

What is “normal” pump flow?

Marco Ranucci

Cardiothoracic Anaesthesia Department, Policlinico S. Donato, Milan, Italy

Kardiochirurgia i Torakochirurgia Polska 2006; 3 (1): 100–102



The concept of a “normal” pump flow during cardiopulmonary bypass (CPB) meets the same requirements of the concept of “normal” cardiac output in the physiologic circulation. In both cases, the concept of “normality” is misleading. The normal blood flow (either if generated by the heart or a pump) simply does not exist: much more correct is the notation of “adequate” blood flow, that means a flow adequate to support the metabolic needs of the various organs.

As a matter of fact, metabolic needs are represented by oxygen consumption (VO_2), that under normal conditions is about 250 ml/min in a subject weighing 70 kg, awake and at rest. This value may dramatically increase during physical exercise (up to 5 L/min), or decrease if the patient is under anaesthesia. Moreover, temperature plays a very important role in determining the VO_2 of the patient during cardiac operations with CPB. Not by chance, the usual way for determining the correct pump flow is based on the body surface area (BSA) and the temperature. Usually, the pump flow is settled between 2.0 and 3.0 L · min⁻¹ · m⁻² according to the temperature during CPB.

However, pump flow alone is insufficient to define “adequacy” of perfusion with respect to metabolic needs. The right physiological notation for this is the oxygen delivery (DO_2), that is the arterial oxygen content (ml/dL) times the pump flow. The arterial oxygen content depends on the Hb concentration and on its saturation; however, this last term is usually amendable, since modern oxygenators are usually able to provide a total (99.9%) Hb saturation throughout the CPB duration.

Therefore, the value of Hb concentration and of its surrogate, the hematocrit (HCT) value, is very important in determining the DO_2 .

Since 1994, Ranucci et al. [1] demonstrated that in a series of 300 consecutive patients who had undergone myocardial revascularization with CPB, the presence of severe hemodilution was an independent risk factor for postoperative acute renal failure (ARF). In particular, the cut-off value was identified at HCT <25%.

More recently, the lowest hematocrit on CPB has been recognized as an independent risk factor for postoperative low cardiac output and hospital mortality by Fang et al. [2], and for an impressive series of postoperative adverse events by Habib

et al. in 2003 [3]. The relationship between hemodilution and ARF has been subsequently confirmed by Swaminathan et al. in 2003 [4], and Ranucci et al. in 2005 [5]. The critical HCT value below which the ARF risk significantly increases is located between 23% and 26%. Almost all the authors ascribe this relationship to an insufficient oxygen supply (DO_2) to the various organs: kidney, in particular, due to its physiologic condition of hypoxic perfusion, seems to be at high risk.

Surprisingly, all the studies demonstrating a relationship between HCT and ARF or other organ damage failed to consider that HCT is only one of the two determinants of DO_2 during CPB: the other is pump flow. This would not influence the DO_2 , if the pump flow was a constant, but this is not the case. In all the studies, the pump flow varied from 2.0 L/min/mq to 3.0 L · min⁻¹ · m⁻², and the variation was dependent on the perfusion pressure. An HCT of 24% results in a DO_2 indexed of 230 mL · min⁻¹ · m⁻² if the pump flow is 2.0 L · min⁻¹ · m⁻², and of 344 mL · min⁻¹ · m⁻² if pump flow is 3.0 L · min⁻¹ · m⁻².

In a recent paper [5], Ranucci et al. actually demonstrated that DO_2 , rather than HCT, is the best predictor of ARF. Moreover, in the presence of perioperative blood transfusions, DO_2 remains the only determinant of ARF. While the simple notation that low HCT has a poor clinical value, since the only possible (and arguable) countermeasure is the blood transfusion, DO_2 may be modulated by increasing the pump flow.

The basic concept for assessing adequate pump flow should therefore be DO_2 . Below a critical value of DO_2 (about 270 mL · min⁻¹ · m⁻²) the DO_2 is insufficient to guarantee the various organs (and especially the kidney) oxygen demand, the VO_2 starts decreasing, and blood lactates (LAC) start increasing.

The level of DO_2 , below which LAC production begins, is identified even by the concept of “anaerobic threshold” (AT). In athletes, it is the level of expressed mechanical power at which LAC production begins; in a patient, it is the level of DO_2 below which the LAC production begins.

It has been demonstrated [6] that the LAC value during CPB is predictive for postoperative complications. Serial LAC determinations during CPB should be performed, to control the adequacy of DO_2 and to undertake adequate

Correspondence: Marco Ranucci, MD, Cardiovascular Center E. Malan, San Donato Hospital, Via Morandi 30, 20097 San Donato Milanese, Milan, Italy, e-mail: cardioanestesia@virgilio.it

qpump flow and/or HCT increase in order to restore a correct coupling between DO_2 and VO_2 .

