém ECMO nahradit. Z tohoto hlediska rozeznáváme dvě základní konfigurace: venovenózní (V-V) a venoarteriální (V-A) ECMO. Obě modifikace potřebují minimálně dvě kanyly: drenážní (odsávající odkysličenou krev z organismu) a infuzní (k návratu okysličené krve do cévního systému pacienta). Zaváděná drenážní kanyla odsává krev z horní nebo dolní duté žíly. Infuzní kanyla systému V-V ECMO ústí zpravidla do pravé síně nebo její bezprostřední blízkosti, krev se vrací do venózního systému. Infuzní kanyla V-A ECMO vrací krev do tepenného oddílu cévní soustavy skrze femorální tepnu (Pavlushkov, Berman, Valchanov, 2017).

V-V konfigurace vyžaduje dostatečnou funkci levé i pravé komory. Na rozdíl od MO je systém V-V ECMO zapojen sériově k pacientovým plicím, nejedná se o paralelní spojení krevních oběhů (Patel et al., 2019). Činnost plic je tudíž zastoupena, ale krev je nadále třeba rozvádět cévním systémem do tkání. Pravá srdeční síň a komora musí krev dopravit skrze poškozené plíce do levé poloviny srdce. Mimotělní krevní oběh zajišťuje krevní pumpa, která nasává odkysličenou krev z horní nebo dolní duté žíly. Následně je krev vedena do

oxygenátoru, kde dojde k výměně dýchacích plynů. Krev se vrací znovu do žilního systému *(odtud veno-venózní),* konkrétně do pravé síně (Ošťádal, 2018).

V-V ECMO je indikováno v případě respirační insuficience způsobené např. pneumonií nebo selháním transplantovaných plic, není-li podpora ventilátoru dostatečná (Kapounová, 2020). Standardní indikací pro implantaci na V-V ECMO je diagnostikovaný ARDS u pacientů, na něž konvenční léčba (mechanická ventilace a pronační poloha) neúčinkuje. ECLS dokáže zajistit vyšší množství kyslíku v arteriální krvi, což napomáhá kvalitnějšímu okysličení na úrovni tkání i celého organismu. Výsledkem je zmírnění orgánových a neurokognitivních poškození. Příznivý vliv terapie dokládá redukce respirační acidózy a zvýšení srdečního výdeje (následek nižšího afterloadu). Uspokojivý stav krevních plynů, který ECLS zajišťuje, má pozitivní vliv na případné myotrauma bránice a tím zlepšuje fyziologické dýchací funkce pacienta (Combes, 2020). ECMO je kontraindikováno u osob, které trpí těžkým poškozením mozku, těžkou plicní hypertenzí, stav nerozšiřování léčby a nevratné poškození plic (s výjimkou pacientů čekajících na transplantaci plic). Podporu výrazně komplikuje pokročilý věk, obezita, týden a déle trvající agresivní plicní ventilace, pokročilé onemocnění jater, trauma s rozsáhlým krvácením, hemoragická diatéza a těžká trombopenie (Ošťádal, 2018).

Podobně jako V-V ECMO drénuje i V-A ECMO odkysličenou krev z žilního řečiště. K dopravě krve do oxygenátoru slouží opět krevní pumpa, zde však podobnost končí: okysličená krev se vrací do systému arteriálního, obvykle stehenní tepnou (Kapounová, 2020). Kromě nahrazení funkce plic tedy V-A ECMO podporuje (či zcela zastupuje) i činnost srdce. Z tohoto důvodu je někdy označováno jako bivnetrikulární nepulzatilní podpůrný systém (Ošťádal, 2018).

V kardiologii je ECMO nasazováno nejčastěji v případech kardiogenního šoku (může být důsledkem infarktu myokardu, akutní myokarditidy, kardiomyopatie, selhání pravé komory, vrozené choroby srdeční atd.), refrakterní komorové tachykardie a jako následná péče v rizikových stavech po odpojení od MO. Experimentuje se také s využíváním extrakorporální kardiopulmonální resuscitace (ECPR) během srdeční zástavy (Guglin et al., 2019). Riziko kardiogenního šoku tkví v narušení orgánové perfuze, jejímž důsledkem může být multiorgánové selhání vedoucí až k úmrtí postiženého. Adekvátní perfuzi během odstraňování příčiny poškození srdce může zajišťovat ECLS. (Ouweneel et al., 2016). Absolutní kontraindikací je nevratné orgánové selhání, ireverzibilní selhání srdce (s výjimkou pacientů čekajících na transplantaci nebo trvalou podporu levé komory) a disekce aorty.

Relativními kontraindikacemi jsou těžká koagulopatie, nemožnost využití antikoagulačních látek způsobená zdravotním stavem pacienta, pokročilé poškození jater a stavy omezující cévní přístup (těžké poškození periferních tepen, nadměrná obezita, amputovaná končetina aj.), vyšší věk a orgánové komplikace a dlouhodobá mimotělní podpora (Guglin et al., 2019).

