proLékaře.cz | 13.11.2026

Neuroendoskopie a matematický model dynamiky mozkových komor

Neuroendoscopy and Mathematical Model of Dynamics of Cerebral Ventricles

Souhrn

Při endoskopické operaci jednokomorového hydrocefalu se v mezikomorovém otvoru objevil blanitý lalok chorioidálního plexu, který jako záklopka střídavě ovládal průtok likvoru skrze foramen Monroe. Toto pozorování se stalo podkladem pro konstrukci korektního matematického modelu. Jeho výsledkem je originální poznatek, že pohyb likvoru má dvojí povahu: jednak pomalý pohyb průběžný a jednak mnohonásobně rychlejší kmitavý pohyb mezi horními třemi komorami: dvěma postranními a s nimi propojenou komorou třetí. Biologický význam tohoto pohybu tkví pravděpodobně v tom, že tlumí pulzové nárazy krve do mozku, a zabezpečuje tak nervové soustavě optimální prostředí. Je to asi hlavní funkce likvorového prostoru hlavy.

Abstract

During an endoscopic surgery for a uni-ventricular hydrocephalus, a membranous lobe of chorioidal plexus appeared within the intraventricular opening that, as a safety valve, controlled by turns the liquor flow through Monro's foramen. This observation became the base for constructing a proper mathematical model. It resulted in the original knowledge that the liquor motion is of two different types of nature: a slow continuous motion and much faster flutter among three upper ventricles: two lateral ones and the third ventricle connected with them. Biological importance of this motion probably consists in the fact that it absorbs pulsatory rushes of blood into the brain thus securing the optimal environment for the nervous system. This may be the main function of the liquor space within the head.

Z. Novák

Neurochirurgická klinika LF MU
a FN U sv. Anny, Brno

✉

doc. MUDr. Zdeněk Novák, CSc.
Neurochirurgická klinika LF MU,
FN U sv. Anny
Pekařská 53, 656 91 Brno
e-mail: zdenek.novak@fnusa.cz

Přijato k recenzi 29. 12. 2005
Přijato do tisku 21. 3. 2006

Klíčová slova

záklopkový fenomén – endoskopická pozorování – matematický model – kmitavý pohyb likvoru

Key words

safe-valve phenomenon – endoscopic observations – mathematical model – liquor flutter

Podporováno grantem IGA MZ ČR NR/7805-2.

proLékaře.cz | 13.11.2026

Úvod

Likvorovému prostoru hlavy se od počátku připisovala úloha vodního obalu mozku, která ho chrání před mechanickým poškozením. Když však bylo zjištěno, že se likvor může přemísťovat do durálního vaku míchy, přisoudila se mu úloha regulátoru tlaku při udržování nitrolební dynamické rovnováhy podle známého Monroeův-Kellieho zákona. Byl to počátek objektivního přístupu k vyšetřování složitých vztahů, které v likvorovém prostoru působí. Měření likvorového tlaku, které je analogický tlaku nitrolebnímu, se následně stalo základní klinickou metodou.

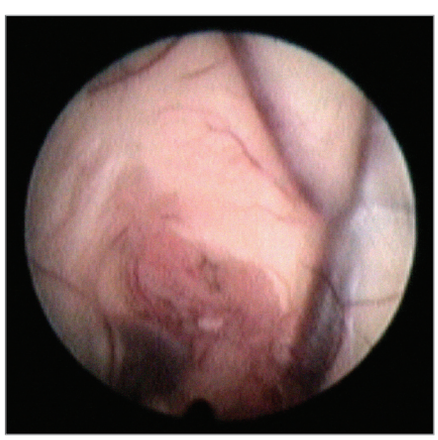
V období nastupující výpočetní techniky a zanesení matematických zákonitostí do biologických věd navrhl Marmarou [1] matematicky formulovaný test závislosti likvorového tlaku na změně objemu v likvorovém prostoru a využil jej pro kvantitativní vyjádření jeho ústupnosti, kompliance, a její inverzní funkce, elastance. Tento široce využívaný test se později stal podnětem [2–5] k tomu, aby vznikly matematické modely hydrocefalu, které se teoreticky opíraly o tlakové hodnoty v likvorovém prostoru i v jeho okolí a počítalo se i s jejich elasticitou.

Inspirující pokroky poznání funkce likvorového prostoru hlavy však mohly nastat až působením neuroendoskopie.