References

1. Ranucci M, Pavesi M, Mazza E, Bertucci C, Frigiola A, Menicanti L, Ditta A, Boncilli A, Conti D. Risk factors for renal dysfunction after coronary surgery: the role of cardiopulmonary bypass technique. *Perfusion* 1994; 9: 319-326.
2. Fang WC, Helm RE, Krieger KH, Rosengart TK, DuBois WJ, Sason C, Lesser ML, Isom OW, Gold JP. Impact of minimum hematocrit during cardiopulmonary bypass on mortality in patients undergoing coronary artery surgery. *Circulation* 1997; 96 (Suppl II): 194-199.
3. Habib RH, Zacharias A, Schwann TA, Riordan CJ, Durham SJ, Shah A. Adverse effects of low hematocrit during cardiopulmonary bypass in the adult: should current practice be changed? *J Thorac Cardiovasc Surg* 2003; 125: 1438-1450.
4. Swaminathan M, Phillips-Bute BG, Conlon PJ, Smith PK, Newman MF, Stafford-Smith M. The association of lowest hematocrit during cardiopulmonary bypass with acute renal injury after coronary artery bypass surgery. *Ann Thorac Surg* 2003; 76: 784-792.
5. Ranucci M, Romitti F, Isgro G, Cotza M, Brozzi S, Boncilli A, Ditta A. Oxygen delivery during cardiopulmonary bypass and acute renal failure following coronary operations. *Ann Thorac Surg* 2005; 80:2213-2220.
6. Demers P, Elkouri S, Martineau R, Couturier A, Cartier R. Outcome with high blood lactate levels during cardiopulmonary bypass in adult cardiac operation. *Ann Thorac Surg* 2000; 70: 2082-2086.

Normalny przepływ w krążeniu pozaustrojowym – co to oznacza?

Marco Ranucci

Założenie normalnego, prawidłowego przepływu krwi podczas krążenia pozaustrojowego (CPB) podlega takim samym ograniczeniom, jak pojęcie normalnego, prawidłowego rzutu serca w fizjologii krążenia. W obu wypadkach pojęcie *normalny* jest mylne, bowiem normalny, fizjologiczny przepływ krwi (zarówno generowany przez pompę do krążenia pozaustrojowego, jak i przez serce) po prostu nie istnieje. O wiele właściwsze jest pojęcie *adekwatny przepływ krwi*, co oznacza, że przepływ jest wystarczający – adekwatny do zapotrzebowania metabolicznego tkanek i organów.

Zapotrzebowanie metaboliczne jest wyrażone zużyciem tlenu w jednostce czasu (VO_2), które dla osoby dorosłej, ważącej 70 kg, przytomnej i będącej w spoczynku wynosi ok. 250 ml/min. Wielkość ta może się wyraźnie zmieniać – rośnie podczas wysiłku fizycznego, osiągając nawet 5 000 ml/min, lub zmniejsza się, gdy człowiek śpi lub jest pod wpływem anestetyków. Dodatkowo dużą rolę w ustanowieniu chwilowego VO_2 odgrywa temperatura ciała, co jest szczególnie ważne podczas operacji kardiologicznej z zastosowaniem CPB. Dlatego też zwykle przyjmuje się prędkość przepływu krwi między 2000 a 3000 ml x min x m² zgodnie z wyliczoną wcześniej powierzchnią ciała (BSA) oraz z aktualną temperaturą ciała pacjenta. Jednakże prędkość przepływu krwi jest niewystarczającym parametrem opisującym adekwatność perfuzji narządowej w stosunku do zapotrzebowań metabolicznych organizmu. Prawidłowo adekwatność perfuzji narządowej wyraża się poprzez zaopatrzenie w tlen (DO_2), który jest równy iloczynowi stężenia tlenu w krwi tętniczej (ml/l) i prędkości przepływu pompy do krążenia pozaustrojowego. Stężenie tlenu we krwi tętniczej zależy jednocześnie od zawartości hemoglobiny i jej saturacji tlenem. Parametr ten jest jednak pomijany ze względu na to, że dzisiejsze oksygenatory zapewniają niemal stuprocentową (99,9%) saturację tlenem hemoglobiny przez cały czas trwania krążenia pozaustrojowego. Dlatego też wartość hemoglobiny oraz hematokrytu są niezwykle istotne do oznaczenia prawidłowego DO_2 .

W 1994 r. Ranucci i wsp. [1], badając 300 kolejnych chorych poddanych chirurgicznej rewaskularyzacji z zastoso-

waniem CPB wykazali, że znaczna hemodylucja podczas zabiegu kardiologicznego jest niezależnym czynnikiem ryzyka pooperacyjnej ostrej niewydolności nerek (ARF). Oznaczono dolną granicę bezpiecznej hemodylucji na poziomie hematokrytu >25%. Jednocześnie Fang [2] oraz Habib [3] uznali, że niski hematokryt jest niezależnym czynnikiem ryzyka powikłań pooperacyjnych, głównie zespołu małego rzutu, a także przyczyną zwiększonej śmiertelności wewnątrzszpitalnej. W opublikowanym w 2003 r. artykule Swaminathan i wsp. [4] potwierdzili zależność między niskim hematokrytem a ostrą niewydolnością nerek w okresie pooperacyjnym. W 2005 r. Ranucci i wsp. [5] raz jeszcze potwierdzili swoje wcześniejsze odkrycie, zawiązując jednocześnie granicę wystąpienia ARF, gdy hematokryt osiąga wartość między 23 a 26%.

Prawie wszyscy autorzy są zgodni, że występująca w okresie pooperacyjnym ostra niewydolność nerek wynika z niedostatecznego zaopatrzenia ich w tlen (DO_2) podczas krążenia pozaustrojowego. Zaskakujące jest jednak to, że wszystkie badania opisujące zależność między hematokrytem a ostrą niewydolnością nerek lub niewydolnością innych narządów nie wykazały, jakoby hematokryt był jedynym czynnikiem determinującym DO_2 podczas CPB. Drugim czynnikiem determinującym DO_2 jest prędkość przepływu krwi. Jeśli byłaby ona stała, wówczas nie oddziaływałaby na DO_2 , jednakże tak nie jest. We wszystkich badaniach prędkość przepływu krwi była zależna od wymaganego ciśnienia i wynosiła od 2000 do 3000 ml/min/m². W takich warunkach przy HCT równym 24% DO_2 wynosi 230 ml/min/m² (przy prędkości 2000 ml/min/m²) oraz 344 ml/min/m² (przy prędkości 3000 ml/min/m²).