4. Komponenty systémů pro mimotělní podporu

Do standardního vybavení systému pro mimotělní cirkulaci patří krevní pumpa, kanyly, set hadic, oxygenátor a tepelný výměník. Dále jsou přítomna doplňková zařízení jako monitory tlaku, teplot, krevních plynů, kyslíkové saturace, detektor bublin, detektor hladiny v rezervoáru. Povrch komponentů, který přichází do styku s krví pacienta, musí být maximální možnou mírou hemokompatibilní. V současnosti se tohoto stavu dosahuje tzv. coatingem (tenká vrstva vystýlající části setu). Tímto opatřením se předchází kaskádě reakcí, jejichž výsledný efekt vede ke vzniku mikrotrombů. Ty brání fyziologické mikrocirkulaci a pacient je tak ohrožen systémovou zánětlivou odpovědí organismu (Kušičková, 2019).

Klíčovým prvkem systému je krevní čerpadlo, které zajišťuje posun krve. V současnosti jsou dominantní dva typy čerpadel - válečkové a centrifugální. Válečkové čerpadlo je tvořeno dvěma proti sobě stojícími otočnými válci napojenými na kovový rotor poháněný elektromotorem. Soustava je umístěna uvnitř dalšího válce (statoru). Otočné válce jsou v těsné blízkosti statoru, zbývá však prostor pro vložení stlačené hadice mezi stator a otočné válce. Energie dodávaná elektromotorem způsobuje oběh otočných válců po ose rotoru, což mění polohu zúženého místa a pohání krev uvnitř hadice (Kušičková, 2019). Výdej čerpadla je závislý na frekvenci otáčení rotoru (uvádí se v RPM) (Ostadfar, 2016). Frekvence otáčení je regulována reostatem. Spolehlivou funkci čerpadla zajišťuje kalibrace. (Groom, 2018). Negativním důsledkem komprese může být poškození erytrocytů a narušování hadice – zejména při nevhodném nastavení okluze. Válečková pumpa je proto nevhodná k časově náročným výkonům (Sarkar, Prabhu, 2017).

Druhým typem čerpadla je centrifugální pumpa. Tvoří ji oběžné kolo opatřené čepelemi nebo rotačním kuželem. Elektromotor uvádí soustavu do pohybu, rotace působí vír, který generuje rozdílné tlaky uprostřed a na okrajích oběžného kola. Krev je nasávána do oblasti, kde je přítomen podtlak (střed oběžného kola) a následně je vháněna odstředivou

silou do okrajových částí (Zanella, Carlesso, Pesenti, 2019). Centrifugální pumpa je běžně užívána v systémech ECMO. Z technického řešení tohoto typu čerpadla vyplývá, že přítok krve do pumpy i odpor za čerpadlem ovlivňují výkon zařízení (pumpa je tzv. *neokluzivní*). První nevýhodou centrifugální pumpy je proto nutnost stálé monitorace průtoku okruhem. Dalším neduhem čerpadla je zpětný tok systémem, kterému nedokáže pumpa spolehlivě zabránit. Hlavním pozitivem užití neokluzivní pumpy je snížení tendence vzniku vzduchových bublin. Výkon čerpadla (resp. počet otáček) je korigován operatérem (perfuzionistou) prostřednictvím řídící jednotky (Ošťádal, 2018). Průtok je monitorován přímým měřením, ke kterému slouží ultrazvukový detektor (ELSO, 2017).

Zařízení zvané oxygenátor zajišťuje v systémech pro MO výměnu krevních plynů. Novodobé oxygenátory tvoří dutá polypropylenová vlákna o vnitřním průměru v řádu nižších stovek μm, která obsahují plynovou náplň. Vzduch v požadovaném složení do oxygenátoru pohání plynová linka a směšovač plynů. V souladu s trendem integrace součástí obvodu obsahují moderní oxygenátory zabudovaný filtr bránící průchodu vmetků, oxygenátor zahrnuje nezřídka i tepelný výměník. Mezi vlákny protéká krev (Sarkar, Prabhu, 2017). Náplň vláken obsahuje vyšší podíl kyslíku než krev, která je omývá – krev tak přijímá z plynu kyslík a odevzdává oxid uhličitý. Nízká velikost dutých vláken (průměr kapiláry 200–280 mikronů) umožňuje efektivní výměnu krevních plynů (Scott, 1995). Samotný přenos mezi krví a plynnou směsí zajišťuje membrána propustná pro plyny, čehož se dosahuje např. použitím mikroporézní membrány (velikost mikropórů pod 1 mikron). V souvislosti s porézní strukturou se vyskytuje jev zvaný smáčení póru, kdy je krevní plazma schopna póry penetrovat. Jelikož je tlak krve vyšší než tlak uvnitř vláken, hrozí po ztrátě hydrofobie proniknutí plazmy do dutého vlákna. Případné prasknutí membrány pak představuje riziko vniknutí vzduchových bublin do okruhu a ohrožuje pacienta vzduchovou embolií (Ritchi, 2013).

Systém ECMO využívá tzv. *pravé membránové oxygenátory*, které lze využít jednorázově. Membrány těchto oxygenátorů jsou vyrobeny ze silikonu a umožňují difuzi i bez přítomnosti mikropórů. Nevýhodami pravých membránových oxygenátorů je vysoká cena a větší povrch, na kterém probíhá kontakt krve s umělým prostředím (Lonský 2004).