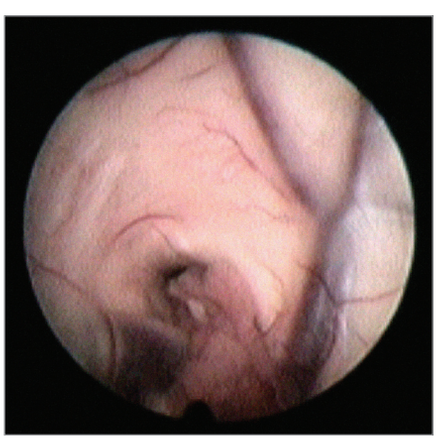
Vlastní pozorování

Při zkušenosti s téměř 400 endoskopickými operovanými nemocnými se jen vzácně naskytla příležitost nahlédnout do mechanizmů složité soustavy, kterou likvorový prostor představuje. Bylo tomu šťastnou náhodou u 16letého nemocného, který před 2 lety překonal virovou meningitidu. Od té doby trpěl stálými bolestmi hlavy. Při CT vyšetření bylo zjištěno jednostranné rozšíření levé postranní komory a při MRI kontrole se nápadně zobrazil chorioidální plexus v blízkosti interventrikulárního otvoru (foramen Monroe). Proto se předpokládal jeho uzávěr. Když se však na něj při operaci zacílil endoskop, naskytl se překvapující pohled. Z hypertrofického chorioidálního plexu vyrůstal blanitý lalok, který jako záklopka střídavě zakrýval a zase uvolňoval foramen Monroe (obr. 1, obr. 2). Jeho rytmický pohyb odpovídal srdeční frekvenci. V systole se záklopka k otvoru přichýlila a uzavřela ho, ale v diastole se zase odvrátila a celý otvor odkryla.

Vysvětlení spočívalo v tom, že se při systole mozková hmota zvětší dodanou krví, a zvýší se tím tlak na obsah likvoru v postranních mozkových komorách, které v závislosti na srdeční činnosti působí jako sekundární srdce. V „systole mozkové komory" v ní tlak stoupne a odpovídající objem likvoru se z ní vyhrne mezikomorovým otvorem do III. mozkové komory. Znamená to, že průtok mozkomíšní tekutiny je sice jednosměrný, ale pulzující v závislosti na pulzaci srdce. V „diastole mozkové komory" v ní tlak klesne spolu s objemem mozkové hmoty, neboť příslušná část krve se z mozku navrací žilní soustavou k srdci. Také část likvoru vržená do III. mozkové komory má tendenci vrátit se refluxem zpět do postranní mozkové komory. Průtok likvoru skrze foramen Monroe se tak stane protisměrný při každé srdeční akci.



Obr. 1. Endoskopický pohled na zakryté foramen Monroe.



Obr. 2. Endoskopický pohled na odkryté foramen Monroe.

Po kruhové koagulaci chorioidálního plexu se jeho lalok odstranil a mezikomorový otvor se trvale otevřel. Výsledek operace se však ještě zajistil septostomií proti případné recidivě.

Výsledky

Pozorování záklopkového fenoménu svádělo k jeho matematickému popisu. Této úlohy se ujal Ústav hydrologie SAV v Bratislavě a řešení se stalo obsahem společné grantové studie.

V prvním přiblížení se přijal předpoklad, že lebeční dutina zabezpečuje vyrovnávání tlaku tím, že udržuje trvalou výměnu objemu likvoru V za jednotku času t mezi dvěma systolami přenášenými na mozkovou hmotu. Tuto činnost lze vyjádřit rozdílem tlaků v zúčastněných mozkových komorách p_1 a p_2 a velikostí otvoru S mezi nimi podle vztahu

$$\Delta V/\Delta t = \pm k \cdot (p_2 - p_1) \cdot S, \qquad [1]$$

kde k je konstanta závislá na geometrii a viskozitě.

Uvedená závislost průtoku likvoru $\Delta V/\Delta t$ na tlakovém gradientu popisuje pomalý jednosměrný tok likvoru odpovídající množství, které se v komorách tvoří a postupně z nich uniká skrze IV. mozkovou komoru. Avšak už přibližný přepočet pulzační dynamiky likvoru v oblasti foramen Monroe ukázal, že pulzační rychlost likvoru a její časová změna vyžaduje komplexnější hydrodynamický model soustavy mozkových komor.

Přitom se ukázala nutnost vzít do úvahy průtok likvoru mezikomorovým otvorem, objem mozkové komory a plochu její stěny, na kterou v průběhu srdeční akce působí tlak mozkové hmoty ze zevní strany a tlak likvoru uvnitř mozkové komory. Představují síly, které zodpovídají za deformaci mozkové komory a za pružnost hranice mezi oběma. Tak vznikl základní tvar matematického modelu jedné, 2 až 3 mozkových komor, pravé a levé mozkové komory č. 1 a 2 v součinnosti s III. mozkovou komorou č. 3. Postranní horní komory jsou napojené na III. mozkovou komoru mezikomorovými otvory s plochami S_{01} a S_{02}. Třetí dolní otvor ve III. mozkové komoře, ústí do akveduktu,

proLékaře.cz | 13.11.2026

slouží k rovnoměrnému propouštění likvoru do dolní části likvorových cest.