W niedawno opublikowanym artykule Ranucci i wsp. dowiedli, że DO_2 jest o wiele lepszym wskaźnikiem wystąpienia ARF niż HCT. Co więcej, w wypadku śródoperacyjnych przetoczeń krwi DO_2 pozostaje jedynym czynnikiem warunkującym ostrą niewydolność nerek, podczas gdy HCT ma niewielką wartość kliniczną, a jedynym (i wciąż mocno dyskusyjnym) sposobem przywrócenia jego wyższej warto-

ści jest przetoczenie masy erytrocytarnej, DO_2 może być modulowane poprzez zmianę prędkości przepływu krwi w pompie do krążenia pozaustrojowego. Dlatego autorzy postulują, by DO_2 był podstawowym wykładnikiem dostatecznej prędkości przepływu. Poniżej wartości krytycznej DO_2 (ok. 270 ml/min/m²) zaopatrzenie narządów (głównie nerek) w tlen jest niewystarczające (VO_2 zwiększa się), co manifestuje się zwiększonym wyrzutem laktatów.

Poziom DO_2 , poniżej którego zaczyna się produkcja laktatów, określa się mianem granicy beztlenowej. U sportow-

ców jest to poziom siły, w którym rozpoczyna się produkcja mleczanów, natomiast u pacjenta jest to poziom DO_2 .

Wykazano, że stężenie mleczanów podczas CPB jest predyktorem powikłań pooperacyjnych [6]. Dlatego też powinno się standardowo oznaczać mleczały podczas CPB w celu ustanowienia optymalnego DO_2 i dokonania korekcji HCT lub prędkości przepływu krwi w pompie do krążenia pozaustrojowego. Korekcja DO_2 względem VO_2 powinna być najważniejszym elementem monitorowania podczas krążenia pozaustrojowego.

Comment

Jan Borowiec MD, PhD Associate Professor

Cardiothoracic Surgery Department, Uppsala University Hospital, Uppsala, Sweden



I cannot agree that the meaning of normality is a polemic one. Dr Ranucci writes in his article „The normal blood flow (either if generated by the heart or a pump) simply does not exist: much more correct is the notation of „adequate” blood flow...” If you take into account the universal meaning of the word “normal” so you can find that „adequacy” is incorporated in it. According to Dictionary of Swedish Academy (the famous body of The Eighteens who chose Nobel Prize winner in literature each year) „normal” means „according to rule, conforming to order of nature”. For us, cardiac surgeons, adequacy of blood flow follows the rules of nature. The nature used to be a rather complicated reality of plethora of different sometimes intricately interrelated processes and phenomena. So is also CPB during cardiac surgery.

It is an interesting short article regarding predominantly oxygen delivery and its implication for postoperative renal insufficiency. It contains most important results and some thoughts from Dr Ranucci and his team study published in December issue of *Annals* [1]. Every cardiac surgeon is very keen on reducing the morbidity associated with cardiac surgery. Acute renal dysfunction occurs in up to 10% of cardiac operations in infants and children, up to 40% of adults after cardiac surgery, with 1-5% requiring dialysis therapy, in whom the mortality rate can be as high as 80% [2, 3]. Pathomechanisms include decreased renal blood flow, hypothermia, and lack of pulsatile blood flow, embolism and a systemic inflammatory response.

Ranucci points out that the adequate oxygen delivery is very important for prevention of acute renal failure (ARF) which is good point. He proposes serial lactate determinations during CPB for estimation of optimal oxygen delivery, which is also good practical point. What is bad news is the fact that he seems to forget some other aspects of pathophysiological mechanisms of ARF like e.g. systemic inflammatory response (SIR). This response is associated with postoperative ARF but the interrelations between SIR and ischemia in lung and/or other organs under and after

CPB is rather complicated and still incomplete known.

In a recently published study the renal and brain dysfunction after CPB was found to be primarily caused by an oxygen deficit and secondary to the inflammatory response [4].

Author reminds that the patients with the critical HCT value (between 23% and 26%) have significantly higher ARF risk. It implicates transfusions because only adjusting pump flow on the basis of LAC monitoring will not always be possible. This in turn will rise the issue of risks inherent with transfusions as well as pathophysiological considerations as high Hb levels are known to precipitate some ischemic injury due to increased blood viscosity, increased shear stress forces leading to activation of platelets and reduced availability of nitric oxide, changed oxidative processes [5].

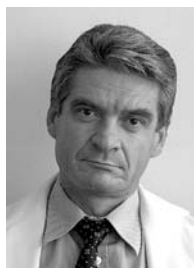
To find out the most optimal strategy for protection of every organ, not only kidney, is the ultimate quest: I do hope that studies on early detection of renal ischemia incorporating LCN2 gene controlled human neutrophilic lipocalin which are carried out in Uppsala will contribute to this quest. We are investigating the possibility to control signalling process using our experimental findings on the role of nitric oxide in inflammatory response during simulated CPB [6].