Tepelný výměník upravuje teplotu krve pacienta. Efekt tepelného výměníku je zajišťován skrze vodní lázeň, jejíž teplota je udržována v požadovaném intervalu. Teplota vody je obvykle 37 °C a její kontakt s krví může být původcem hemolýzy. Případný styk krve a vody také způsobuje, že nádoba, do které je voda přiváděna, nemůže být považována za sterilní a je nutné ji ošetřovat tekutým antiseptikem (ELSO, 2017). Vodní lázeň je od krve

oddělena hemokompatibilním, neprodyšným a tepelně vodivým materiálem od krve. K oddělení krve od cirkulující vody se využívá nerezová ocel, plasty či anodizovaný hliník (Lonský, 2004).

Kanyly obstarávají spojení vlastního krevního oběhu pacienta s oběhem mimotělním. Tato polyvinylchloridová náhrada lidských cév je vyztužena drátem, což zabraňuje lámání kanyl a umožňuje nerušený průtok. Způsob zavedení kanyl se odvíjí od typu zamýšlené podpory (Sarkar, Prabhu, 2017).

Přestože se dva základní systémy pro ECLS svým využitím, principem činnosti a převážnou částí komponent podobají, jsou mezi MO a ECMO zřetelné odlišnosti. Nejnápadnější rozdíl je, že ECMO je standardně napojován na periferní cévy, není proto vždy třeba zajišťovat transthorakální kanylaci a postačuje lokální anestezie (Punjabi, Taylor, 2013). Robustnější MO má oproti ECMO navíc žilní rezervoár a zařízení pro odsávání krve z operačního pole (Millar et al., 2016). Žilní rezervoár je zásobník, od kterého je přiváděna pacientova krev. Objem rezervoáru se pohybuje kolem 3 litrů, což umožňuje po omezenou dobu udržovat oběh krve i bez jejího odebírání z organismu (např. v důsledku zalomení hadice). Rezervoár je současně vhodný pro aplikaci léků a může do něj být sváděna krev mj. z koronárního sání. Rekuperační zařízení k odsávaní krve jednak udržují čisté operační pole a jednak navracejí ztracenou krev do okruhu (Lonský, 2004).

5. Porovnání systémů pro mimotělní podporu

Účelem ECMO je poskytnutí času (např. k doléčení srdce a plic), zatímco MO slouží pouze k překlenutí chirurgického výkonu – každá technologie je tedy používána v různém časovém horizontu. MO pracuje v řádu hodin, zatímco ECMO zastává cirkulaci a okysličování krve po dobu dní či týdnů (Punjabi, Taylor, 2013). Pro dlouhodobou podporu je výhodnější minimalistický design okruhu ECMO - odsávání krve i její přítomnost v objemném rezervoáru zvyšuje kontakt s umělým povrchem, což zhoršuje zánětlivou reakci (Millar et al., 2016).

V závislosti na zvoleném podpůrném systému je třeba volit adekvátní antikoagulační strategie. Během MO se dodává 300–500 U/kg heparinu, osobám napojeným na systém ECMO stačí 40–80 U/kg. Specifikem v přístupu k antikoagulaci u MO je, že při odpojování

od systému je dodáván protamin sulfát, který potlačuje účinky heparinu. Vzájemná reakce antagonicky působících látek ohrožuje pacienta rozvojem zánětlivé odpovědi organismu (Millar et al., 2016).

5.1 Transplantace plic

Výsledky podpory obou mimotělních systémů lze porovnat na transplantaci plic, neboť během tohoto výkonu mohou být funkce srdce a plic zastoupeny mimotělním oběhem i V-A ECMO (Moreno Garijo et al., 2019). Metaanalýza kolektivu autorů Hoechter et al. z roku 2017 naznačuje, že 3měsíční a 12měsíční mortalita vykazuje lepší výsledky při využití systému ECMO (Hoechter et al., 2017). Studie autorů Yu et al. zjistila, že 30denní a 3měsíční mortalita je signifikantně nižší v případě podpory ECMO. Nižší byla také 12měsíční mortalita, rozdíl ale nebyl statisticky významný (Yu et al., 2016). Současné výsledky jsou připisovány nižším dávkám heparinu a možnost prodloužené podpory mimotělním systémem (Moreno Garijo et al., 2019) a méně významné reperfuzní poškození plic v případě využití ECMO (Yu et al., 2016).

Nicméně při pohledu do historie, konkrétně do let 2003-2005, lze zjistit, že převaha ECMO nad MO nebyla vždy samozřejmostí. Bittner et al. ve své studii prohlašují, že MO by měl zůstat standardní podporou v průběhu transplantace plic. Pacienti podporovaní systémem ECMO vyžadovali výrazně vyšší transfuzi krevních elementů, výhodu MO naznačovala také 3měsíční mortalita a přítomnost infekčních komplikací (Bittner et al., 2007). V této době využívali MO také ve zdravotnickém zařízení v Torontu (Moreno Garijo et al., 2019) a v Soulu (Yu et al., 2016).