Kvalitativní analýza dynamiky likvoru v komorách ukázala, že tento pomalý průtok likvoru je v porovnání s pulzačním tokem mezi komorami zanedbatelný. Připravovaný matematický model tuto časově proměnnou dynamiku likvoru simuluje v plném rozsahu prostřednictvím systému nelineárních diferenciálních rovnic I. řádu [6]:

$$\frac{dQ_1}{dt} + \sum_{j=1}^{3}\left(\alpha_j Q_j^2 + \frac{1}{\rho} a_j p_j\right) = 0\,,$$

$$\frac{dQ_2}{dt} + \sum_{j=1}^{3}\left(\beta_j Q_j^2 + \frac{1}{\rho} b_j p_j\right) = 0\,, \qquad [2]$$

$$\sum_{j=1}^{3} Q_j = 0 \;;\; \text{pro } j = 1,2,3$$

pro 3 neznámé průtoky komorami Q_j při známých průměrných tlacích pj(t) v komorách, v nichž koeficienty a_j, b_j, α_j, β_j jsou závislé na geometrii komor jako funkce ploch jejich stěn S_j a charakteristických poloměrů R_j, ρ je specifická hmotnost likvoru a t je čas.

Základní tvar korektně odpovídá fyziologickým poměrům, které však mohou příslušnými vstupními údaji simulovat nekomunikující i komunikující hydrocefalus vzhledem k možným nelinearitám objemu mozkových komor a průtokových otvorů.

Z modelu vyplývá, že tok likvoru v průtokových cestách je dvojí: pomalý průběžný a mnohonásobně rychlejší pohyb periodický kmitavý. Jeho hlavní smysl pravděpodobně spočívá v tom, že tlumí pulzové nárazy krve do mozku, aby jeho funkční struktury mohly pracovat v optimálních podmínkách.

Diskuse

Představa o funkci likvorového prostoru, kterou se vyrovnávají tlakové poměry v lebeční dutině, se dostala na novou úroveň. Původní matematický model chování likvoru v komorové soustavě mozku bral do úvahy jeho regulační úlohu. Ve své podstatě vystihoval globální poměry při komunikujícím hydrocefalu a jeho aplikace na poruchy průtoku v likvorových cestách se proto nejeví oprávněná. Přesto se tento test podle Marmaroua používá i při různých poruchách likvorových cest. S přihlédnutím ke spongioelastickým vlastnostem mozku podle Hakima se však matematické modely zaměřily na rozhraní mezi likvorem a okolní mozkovou tkání při vzniku hydrocefalu. Až korektně formulovaný matematický model, který vychází z analýzy endoskopicky pozorovaného záklopkového fenoménu ve foramen Monroe, napomáhá pochopit funkční součinnost 3 horních mozkových komor 2 postranních a další jedné, spojené navzájem mezikomorovými otvory. Zdůvodňuje originální představu, že nad pomalým jednosměrným průtokem likvoru převažuje jeho rychlý kmitavý pohyb v rytmu srdeční frekvence. Vysvětluje současně jeho biologický smysl v tom, že tlumí pulzové nárazy krve do mozku. Odkryla se tím pravděpodobně hlavní funkce likvorového prostoru v lebeční dutině.

Literatura

1. Marmarou A. A theoretical and experimental evaluation of the cerebrospinal fluid systems [dissertation]. Philadelphia: Drexel University 1973.
2. Hakim S, Venegas JG, Burton JD. The physics of the cranial cavity, hydrocephalus and normal pressure hydrocephalus: mechanical interpretation and mathematical model. Surg Neurol 1976; 5(3): 187–210.
3. Nagashima T, Tamaki N, Matsumoto SB, Seguchi Y. Biomechanics of hydrocephalus: a new theoretical model. Neurosurgery 1987; 21(6): 894–904.
4. Kaczmarek M, Subramaniam RP, Neff SR. The hydromechanics of hydrocephalus: steady state solutions for cylindrical geometry. Bull Math Biol 1997; 59(2): 295–323.
5. Taylor Z, Miller K. Reassessment of brain elasticity for analysis of biomechanisms of hydrocephalus. J Biomech 2004; 37(8): 1263–9.
6. Kosorin K. Matematický model tlakového a prietokového režimu v uzavretej sústave pružných komôr. J Hydrol Hydromech. In press.