1. Ranucci M, Romitti F, Isgro G, Cotza M, Brozzi S, Boncilli A, Ditta A. Oxygen delivery during cardiopulmonary bypass and acute renal failure after coronary operations. *Ann Thorac Surg* 2005; 80: 2213-2220.
2. Tuttle KR, Worrall NK, Dahlstrom LR, Nandagopal R, Kausz AT, Davis CL. Predictors of ARF after cardiac surgical procedures. *Am J Kidney Dis* 2003; 41: 76-83.
3. Sorof JM, Stromberg D, Brewer ED, Feltes TF, Fraser CD Jr. Early initiation of peritoneal dialysis after surgical repair of congenital heart disease. *Pediatr Nephrol* 1999; 13: 641-645.
4. de Vroege R, Stooker W, van Oeveren W, Bakker EW, Huybregts RA, van Klarenbosch J, van Kamp GJ, Hack CE, Eijman L, Wildevuur CR. The impact of heparin coated circuits upon metabolism in vital organs: effect upon cerebral and renal function during and after cardiopulmonary bypass. *ASAIO J* 2005; 51:103-109.
5. Araujo M, Welch WJ. Oxidative stress and nitric oxide in kidney function. *Curr Opin Nephrol Hypertens* 2006; 15: 72-77.
6. Lahtinen M, Melki V, Adamik B, Khamis H, Borowiec JW. Nitric oxide and inflammatory response in simulated extracorporeal circulation. *Thorac Cardiovasc Surg* 2003; 51: 130-137.

Komentarz

prof. dr hab. med. Edward Malec

Klinika Kardiologii Dziecięcej, Polsko-Amerykański Instytut Pediatrii, CM UJ, Kraków



Obecnie, kiedy śmiertelność po operacjach kardiologicznych jest bardzo niska, więcej uwagi poświęcamy wynikom odległym. Skupiamy się zwłaszcza na ograniczeniu liczby powikłań i zapewnieniu operowanemu jak najlepszemu komfortu życia. Potencjalne problemy pooperacyjne są nie tylko następstwem wybranych metod chirurgicznych czy techniki chirurgicznej, nie mniejsze znaczenie ma jakość pozaustrojowej perfuzji stosowanej w czasie operacji.

Niewiele pozostało do usprawnienia, jeśli chodzi o technikę czy metody chirurgiczne, natomiast krążenie pozaustrojowe stosowane w czasie operacji jest dalekie od ideału. Kardiologowie, anestezjolodzy i perfuzjoniści ciągle podejmują próby jego doskonalenia.

Krążenie pozaustrojowe ma w zasadzie jeden podstawowy cel: dostarczenie wystarczającej ilości tlenu do tkanek, zapewnienie tlenowego metabolizmu komórek i ich żywotności w czasie wyłączenia pracy serca. Ilość tlenu dostarczanego do tkanek zależy od wielu czynników. Najważniejsze z nich to wielkość przepływu krwi, stężenie hemoglobiny (hematokryt), ciśnienie perfuzyjne, systemowy opór naczyniowy i temperatura. Modułacja tych czynników w czasie krążenia pozaustrojowego ma podstawowe znaczenie dla zapewnienia prawidłowego funkcjonowania narządów w przebiegu pooperacyjnym. Nie ulega wątpliwości, jak podkreśla autor artykułu, że odpowiednie dostosowanie takich

czynników, jak hematokryt, przepływ czy temperatura w czasie perfuzji pozaustrojowej, może zapewnić optymalną protekcję narządów w operacji. Kontrola czy skupienie się tylko na jednym czynniku może się przyczynić do niewystarczającej perfuzji tkankowej i w konsekwencji do uszkodzenia różnych narządów w wyniku ich niedotlenienia.

Oznaczanie stężenia mleczanów w surowicy krwi w czasie krążenia pozaustrojowego jest jednym z najlepszych możliwych sposobów monitorowania w czasie operacji, informujących o metabolizmie tkankowym i tym samym jakości perfuzji tkanek. Wzrost stężenia mleczanów powyżej 4 mmol/l może świadczyć o niewystarczającej perfuzji tkankowej i winien zmuszać do poszukiwania przyczyn odpowiadających za ten stan. Najczęściej wymaga to zmiany przepływu, zwiększenia hematokrytu lub zmniejszenia oporu naczyń systemowych. Większość tych przyczyn może być skutecznie wyeliminowana przez modulację wymienionych parametrów. Kontrola stężenia mleczanów w surowicy krwi w czasie operacji kardiologicznych jest od kilku lat rutynowo stosowana w ośrodku reprezentowanym przez autora tego komentarza, a ich nadmierny wzrost zmusza do natychmiastowego poszukiwania przyczyn tego stanu i próby ich wyeliminowania, w celu zapewnienia równowagi między zapotrzebowaniem a dostarczaniem tlenu do tkanek.

Prezentowana praca w bardzo syntetyczny sposób dostarcza cennych wskazówek kardiologom, perfuzjonistom i anestezjologom. Pozwala szerzej spojrzeć na problemy związane z krążeniem pozaustrojowym stosowanym w czasie operacji kardiologicznych.

może się przyczynić do dodatkowych powikłań o trudnej do określenia skali zarówno krótko po operacji, jak i w obserwacji odległej.