5.2 Aortokoronární bypass

Přemostění nedostatečně průchozí koronární tepny, neboli aortokoronární bypass, může proběhnout s využitím MO nebo bez podpory, tedy na tlukoucím srdci (Smart, Dieberg, King, 2018). Výsledky obou metod byly porovnány na vzorku pacientů s podobnými předoperačními charakteristikami. Sledovaná 30denní mortalita naznačovala příznivější výsledky u skupiny bez podpory MO. Vliv ne/využití mimotělní podpory na mortalitu se nicméně nepodařilo spolehlivě prokázat (Bakaeen et al., 2014). Při porovnání dlouhodobé

mortality (4 - 5 let) jsou výsledky odlišné - dle metaanalýzy vydané roku 2018 byla dlouhodobá mortalita ve sledovaném období výrazně nižší u pacientů s využitím MO. Tento výsledek je autory připisován lepší průchodnosti štěpu (Smart, Dieberg, King, 2018). U pacientů s předoperační komorovou fibrilací byla ve 24 hodinách a 30 dnech po výkonu zaznamenána signifikantně vyšší mortalita ve skupině s podporou MO. Dlouhodobé výsledky vykazují opačný výsledek - mortalita pacientů s MO byla výrazně nižší (Kowalewski et al., 2020).

5.3 ECMO a konvenční terapie

Vliv standardní kardiopulmonální resuscitace (CPR) a resuscitace s využitím V-A ECMO (ECPR) na přežití a zdravotní stav pacientů porovnává metaanalýza z roku 2017. Signifikantně lepší výsledky byly zaznamenány u skupiny ECPR. Skupina ECPR dosáhla signifikantně lepších dlouhodobých neurologických výsledků (ve 3, 6 a 12 měsících, hodnoceno dle Glasgowovy stupnice). Pacienti z této skupiny se také významně častěji dožili propuštění ze zdravotnického zařízení, pokud je zástava dostihla mimo něj (Wang et al., 2017). Systematický přehled literatury publikovaný roku 2018, který porovnával míru přežití a neurologické následky, metodu ECPR nedoporučuje, ani od ní neodrazuje. Autoři práce upozorňují, že rozhodování o nasazení ECLS při resuscitaci se neřídí jednotným schématem, možnost porovnání metod je tak omezena (Holmberg et al., 2018). Ani výzkumná práce z roku 2020, která sledovala pacienty postižené srdeční zástavou mimo ZZ mezi lety 2011 a 2018, neprokázala spojitost mezi využitím ECPR a vyšší mírou přežití ve srovnání s konvenční terapií. Z celkového počtu 13 191 pacientů byla při resuscitaci využita ECLS ve 4 % případů, 8,4 % z těchto pacientů se dožilo propuštění z nemocnice. Ve druhé skupině byla využita standardní CPR, propuštění se dožilo 8,6 % (Bougouin et al., 2020).

Konvenční terapií ARDS je mechanická ventilace doprovázena pronační polohou a farmakologickou léčbou (Zhu et al., 2021). Pokud terapie není dostatečná, zahajuje se mimotělní podpora systémem ECMO (Patel et al., 2019). Vyhodnocením účinků ECMO na ARDS a jejich srovnáním s efektem samotné mechanické ventilace se zabývá metaanalýza publikovaná v roce 2021. Z dostupných dat vyplývá, že 30denní, 60denní i 90denní mortalita byla signifikantně nižší u osob, kterým byla poskytnuta ECLS (Zhu et al., 2021). V referenčním ZZ byl ARDS vyvolaný chřipkovým onemocněním léčen na přelomu let 2015 a 2016 u potenciálních kandidátů na ECLS. Mortalita byla výrazně nižší u pacientů

připojených na ECMO a na základě zjištěných dat je doporučeno kombinovat podporu mechanické ventilace a V-V ECMO (Buchner et al., 2018). Efekt V-V ECMO a mechanické ventilace u dospělých pacientů s refrakterní hypoxemií způsobenou ARDS porovnává studie vydaná roku 2020. Mortalita před opuštěním ZZ se mezi skupinami výrazně nelišila, ačkoli množství plynné směsi dodávané ventilátorem bylo signifikantně nižší u pacientů s ECLS, což je žádoucí – tento přístup je k plicím šetrnější a usnadňuje jejich rekonvalescenci (Tongyoo et al., 2020).

6. Historický vývoj

První experimenty s prokrvováním a okysličováním orgánů za pomoci mimotělních systémů se datují do 19. století. V roce 1895 byl zdokumentován první pokus o umělou ventilaci plíce, roku 1926 došlo k sestrojení zařízení, které v omezené míře zajišťovalo orgánovou perfuzi. Přes postup na poli technologií MO byl rozvoj metody provázen degenerativními změnami, za nimiž stála nemožnost provádění antikoagulace. Objevení heparinu umožnilo další zdokonalování metody v následujících dekádách. Roku 1953 provedl John Gibbon první úspěšnou operaci na otevřeném srdci s využitím zařízení pro mimotělní oběh. Šlo o uzavření defektu síňového septa. Tento výkon znamenal revoluci pro obor kardiochirurgie a otevřel cestu k navazujícím vědeckým pracím a technologickému zdokonalování zařízení pro MO (Punjabi, Taylor, 2013).

