

a je také prediktorem weaning-induced pulmonary oedema (WIPO) [26]. Výhodou systému PiCCO je jeho použitelnost u větších dětských pacientů, kde velikost PAC katetru použití znemožňuje [27].

Mezi hlavní limitace TPTD patří přítomnost chlopenních vad a zkratů, které ovlivňují měření výrazněji než u PAC, protože bolus musí projít všemi srdečními oddíly. Zkreslené hodnoty způsobí také dialyzační katetr v „cestě bolusu“ (dialyzační katetr zavedený do jugulární žíly a klasický CVK, přes který se podává bolus, zavedený do femorální žíly). Stejně jako u všech metod, které využívají analýzu arteriálního tlaku, je klíčová kvalita získané křivky během kontinuálního monitorování – nedostatečně tlumená (underdamped) křivka povede k významnému nadhodnocení CO a naopak přetlumená (overdamped) křivka může měření znemožnit, pokud systém nerozezná dikrotický zářez [28, 29]. Významné arytmie pak představují další faktor ovlivňující stanovení CO pomocí analýzy arteriální křivky.

Doporučené použití: Pacienti v šoku, kteří nereagují na iniciační terapii – vyjma specifických situací, kdy je indikován PAC a pacientů na ECMO [9].

Minimálně invazivní metody měření srdečního výdeje

Do skupiny minimálně invazivních metod monitorace CO zahrnujeme především techniky využívající analýzu arteriální křivky (pulse wave analysis – PWA) a Dopplerovského měření. Zmiňované metody zpravidla nevyžadují kalibraci externím indikátorem. Výpočet SV a dalších parametrů je založen na matematicko-statistických modelech využívajících tvar tlakové křivky nebo analýzu pulzního Doppleru, demografická data pacienta a další proměnné.

Analýza arteriální křivky

Základní princip stanovení tepového objemu na základě analýzy arteriální tlakové křivky vychází z myšlenky Otto Franka (1899), který popsal tzv. Windkessel model [30]. Skutečný rozmach metody však nastal až s příchodem výkonných výpočetních technologií a miniaturizace v novém tisíciletí. Tvar arteriální tlakové křivky je dán velikostí tepového objemu, poddajností velkých elastických arterií a SVR. Významnou úlohu hraje také lokalizace katetru, kdy je tvar křivky ovlivněn odraženými pulzovými vlnami [28, 31], a samozřejmě technickými parametry převodníkového systému. To představuje kritickou limitaci, která bývá někdy v běžné praxi opomíjena. Jak bylo zmíněno, správné nulování tlakového převodníku, ale hlavně adekvátní míra tlumení (damping) je zásadní pro přesné stanovení hodnoty CO [28–29].

Výpočet SV vychází z různých matematických algoritmů PWA. Většina systémů pro PWA využívá automatickou (vnitřní) kalibraci, kdy příslušný algoritmus vypočítává převod mezi tlakem a objemem na podkladě dalších dat (zejména demografické údaje pacienta, případně nomogramy a jiné). Právě to představuje limitující faktor pro přesnost metody. K dalším limitacím patří přítomnost arytmií, nízká systémová rezistence nebo chlopenní vady (zejména aortální regurgitace).

Kalibrovatelné metody umožňují zadání aktuální hodnoty CO/SV (např. z echokardiografie nebo PAC) a tím zpřesní výpočetní algoritmus [32]. Obdobně jako u TPTD se hodnota CO/SV postupně odklání od

Obr. 2. BD HemoSphere Alta, publikováno se souhlasem společnosti BD



reálné situace a s odstupem cca 60 minut nebo při klinické změně je nutno provést rekalibraci.

Výhodou PWA je její nízká invazivita a rychlejší zahájení monitorace – většina systémů je kompatibilní se standardním arteriálním katetrem. Na rozdíl od termodiluce při TPTD či u PAC není PWA ovlivněna přítomností V-V ECMO [33]. PWA také provádí „beat-to-beat“ analýzu SV (jakkoli většinou v plujícím okně 15 až 20 sekund), což umožňuje sledování i jemných změn SV. To na rozdíl od robustních intermitentních metod umožňuje provádění dynamických testů funkční hemodynamické monitorace (např. testy tekutinové reaktivity).

Dostupné systémy

- **FloTrac/FloTracIQ** pro monitory HemoSphere, HemoSphere Alta (Obr. 2), historicky EV1000 a Vigileo (BD, Franklin Lakes, NJ, USA) využívá PWA založenou na matematicko-statistickém zpracování arteriální křivky. Vnitřní kalibrace je založena na demografických údajích pacienta (výška, hmotnost, věk a pohlaví). Systém analyzuje SV ve 20sekundovém plovoucím okně a kalkuluje další odvozené parametry – CO, SVV, PPV, dynamickou arteriální elastanci ($E_{a,dyn}$) a umožňuje predikovat případný vzestup tlaku po podání tekutin, sklon systolické části arteriální křivky dp/dt (jako parametr kontraktility) a při znalosti CVP i SVRI. Nadstavbový modul Acumen IQ pomocí multiparametrického algoritmu strojového učení předpovídá pravděpodobnost rozvoje hypotenze v následujících 15 minutách – index predikce hypotenze (HPI). V současné době je HPI omezen na práh středního arteriálního tlaku (MAP) 65 mm Hg. V novějších verzích se plánuje využití individualizovaného hypotenzního prahu. Validace HPI proběhla v intraoperačních podmínkách i na jednotkách intenzivní péče s velmi uspokojivými výsledky – metaanalýza 43 studií [34] v rámci intraoperační péče ukázala AUC 0,89 pro predikci hypotenze během následujících 5 až 15 minut s tím, že senzitivita stoupá až na AUC 0,92 pro predikci hypotenze v následujících 5 minutách. V podmínkách intenzivní péče pak AUC dosahovala hodnotu 0,95 u pacientů s covidem-19 vyžadujících umělou plicní ventilaci (UPV) [35]. Nevýhodou systému je vysoká cena spotřebního materiálu (specifický proplachový set).
- **Algoritmus ProAQT** pro monitory PulsioFlex/PulsioCare (Getinge AB, Göteborg, Sweden) sdílí stejnou metodu PWA jako systém PiCCO