Komentarz

prof. dr hab. med. Jerzy Sadowski¹, dr med. Rafał Drwiła²

¹Klinika Chirurgii Serca, Naczyń i Transplantologii CM UJ, Kraków

²Katedra i Zakład Anestezjologii i Intensywnej Terapii CM UJ, Kraków



Autor zajął się problemem *normalnego* lub *adekwatnego* przepływu krwi w czasie krążenia pozaustrojowego, korelując wyliczony wskaźnik transportu tlenu DO_2 z występowaniem powikłań okołoperacyjnych. Znaczenie przez autora krytycznej wartości transportu tlenu DO_2 , wynoszącej 270 ml/min/m², poniżej której rozpoczyna się metabolizm beztlenowy, z narastaniem poziomu mleczanów i następnym wzrostem prawdopodobieństwa wystąpienia ostrej niewydolności nerek, jest cenną obserwacją kliniczną. Jej wprowadzenie do codziennej praktyki może się przyczynić do zmniejszenia liczby powikłań okołoperacyjnych, związanych ze stosowaniem krążenia pozaustrojowego [1].

Oczywiście, należy pamiętać, iż zwiększenie możliwości transportu tlenu poprzez przetoczenia masy erytrocytarnej

może się przyczynić do dodatkowych powikłań o trudnej do określenia skali zarówno krótko po operacji, jak i w obserwacji odległej.

Badanie poziomu mleczanów jako wykładnika adekwatności dostarczania tlenu DO_2 do jego zużycia VO_2 jest logicznym sposobem postępowania, godnym rekomendacji do rutynowego stosowania w każdym ośrodku kardiologicznym [2]. Tak rozumiane badanie adekwatności transportu tlenu do jego zużycia działa tylko na poziomie całego organizmu i, niestety, niewiele mówi o bieżącej sytuacji metabolicznej poszczególnych narządów. Autoregulacja przepływu przez narządy jest częściowo pod kontrolą równowagi kwasowo-zasadowej. Prowadzenie oznaczeń w schemacie alfa-stat oraz pH-stat różni się zasadniczo. Alfa-stat oznacza pH oraz CO_2 w temp. 37°C, a pH-stat w aktualnej temperaturze pacjenta. Na podstawie badania randomizowanego można stwierdzić, iż schemat alfa-stat lepiej utrzymuje autoregula-

cję mózgową (zaburzenia poznawcze centralnego systemu nerwowego 6 tyg. po zabiegu były mniejsze w grupie alfa-stat – 20 vs 49% – niż w grupie pH-stat) [3].

Podstawową chorobą cywilizacyjną XX i XXI w. jest miażdżyca, doprowadzająca do zaburzeń przepływu w różnych narządach i tkankach organizmu w wyniku niejednorodnego występowania zwężeń naczyń tętniczych. Do najczęściej występujących i najgroźniejszych powikłań po zabiegach w krążeniu pozaustrojowym należą zaburzenia neurologiczne. W celu zmniejszenia częstości ich występowania wprowadzamy w naszym ośrodku ciągłe oznaczenie saturacji hemoglobiny w mikrokrążeniu centralnego systemu nerwowego aparatem INVOS Cerebral Oximeter. Wstępne obserwacje wykazują duże różnice w bilansie tlenowym prawej i lewej półkuli mózgu pod wpływem zmian miażdżycowych w tętnicach dogłowych oraz różnych modyfikacji techniki krążenia pozaustrojowego [4, 5].

Podsumowując, w opinii autorów, o optymalnym prowadzeniu krążenia pozaustrojowego będzie można powie-

dzieć, gdy bilans tlenowy poszczególnych życiowo ważnych narządów będzie mógł być kontrolowany, zaś technika krążenia dostosowana do ich potrzeb.

Piśmiennictwo

1. Ranucci M, Romitti F, Isgro G, Cotza M, Brozzi S, Boncilli A, Ditta A. Oxygen delivery during cardiopulmonary bypass and acute renal failure after coronary operations. *Ann Thorac Surg* 2005; 80: 2213-2220.
2. Demers P, Elkouri S, Martineau R, Couturier A, Cartier R. Outcome with high blood lactate levels during cardiopulmonary bypass in adult cardiac operation. *Ann Thorac Surg* 2000; 70: 2082-2086.
3. Patel RL, Turtle MR, Chambers DJ, James DN, Newman S, Venn GE. Alpha-stat acid-base regulation during cardiopulmonary bypass improves neuropsychologic outcome in patients undergoing coronary artery bypass grafting. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1996; 111: 1267-1279.
4. Ricci M, Lombardi P, Schultz S, Galindo A, Coscarella E, Vasquez A, Rosenkranz E. Near-infrared spectroscopy to monitor cerebral oxygen saturation in single-ventricle physiology. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2006; 131: 395-402.
5. Olsson C, Thelin S. Regional cerebral saturation monitoring with near-infrared spectroscopy during selective antegrade cerebral perfusion: diagnostic performance and relationship to postoperative stroke. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2006; 131: 371-379.

Komentarz

dr med. Jacek Wojarski

Katedra i Oddział Kliniczny Kardiologii i Transplantologii, Śląska Akademia Medyczna, Śląskie Centrum Chorób Serca, Zabrze



Brawo! Kolejny znakomity artykuł zamieszczony na łamach naszego kwartalnika. Wielki kardiolog Rene Favoloro, którego mieliśmy zaszczyt gościć w Śląskim Centrum Chorób Serca w Zabrzu, w jednym ze swoich wykładów powiedział, że chirurgia wieńcowa to *chirurgia szczegółów*. Pamiętanie o wszystkich elementach operacji i prawidłowe wykonanie nawet najdrobniejszych procedur zarówno w czasie zabiegu, jak i w okresie przed- i pooperacyjnym składa się na ostateczne powodzenie. A to dlatego, że każdy *szczeół* jest ważny. I ważne jest w związku z tym, aby te szczegóły rozpoznawać i po prostu je znać. I w tym kontekście artykuł Marco Ranucciego jest znakomity. W pogłębiony sposób ukazuje zagadnienie prowadzenia krążenia pozaustrojowego tak, aby uniknąć powikłań, zwłaszcza z uwzględnieniem niewydolności nerek.