Roku 1855 bylo patentováno válečkové čerpadlo, jehož princip se využívá dodnes. Šlo o pumpu s jedním rotačním válcem, pohon zajišťovala obsluha otáčením kliky. Centrifugální čerpadlo bylo představeno v roce 1960 jako potenciální součást technologie srdeční náhrady. Po osmi letech vývoje byly eliminovány devastační účinky, které čerpadla způsobovala krevním elementům, a jejich využití bylo doporučeno také pro technologii MO. Centrifugální pumpa snižuje, třebaže zcela neodstraňuje, riziko vzduchové embolie, které se pojí k využití válečkového čerpadla. Za určitých okolností je centrifugální čerpadlo také šetrnější k erytrocytům. Naopak k výhodám válečkového čerpadla patří nižší cena a odolnost vůči vlivům preloadu i afterloadu (Boettcher, Merkle, Weitkemper, 2003).

Průkopníky v oblasti mimotělní oxygenace byly diskové a bublinové oxygenátory, které byly založeny na probublávání kyslíku krví. Experimentovalo se také s přirozenými

plícemi, které měly suplovat funkci vlastních plic pacienta. V padesátých letech 20. století se objevily snahy o využití plic psích, dětem byly určeny plíce opičí. Za úspěšnou byla tehdy považována tzv. kontrolovaná křížená cirkulace. Jednalo se o napojení žilního systému operovaného dítěte na žilní systém dárce (např. rodiče), arteriální systém dárce dotoval okysličenou krví pacienta. Tato metoda způsobovala 38% třicetidenní mortalitu (Kušičková, 2019).

První použití prodlouženého MO, tedy ECMO, bylo zaznamenáno roku 1972. Příjemcem mimotělní podpory byl čtyřiadvacetiletý muž, který prodělal respirační selhání během operace aorty. Jelikož konvenční podpůrné techniky nevedly k odstranění patologie, byla pacientovi zavedena částečná V-A perfuze. Efektem bylo zlepšení zdravotního stavu pacienta. 75 hodin po zavedení systému došlo k úspěšnému odpojení osoby od ECMO. Nedlouho poté bylo terapie ECMO využito znovu, tentokrát u 28 pacientů – zlepšení zdravotního stavu se dostavilo v necelé třetině případů, dlouhodobá míra přežití dosáhla 18 %. Na základě tohoto výsledku bylo použití technologie ECMO prohlášeno za metodu, která může ve vybraných případech odvrátit úmrtí způsobené plicní nedostatečností (Squiers, Lima, Dimaio, 2016).

7. Obsluha a legislativa

Pravomoci biomedicínského technika upravuje vyhláška č. 391/2017 Sb., kterou se mění vyhláška č. 55/2011 Sb., o činnostech zdravotnických pracovníků a jiných odborných pracovníků, ve znění vyhlášky č. 2/2016 Sb. Z této vyhlášky vyplývá dle § 19 odst. 1 odpovědnost biomedicínského technika za zdravotnický prostředek. Biomedicínský technik se na základě uvedeného podílí na vedení dokumentace zdravotnického prostředku a účastní se výběru těchto zařízení. Dále zajišťuje servis zdravotnického prostředku a je součástí tvorby preventivních či nápravných opatření souvisejících se ZP. V mezích zákona o zdravotnických prostředcích instruuje obsluhu MO a hraje roli při oznamování podezření na nežádoucí příhody. Biomedicínský technik je v souladu s § 19 odst. 2 oprávněn obsluhovat ZP a jejich sestavy dle indikace lékaře (Česko, 2017), což však nelze vztáhnout na řízení MO – k tomuto úkonu je zplnomocněn klinický technik pro perfuziologii vyhláškou č. 55/2011 Sb. o činnostech zdravotnických pracovníků a jiných odborných pracovníků (dále jen

„vyhláška o činnostech zdravotnických pracovníků a jiných odborných pracovníků“) (Česko, 2011).

Perfuziolog je člen kardiochirurgického týmu, který zodpovídá za obsluhu zařízení pro MO. Jeho úlohou je kontrola, správná interpretace a případná úprava vnitřního prostředí pacienta během podpory MO (systémová perfuze, krevní tlak, výměna krevních plynů, řízení teploty organismu atp.). Před operací klinický perfuziolog aktivuje bezpečnostní mechanismy, ověřuje jejich funkci, kontroluje okluzi (přítlačnou sílu) válečkového čerpadla a volí vyhovující oxygenátor. Okruh pro MO odvzdušňuje a dodává primární roztok. Před operací i během jejího průběhu dodává léčiva, kardioplegický roztok a krevní deriváty (ve spolupráci s lékařem), dohlíží na antikoagulaci a integritu okruhu. Kromě přístroje pro MO pracuje s mechanickou podporou oběhu, autologní transfuzní technikou a systémem ECMO. V neposlední řadě musí perfuziolog reagovat na veškeré kritické situace, které při vedení MO mohou nastat (Jarošová, 2013).