Mając głęboką wiedzę na temat zużycia tlenu i czynników wpływających na dostarczanie tlenu do tkanek, autor wskazuje *szczegóły*, na które należy zwrócić uwagę, aby nie dopuścić do powikłań. W jasny i logiczny sposób pokazuje, jaki może być mechanizm wystąpienia powikłań, mimo zapewnienia należącego, wyliczonego z parametrów ciała pacjenta przepływu krwi narzucanego przez krążenie pozaustrojowe. Wyraźnie zasygnalizowana wiadomość, że pojęcie normalnego, czy wyliczonego

przepływu jest złudne. Pojęcie przepływu *adekwatnego*, wynikającego ze zrozumienia mechanizmów transportu tlenu pozwala na bardzo praktyczne przełożenie tej wiedzy na działania podejmowane na sali operacyjnej. Zapewnienie minimalnej (25%!!) wartości hematokrytu i wyliczenie przepływu z pompy na podstawie koniecznego minimum dostarczanego tlenu (270 ml/m^2), to ważne szczegóły, pozwalające uniknąć powikłań u tych chorych, u których rezerwy biologiczne są bardzo małe. Z mojego doświadczenia chciałbym dodać, że niezależnie od wymienionych poprzednio, ważny jest parametr ciśnienia tętniczego, uzyskiwanego w czasie prowadzenia krążenia pozaustrojowego. Ma to znaczenie zwłaszcza w u starszych pacjentów, z miażdżycą obwodową naczyń, nadciśnieniem tętniczym. W tej grupie chorych średnie ciśnienie tętnicze w czasie zwykłego funkcjonowania jest bardzo często powyżej 100 mmHg!! Są to ciśnienia daleko odstające od standardowych 60 mmHg, które jakże często jest uznawane za bezpieczny próg nerkowy. Adekwatny gradient ciśnień jest niezbędny, aby uzyskiwać perfuzję w poszczególnych narządach. Od dawna w czasie zabiegów, które wykonuję, staram się, aby ciśnienie średnie systemowe nie było niższe niż 75 mmHg. W wymienionej grupie wyższego ryzyka średnie ciśnienia perfuzyjne utrzymywane są powyżej 80 mmHg.

Szczegóły, szczegóły, szczegóły, ale dla dobra chorego i chirurga warto pamiętać o nich wszystkich.

Komentarz

dr med. Stefan Ostapczuk
Klinika Kardiologii, Duisburg, Niemcy



Ewolucja, męcząc się przez 4,5 mld lat ze stworzeniem człowieka nie przewidziała, że jej cudowne dzieło 5 kwietnia 1951 r. po raz pierwszy zostanie podłączone przez Clarence'a Dennisa do krążenia pozaustrojowego (KP). Wyposażyła ona człowieka w mechanizmy *odrzucające* KP tak samo, jak odrzucający jest przeszczep. Mechanizmy te po-

zwoliły człowiekowi przeżyć w tym wrogim dla niego wszechświecie i nie tak łatwo jest je pokonać za pomocą jednej pigułki czy amputacji.

Mimo że od tej chwili minęło ponad 50 lat, zaangażowano olbrzymi potencjał badawczy, tysiące pacjentów pozostawiło swoje życie na ołtarzu nauki. Od tamtego czasu niewiele się zmieniło. Nadal jest to metoda niefizjologiczna, obciążona ryzykiem wystąpienia wielu powikłań. Zrozumieliśmy jedynie wiele mechanizmów *odrzucających* KP. To, że człowiek przeżywa tego rodzaju operacje, graniczy z cudem.

By ograniczyć konieczność korzystania z KP, kardiocirurgia wymyśliła operacje bez użycia krążenia pozaustrojowego. Ale szybko okazało się, że one również są obciążone ryzykiem. Po skręceniu w czasie tych operacji dużych naczyń o 180 stopni, uciśnięciu lewej komory tak, że porusza się jedynie płatek przegrodowy zastawki trójdzielnej i *wrzuconiu* serca do jamy opłucnowej, tzw. *normal flow* nie jest w stanie zapewnić nawet kardioanestezjolog z 20-letnim stażem pracy, dwoma strzykawkami *czystej* adrenaliny w dłoniach i zroszonymi potem skrońmi. Nie można więc się dziwić, że i w tej grupie chorych występują psychozy poproceduralne, zatory tętnicze, powikłania płucne, niewydolność nerek czy powikłania wywołane wstrząsem kardiogennym pochodzenia kardiologicznego. Jak widać, jest to jeszcze jedno zło konieczne.

Ale – jak pokazuje życie – wielu chorych przeżywa operacje kardiologiczne z użyciem KP i przez wiele lat cieszy się dobrym zdrowiem. Nie oznacza to jednak wcale, że KP zapewniło im w czasie operacji *normal pump flow*, organizm tych ludzi po prostu odbudował szkody wyrządzone przez krążenie pozaustrojowe i tzw. *normal pump flow*.

Bo należy pamiętać o tym, że reperfuzyja po KP, czyli procesy naprawcze niedokrwionych narządów w czasie KP, mogą się stać przyczyną niewydolności nerek, płuc, wątroby i serca w okresie poproceduralnym.