Kritické situace, neboli technické komplikace související s MO mohou být důsledkem poruchy zařízení nebo nedostatečné pozornosti obsluhy. Jednou z nejzávažnějších technických komplikací je zalomení systému hadic. Objem krve v rezervoáru se vlivem zalomení žilní linky snižuje a hrozí vnik vzduchu do systému. Zalomená hadice arteriální linky vede k nárůstu tlaku v systému, neboť pumpa stále dodává krev, která se městná před místem zalomení. Tlak působící na stěnu hadice může vést až k jejímu roztržení. Celý systém musí být znovu napojen a zbaven vzduchových bublin. Další kritickou situaci působí nedostatečná antikoagulace, která ohrožuje oxygenátor vznikem sraženiny. Tuto kritickou situaci doprovází nárůst tlaku před oxygenátorem. Důsledkem trombózy oxygenátoru je nedostatečné okysličení protékající krve. Jedinou možností, jak komplikaci odstranit, je vyměnit oxygenátor, při čemž musí být oběh krve přerušen. V případě přerušení dodávky elektrické energie napájí systém baterie. Selhání baterie je jištěno přítomnou klikou umožňující ruční pohon (Jarošová, 2013).

Obsluhu systému ECMO zjednodušuje monitorace a signalizace rizikových situací, které vyplývají z technických komplikací. Jednou z rizikových situací je vysoký perfuzní tlak (nad 400 mmHg) při požadovaném průtoku. Tento stav ohrožuje integritu okruhu např. prasknutím systému hadic. Nenadálý vzestup tlaku spouští alarm, který obsluhu vybízí ke snížení výkonu či úplnému přerušení činnosti čerpadla. Následně je chod čerpadla postupně obnovován, přičemž se hledá zdroj nárůstu tlaku: zvýšený odpor uvnitř oxygenátoru, v kanylách nebo v systému hadic, případně nadměrný SVR. Škodlivý je zároveň nadměrný podtlak (cca -300 mmHg), který může být původcem hemolýzy. Hemolýzu také působí

přítomnost sraženiny v hlavici centrifugální pumpy nebo vysoký průtok malým otvorem (ELSO, 2017).

V okruhu může být detekován vzduchový embol nebo sraženina. V obou případech se postupuje stejně. Činnost čerpadla se přeruší, okruh se v blízkosti pacienta uzavře svorkami a následuje výměna části systému, kde byl vmetek objeven. Akce musí proběhnout velice rychle, životní funkce pacienta jsou na systému závislé. Bubliny se do okruhu dostávají skrze drenážní kanylu nebo kohouty, na jejich přítomnost upozorňují detektory bublin. Užitečné jsou také tzv. *bubble traps*, které mohou emboly zachytit. Detekce sraženin lze odhalit vizuální kontrolou, např. za pomoci světelného zdroje (baterky). Největším rizikem jsou sraženiny, které přesahují 5 mm nebo které se zvětšují (ELSO, 2017).

8. Závěr

Článek poskytuje stručné shrnutí soudobé praxe týkající se systémů pro mimotělní podporu cirkulace. Jak dokazuje kapitola *5. Porovnání systémů pro mimotělní podporu*, tyto systémy a jejich obsluha se stále vyvíjí a je tedy nezbytné udržovat přehled o aktuálních trendech.

Tendence nahrazování MO zařízením ECMO během transplantace plic se zdá být dle zmíněných studií opodstatněné. Zajímavý je také časový vývoj využívání těchto podpor. V letech 2010 - 2013 je patrný zlom nejen ve výsledcích prováděných výzkumů, ale také v klinické praxi, což dokládají - nezávisle na sobě - zkušenosti autorů Moreno Garijo et al. a Yu et al.

Aortokoronární bypass je výkon, u nějž nelze dle dostupných dat jednoznačně rozhodnout, která z technologií je spojena s příznivějšími výsledky. Pozoruhodným dokreslením náročnosti této volby je fakt, že 95 % CABG prováděných v Indii probíhá bez mimotělní podpory, zatímco ve Velké Británii je tímto způsobem vykonávaných pouze 20 % výkonů (Smart, Dieberg, King, 2018).

O systému V-V ECMO lze prohlásit, že jeho využívání v důsledku ARDS odpovídá výsledkům předkládaných studií a je možné v současné praxi pokračovat. V-A ECMO indikované náhlou srdeční zástavou doporučit nelze obecně doporučit, rozhodně by neměla být a priori přehlížena. Výsledkům ECPR by mohlo pomoci sjednocení pracovních postupů.

Současně by taková jednotnost zvýšila relevanci prováděných výzkumů, jak naznačuje Holmberg et al.

Literatura

BAKAEEN, Faisal G. et al. 2014. Perioperative outcomes after on- and off-pump coronary artery bypass grafting. *Texas Heart Institute journal.* **41**(2), 144-151. DOI 10.14503/THIJ-13-3372.

BITTNER, Hartmuth B. et al. 2007. Replacing cardiopulmonary bypass with extracorporeal membrane oxygenation in lung transplantation operations. *European journal of cardio-thoracic surgery: official journal of the European Association for Cardio-thoracic Surgery*. **31**(3), 462-7. DOI 10.1016/j.ejcts.2006.11.050.

BOETTCHER, W., F. MERKLE, a H. H. WEITKEMPER. 2003. History of Extracorporeal Circulation: The Invention and Modification of Blood Pumps. *The Journal of extra-corporeal technology*. **35**(3), 184-91.