Ze względów dydaktycznych należy przyjąć pewne kryteria tzw. normalnego rzutu pompy tętniczej (trudno jest mówić

o *normalnym*, może lepiej nazywać je *adekwatnym* – odpowiednim do warunków, jak to czyni autor). Wartości podane przez autora są przyjęte na całym świecie. Normalną perfuzję zapewnia też należyty spływ krwi żyłnej, o czym najczęściej się zapomina. Ale zagięcie drenów *żylnych*, co nie jest takie rzadkie, gdy chirurg pochłonięty jest przez *furor chirurgicus*, prowadzi często do *nieoczekiwanego* wzrostu enzymów wątrobowych lub też powiększenia się obwodu głowy pacjenta. Najczęściej fenomeny te mijają bez trwałych następstw.

Znacznie trudniejszą sprawą jest balansowanie między hemodilucją (wprowadzoną do kliniki przez Panico i Neptune w 1959 r.), hematokrytem a utrzymaniem właściwej podaży tlenu do tkanek. Badania wykonane przez autora na przykładzie nerek wykazują dobitnie ten problem, a szczególnie wyraźnie widać na tym przykładzie znaczenie podaży tlenu. Parametr ten wydaje się oddawać najlepiej wydolność perfuzji, ale ile tlenu dociera (np. poprzez zwężone naczynia) w rzeczywistości do komórki i pozwala na utrzymanie jej metabolizmu, tego nie wiadomo, i nie wiem, jaki wskaźnik tutaj zastosować. W porównaniu z mózgiem nerki są narządem stosunkowo odpornym na niedokrwienie. Mózg znacznie trudniej poddaje się badaniu i to, co my wiemy o jego funkcji w czasie KP, to objawy kliniczne, które pozostają po zakończeniu KP. Czyli praktycznie niewiele wiemy o perfuzji mózgu w czasie KP. Hemodilucja poprawia przepływ przez mózg, ale już przy hematokrycie poniżej 23% liczba powikłań niedokrwienych mózgu zwiększa się 3-krotnie. Od 30 do 70% pacjentów operowanych z użyciem KP i zachowaniu tzw. *normal pump flow* wykazuje zaburzenia neuropsychologiczne, w tym 2 do 5% przeżywa *insult*. Ta grupa pacjentów wymaga dłuższego pobytu na oddziałach intensywnej terapii oraz leczenia usprawniającego. Kardiocirurgia staje się drogą.

Codziennie używany w praktyce *normal pump flow* powoduje uszkodzenia w płucach, wątrobie, jelitach oraz krwi, która bezpośrednio styka się z ewolucyjnie wrogą powierzchnią maszyny płuco-serca. Rzadko jednak zastanawiamy się nad tymi wszystkim mechanizmami i parametrami zapewniającymi tzw. *normal pump flow* i postępujemy rutynowo, co też ma wiele zalet.

Trudno jest w medycynie i wielu innych naukach ustalić ścisłe reguły i kryteria. Im więcej wiemy, tym bardziej wątpimy, jak w zasadzie nieoznaczoności nie można podać jednocześnie dokładnego położenia i pędu (iloczyn masy i prędkości punktu materialnego) elektronu, tak samo nie wiemy, co oznacza *normal pump flow* dla pojedynczego receptora benzodiazepinowego neuronu naszej kory mózgowej.

Komentarz

dr med. Kazimierz Widenka
II Klinika Kardiochirurgii, Katowice



Artykuł Marco Ranucciego *What is "normal" pump flow* porusza niezwykle istotny w kardiochirurgii temat. Mimo rozwoju technik mało inwazyjnych krążenie pozaustrojowe pozostaje złotym standardem zarówno w chirurgii wieńcowej, jak i zastawkowej.

Dostarczanie tlenu (DO_2) do tkanek zależne jest od rzutu minutowego serca (CO), stężenia hemoglobiny (Hb) oraz zawartości tlenu we krwi tętniczej i opisywane jest przez poniższe równanie:

$$DO_2 \text{ (ml } O_2/\text{min)} = CO \text{ (l/min)} \times Hb \text{ concentration (g/l)} \\ \times 1.31 \text{ (ml } O_2/\text{g Hb)} \times \% \text{ saturation}$$

W warunkach fizjologicznych dostarczanie tlenu do tkanek w wypadku zwiększonego zapotrzebowania modyfikowane jest rzutem minutowym serca. Zawartość hemoglobiny oraz saturacja tętnicza tlenu są wartościami stosunkowo stałymi w warunkach fizjologicznych. Przy zużyciu 250 ml tlenu na minutę 25% tlenu krwi tętniczej podlega ekstrakcji. W efekcie saturacja mieszanej krwi żyłnej spada do ok. 70%. Jedynym mechanizmem pozwalającym na zwiększenie ilości tlenu dostarczanego do tkanek, oprócz wspomnianego wcześniej rzutu minutowego serca, jest zwiększona ekstrakcja tlenu z krwi tętniczej.