BOUGOUIN, Wulfran et al. 2020. Extracorporeal cardiopulmonary resuscitation in out-of-hospital cardiac arrest: a registry study. *European heart journal.* **41**(21), 1961-1971. DOI 10.1093/eurheartj/ehz753.

BUCHNER, Jessica et al. 2018. Single-Center Experience With Venovenous ECMO for Influenza-Related ARDS. *Journal of cardiothoracic and vascular anesthesia.* **32**(3), 1154-1159. DOI 10.1053/j.jvca.2017.09.031.

COMBES, Alain et al. 2020. Extracorporeal life support for adults with acute respiratory distress syndrome. *Intensive care medicine.* **46**(12), 2464-2476. DOI 10.1007/s00134-020-06290-1.

ČESKO. MINISTERSTVO ZDRAVOTNICTVÍ. 2011. Vyhláška č. 55 ze dne 1. března 2011 o činnostech zdravotnických pracovníků a jiných odborných pracovníků. In: *Sbírka zákonů České republiky*. Částka 20, s. 482-543. ISSN 1211-1244.

ČESKO. MINISTERSTVO ZDRAVOTNICTVÍ. 2017. Vyhláška č. 391 ze dne 16. listopadu 2017, kterou se mění vyhláška č. 55/2011 Sb., o činnostech zdravotnických pracovníků a jiných odborných pracovníků, ve znění vyhlášky č. 2/2016 Sb. In: *Sbírka zákonů České republiky*. Částka 137, s. 4360–4375. ISSN 1211-1244.

Extracorporeal Life Support Organization (ELSO) General Guidelines for all ECLS Cases August, 2017. KOLEKTIV PRACOVNÍKŮ ELSO. *Extracorporeal Life Support Organization* [online]. Michigan, USA: Extracorporeal Life Support Organization, 2020-03-24 [cit. 2021-06-15]. Dostupné také z:

https://www.elso.org/Portals/0/ELSO%20Guidelines%20General%20All%20ECLS%20Version%201_4.pdf

GROOM, Robert C. 2018. Chapter 26 - Extracorporeal Devices Including Extracorporeal Membrane Oxygenation. In: KAPLAN, Joel A. Ed. *Kaplan's Essentials of Cardiac Anesthesia*. 2. vyd. Elsevier, s. 664-684. ISBN 978-0-323-49798-5.

GUGLIN, Maya et al. 2019. Venoarterial ECMO for Adults: JACC Scientific Expert Panel. *Journal of the American College of Cardiology*. **73**(6), 698-716. ISSN 0735-1097.

Heart surgery. KOLEKTIV PRACOVNÍKŮ NHLBI. *National Heart, Lung, and Blood Institute* [online]. Washington, USA: National Institutes of Health [cit. 2021-07-09].

HOECHTER, Dominik J. et al. 2017. Extracorporeal Circulation During Lung Transplantation Procedures: A Meta-Analysis. *ASAIO journal.* **63**(5), 551-561. DOI 10.1097/MAT.0000000000000549.

HOLMBERG, Mathias J. et al. 2018. Extracorporeal cardiopulmonary resuscitation for cardiac arrest: A systematic review. *Resuscitation*. **131**, 91-100. DOI 10.1016/j.resuscitation.2018.07.029.

ISMAIL A., G. SEMIEN a S. Y. MISKOLCZI. 2021. *Cardiopulmonary Bypass*. Treasure Island: StatPearls Publishing. Dostupné také z: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK482190/#_NBK482190_pubdet_

JAROŠOVÁ, Vladislava. 2013. Práce klinického perfuziologa a kritické situace během mimotělního oběhu. *Florence: odborný časopis pro nelékařské zdravotnické pracovníky*. **2013**(9). ISSN 2570-4915.

JEŽEK, Martin. 2017. Z výjimečného výkonu se stává rutinní operace. *Zdravotnictví a medicína*. **2017**(6), 17. ISSN 2336-2987.

KAPOUNOVÁ, Gabriela. 2020. *Ošetřovatelství v intenzivní péči.* 2. vydání. Praha: Grada Publishing. ISBN 978-80-271-0130-6.

KOWALEWSKI, Mariuzs et al. 2020. On-pump vs off-pump coronary artery bypass surgery in atrial fibrillation. analysis from the polish national registry of cardiac surgery procedures (KROK). *PLoS One.* **15**(4). DOI 10.1371/journal.pone.0231950.

KUŠIČKOVÁ, Romana. 2019. Mimotělní oběh. In: Jan PIRK. *Kardiochirurgie*. Praha: Maxdorf, s. 51-60. ISBN 978-80-7345-568-2.

LEQUIER, Laurance et al. Extracorporeal membrane oxygenation circuitry. *Pediatric critical care medicine: a journal of the Society of Critical Care Medicine and the World Federation of Pediatric Intensive and Critical Care Societies.* **14**(5), 7-12. DOI 10.1097/PCC.0b013e318292dd10.

LONSKÝ, Vladimír. 2004. *Mimotělní oběh v klinické praxi*. 1. vyd. Praha: Grada. ISBN 80-247-0653-9.