W wypadku krążenia pozaustrojowego dostarczanie tlenu do tkanek staje się niezależne od naturalnych możliwości homeostatycznych organizmu. Niedotlenienie tkanek nie prowadzi do naturalnego zwiększenia rzutu minutowego serca, który narzucony jest przez pompę do krążenia pozaustrojowego. W efekcie może się zmieniać jedynie ekstrakcja tlenu z krwi tętniczej, co prowadzi do spadku wysycenia tlenem mieszanej krwi żyłnej (SvO_2). Wartość mieszanej saturacji żyłnej nie powinna spadać poniżej 60% w trakcie krążenia pozaustrojowego. Należy jednak pamiętać o regionalnych różnicach w ekstrakcji tlenu i wynikających z tego implikacji [1]. Istotne znaczenie dla wyniku operacji kardiochirurgicznej ma

utrzymywanie prawidłowych wartości ciśnienia tętniczego krwi. Naczynia mózgowie i nerkowe tracą możliwość autoregulacji przepływu poniżej 55–60 mmHg wartości ciśnienia perfuzji. W pracy Golda i wsp. udowodniono, że utrzymywanie średniego ciśnienia tętniczego krwi między 80 a 100 mmHg prowadzi do zmniejszenia liczby powikłań neurologicznych oraz śmiertelności [2]. Zgodnie z przedstawionym powyżej równaniem hematokryt ma niezwykle istotny wpływ na prawidłowe dostarczanie tlenu. Nic więc dziwnego, że zarówno w cytowanej przez Marco Ranucciego pracy Swaminathana [3] oraz wcześniejszej DeFoe [4] niskie wartości hematokrytu związane były z wieloma powikłaniami, takimi jak niewydolność nerek [3], zastosowanie balonu do kontrapulsacji wewnątrzaoortalnej oraz śmiertelnością wewnątrzszpitalną [4].

Niezwykle istotne w związku z powyższym jest ciągłe monitorowanie parametrów wskazujących na prawidłową oksygenację tkanek. Do tych parametrów można zaliczyć badania gazometryczne krwi tętniczej, mieszaną saturację żylną, wartość hematokrytu, ciśnienie tętnicze krwi, rzut minutowy aparatu do krążenia pozaustrojowego oraz diurezę.

Dopiero tak prowadzone i monitorowane krążenie pozaustrojowe pozwala na zapewnienie maksymalnego bezpieczeństwa pacjenta w trakcie zabiegu kardiochirurgicznego.

Piśmiennictwo

1. Lindholm L, Hansdottir V, Lundqvist M, Jeppsson A. The relationship between mixed venous and regional venous oxygen saturation during cardiopulmonary bypass. *Perfusion* 2002; 17: 133-139.
2. Gold JP, Charlson MR, Williams-Russa P, et al. Improvements of outcomes after coronary artery bypass: a randomized trial comparing intraoperative high versus low mean arterial pressure. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1995; 110: 1302-1314.
3. Swaminathan M, Phillips-Bute BG, Conlon PJ, Smith PK, Newman MF, Stafford-Smith M. The association of lowest hematocrit during cardiopulmonary bypass with acute renal injury after coronary artery bypass surgery. *Ann Thorac Surg*, Sep 2003; 76: 784-791.
4. DeFoe GR, Ross CS, Olmstead EM, Surgenor SD, Fillinger MP, Groom RC, Forest RJ, Pieroni JW, Warren CS, Bogosian ME, Krumholz CF, Clark C, Clough RA, Weidner PW, Lahey SJ, Leavitt BJ, Marrin CA, Charlesworth DC, Marshall P, O'Connor GT. Lowest hematocrit on by-pass and adverse outcomes associated with coronary artery by-pass grafting. *Ann Thorac Surg* 2001; 71: 769-776.

Komentarz

dr med. Marek Gwoździewicz
Cardiac Surgery Department, University Hospital Olomouc, Czech Republic



While putting a patient on cardiopulmonary by-pass (CPB), it is mandatory to provide him with adequate blood perfusion (oxygen delivery).

In their paper, authors from Milan (Italy) suggest to use arterial oxygen content (DO_2) (incorporating a value of hematocrit) times the pump flow, instead of pump flow alone in order to

calculate adequate organ perfusion during CPB. The presented article also addresses an important issue of the lowest level of HCT that would be sufficient for organ perfusion during CPB.

The indispensable part of the CBP procedure is hemodilution. It was introduced to reduce blood viscosity and increase tissue perfusion during CPB. Hemodilution means lowering the HCT. Most centers try to achieve HCT below 30% during CPB to improve microcirculatory flow. With

decreasing HCT, however the number of erythrocytes carrying oxygen to various organs decreases per minute. Therefore, it seems reasonable to approach each patient individually, taking into account his actual HCT while concerning the pump flow value.

The question to be answered however is what is less harmful for the patient? Is it high pump flow with low HCT or vice versa?

To control the adequacy of DO_2 the authors advocate to measure lactate acid (LAC).

Increased LAC production during CPB is usually a result of inadequate tissue oxygen delivery and was proved to be associated with increased postoperative morbidity and mortality.

Measurement of LAC production in order to assess organ hypoperfusion is rather cumbersome since it

depends on many factors including the time of hypoperfusion (time on CPB).

I would be very careful, though with comparing the LAC production in athletes to LAC metabolism in cardiac patients. In both cases, LAC production is associated with glycogenolysis occurring in cytoplasm instead of glycogen oxygenation in mitochondria but the reason for this is quite different. In sportsmen, it is an insufficient (too slow) oxygen supply in a state of hyperperfusion. In cardiac patients, it is absolute lack of oxygen (hypoperfusion) that causes glycogenolysis. Moreover, in patients on CPB the heart, which normally participates most on LAC metabolism, both anaerobic glycogenolysis and aerobic fosfolylation, is excluded.

It is worth reminding that LAC is measured in plasma. That is why its value should be always converted to actual HCT.