MILLAR, Jonathan Edward et al. 2016. The inflammatory response to extracorporeal membrane oxygenation (ECMO): a review of the pathophysiology. *Critical care*. **20**(1), 387. DOI 10.1186/s13054-016-1570-4.

MORENO GARIJO, Jacobo et al. 2019. The Evolving Role of Extracorporeal Membrane Oxygenation in Lung Transplantation: Implications for Anesthetic Management. *Journal of cardiothoracic and vascular anesthesia*. **33**(7), 1995-2006. DOI 10.1053/j.jvca.2018.10.007.

OSTADFAR, Ali. 2016. Chapter 5 - Biofluid Flow in Artificial, Assistive and Implantable Devices. In: Ali OSTADFAR ed. *Biofluid Mechanics*. Academic Press, s. 205-242. ISBN 978-0-12-802408-9.

OŠŤÁDAL, Petr et al. 2018. *ECMO: extrakorporální membránová oxygenace: manuál pro použití u dospělých.* 2. vyd. Praha: Maxdorf. ISBN 978-80-7345-591-0.

OUWENEEL, Dagmar M. et al. 2016. Extracorporeal life support during cardiac arrest and cardiogenic shock: a systematic review and meta-analysis. *Intensive care medicine.* **42**(12), 1922-1934. DOI 10.1007/s00134-016-4536-8.

PATEL, Avani R. et al. 2019. Venovenous Extracorporeal Membrane Oxygenation Therapy in Adults. *Cureus.* **11**(8), e5365. DOI 10.7759/cureus.5365.

PAVLUSHKOV, E., M. BERMAN a VALCHANOV, K. 2017. Cannulation techniques for extracorporeal life support. *Annals of translational medicine.* **5**(4), 70. DOI 10.21037/atm.2016.11.47.

PUNJABI, Prakash P. a K. M. TAYLOR. 2013. The science and practice of cardiopulmonary bypass: From cross circulation to ECMO and SIRS. *Global cardiology science & practice*. **2013**(3), 249-60. DOI 10.5339/gcsp.2013.32.

RITCHI, Alastair Campbell. 2013. Chapter II.5.5 - Extracorporeal Artificial Organs. In: Buddy D. Ratner, Allan S. Hoffman, Frederick J. Schoen, Jack E. Lemons eds. *Biomaterials Science*. 3. vyd. Academic Press, s. 827-841. ISBN 978-0-12-374626-9.

SARKAR, Manjula a Vishal PRABHU. 2017. Basics of cardiopulmonary bypass. *Indian journal of anaesthesia*. **61**(9), 760-767. DOI 10.4103/ija.IJA_379_17.

SCOTT, K. 1995. MEDICAL APPLICATIONS. In: K. Scott ed. *Handbook of Industrial Membranes*. Elsevier Science, s. 683-689. ISBN 978-1-85617-233-2.

SENST, B., A. KUMAR a R. R. DIAZ. 2020. *Cardiac Surgery*. Treasure Island: StatPearls Publishing. Dostupné také z: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK532935/#_NBK532935_pubdet_

SMART, N. A., G. DIEBERG a N. KING. 2018. Long-Term Outcomes of On- Versus Off-Pump Coronary Artery Bypass Grafting. *Journal of the American College of Cardiology.* **71**(9), 983-991. ISSN 0735-1097.

SQUIERS, J. J., B. LIMA a J. M. DIMAIO. 2016. Contemporary extracorporeal membrane oxygenation therapy in adults: Fundamental principles and systematic review of the evidence. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*. **152**(1), 20-32. DOI 10.1016/j.jtcvs.2016.02.067.

TONGYOO, Surat et al. 2020. Venovenous extracorporeal membrane oxygenation versus conventional mechanical ventilation to treat refractory hypoxemia in patients with acute respiratory distress syndrome: a retrospective cohort study. *The Journal of international medical research*. **48**(6). DOI 10.1177/0300060520935704.

WANG, Gan-Nan et al. 2017. Comparison of extracorporeal and conventional cardiopulmonary resuscitation: A meta-analysis of 2 260 patients with cardiac arrest. *World journal of emergency medicine*. **8**(1), 5-11. DOI 10.5847/wjem.j.1920-8642.2017.01.001.

YU, Woo Sik et al. 2016. Transition to routine use of venoarterial extracorporeal oxygenation during lung transplantation could improve early outcomes. *Journal of thoracic disease*. **8**(7), 1712-1720. DOI 10.21037/jtd.2016.06.18.

ZANELLA, A., E.CARLESSO a A. PESENTI. 2019. Chapter 196 - Extracorporeal Membrane Oxygenation for Pulmonary Support. In: C. RONCO, R. BELLOMO, J. A. KELLUM, Z. RICCI eds. *Critical Care Nephrology*. 3. vyd. Elsevier, s. 1183-1190. ISBN 978-0-323-44942-7.

ZHU, Youfeng et al. 2021. Extracorporeal membrane oxygenation versus mechanical ventilation alone in adults with severe acute respiratory distress syndrome: A systematic review and meta-analysis. *International journal of clinical practice.* DOI 10.1111/ijcp.14046.