

EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

Dirbtinių intrakranijinės aneurizmos modelių kūrimas angiografiniams tyrimams

Edvardas Žurauskas^{1, 2}, Jurgita Ušinskienė³, Virginija Gaigalaitė⁴, Raphael Blanc⁵,
Andrius Ušinskas⁶, Arvydas Laurinavičius^{1, 2}

¹Valstybinis patologijos centras, ²Vilniaus universiteto Medicinos fakulteto Patologijos, teismo medicinos ir farmakologijos katedra, ³Vilniaus universiteto ligoninės Santariškių klinikų Tomografinių tyrimų skyrius,

⁴Vilniaus greitosios medicinos pagalbos ligoninės Neurologijos ir neurochirurgijos klinika,

⁵Henri Mondor ligoninės Neuroradiologijos skyrius, Paryžius, Prancūzija,

⁶Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektroninių sistemų katedra

Raktažodžiai: dirbtiniai kraujagyslių modeliai, intrakranijinės aneurizmos, metodologija.

Santrauka. Tikslas. Sukurti ir aprašyti kraujagyslių su intrakranijine aneurizma *in vitro* modelį, kuris atitinka žmogaus galvos smegenų arterijų anatomiją ir gali būti taikomas radiologiniams tyrimams.

Tyrimo medžiaga ir metodai. Modelių gamybai naudotas vaškas („K2 exact“, „S-U-CERAMO-CAPS-WAX“), girtlio masė, želatina bei silikonas („Silicone 10015 Den Braven“, „Elastosil 7683/25“, „Elite Double 32 Shore-A“, „Rema-Sil“). Taikytos dvi modelių gamybos technologijos: plastikinių vamzdelių sujungimo būdas bei atliejimo (angl. lost core) technika. Smegenų arterinio žiedo bei aneurizmos eskizams naudoti rotacinės trimatės angiografijos vaizdai su vidinės miego arterijos smegeninės dalies išsišakojimo į priekinę ir vidurinę smegenų arterijas aneurizma, stikliniai aneurizmos modeliai bei anatominiai žmogaus galvos smegenų arterijų preparatai.

Rezultatai. Pirmą kartą Lietuvoje sukurti ir aprašyti aštuoni dirbtiniai žmogaus galvos smegenų arterijų su aneurizmomis modeliai. M1 modelis sukurtas pagal smegenų arterinio žiedo anatomiją su pamatinės arterijos aneurizma, M2 – pagal rotacinės angiografijos vaizdus su vidinės miego arterijos smegeninės dalies išsišakojimo į priekinę ir vidurinę smegenų arterijas aneurizma, BM1, BM2 – pagal stiklinius šoninės aneurizmos maketus. M3 pagamintas iš plastikinių vamzdelių, aneurizma sukurta sudarius T formos jungtį. M4, M5 bei M6 suformuoti iš anatominių žmogaus galvos smegenų arterijų preparatų atliejų, su nulipdytomis pamatinės arterijos aneurizmomis.

Išvados. Dviejų komponentų silikonas yra tinkamas anatominių arterijų preparatų atliejų gamybai. Tinkamas silikono kietumo koeficientas yra 32. Želatinos tirpalas 50°C temperatūros santykiu 1:1 su vandeniu gali būti naudojamas kraujagyslių kopijų gamybai. Vaškas ir jo pagrindo masės lengvai formuojamos gaminant kraujagyslių modelius rankomis, tačiau netinka anatominių arterijų preparatų užpildymui.

Įvadas

Dirbtiniai kraujagyslių modeliai plačiai naudojami hemodinaminiais *in vitro* eksperimentams (1, 2), naujiems tyrimams (3–5) bei gydymo metodams įvertinti (6), mokymuisi bei intervencinėms ir chirurginėms procedūroms imituoti (7).

Literatūroje pateikiami pagrindiniai dirbtinio modelio reikalavimai: turi tiksliai imituoti žmogaus arterijų anatomiją ir tiktai įvairiems radiologiniams tyrimams: kompiuterinė tomografija (KT), magnetinio

rezonanso tomografija (MRT), ultragarsas (UG) (1, 8–10).

Nesudėtingi kraujagyslių modeliai gaminami iš politefo, teflono vamzdelių. Juose aneurizma sukuria suformuojant T formos jungtį (3, 4). Naudojant lengvai tirpstančius metalų mišinius: „Cerrolow 117“, „Cerrolow 136“ ir „Cerrolow 158“, gaminami kraujagysles imituojantys modeliai, kurie liejami į sintetinę dervą arba agarą gelį. Išlydžius ir pašalinus metalo mišinį, gaunamos kraujagyslių eiga atkartojančios ertmės

(10, 11). Atliejimo (angl. *lost core*) technika naudojama gaminant modelius iš lavono kraujagyslių (7–9). Tiksliausiai žmogaus kraujagysles imituoja prototipiniai modeliai, sukurti stereolitografijos metodu pagal trimatės kompiuterinės angiografijos (KTA) bei magnetinio rezonanso angiografijos (MRA) vaizdus (12).

Kraujagyslių modelių įliejimui naudojama skaidri akrilinė derva, imituojanti aplinkinius audinius (1). Kaip įliejimui naudojama medžiaga atitinka imituojamus audinius, galima vertinti Hounsfieldo vienetais (HV) (8). Šie vienetai rodo audinių rentgeno spindulių sugėrimo koeficientą. Medžiagų tinkamumas MRT bei UG tyrimams vertinamas pagal tų medžiagų sukeliamus artefaktus ir gauto signalo kokybę (8, 10).

Šio darbo tikslas – naudojant Lietuvoje prieinamas medžiagas, sukurti dirbtinį intrakranijinės aneurizmos modelį, tinkamą eksperimentams su KTA bei MRA, ir aprašyti modelio kūrimo techninius aspektus.

Tyrimo medžiaga ir metodai

Modelių gamybai naudoti vaškai: „K2 exact“ (gamintojas „Bredent“, Vokietija) ir „S-U-CERAMOCAPS-WAX“ (gamintojas „Schuler Dental“, Vokietija), Girtlio masė, želatina (gamintojas „Salduva“, Lietuva) bei silikonai: „Silicone 10015“ (gamintojas „Den Braven“, Didžioji Britanija), „Elastosil 7683/25“ (gamintojas „Walco Materials Group“, JAV), „Elite Double 32 Shore-A“ (gamintojas „Zhermack“, Italija), „Rema-Sil“ (gamintojas „Dentaurum“, Vokietija). Medžiagos tirtos KT bei MRT. KT matuotas rentgeno spindulių medžiagoje sugėrimo koeficientas. MRT vertintas medžiagų tinkamumas pagal jų sukeliamus artefaktus.

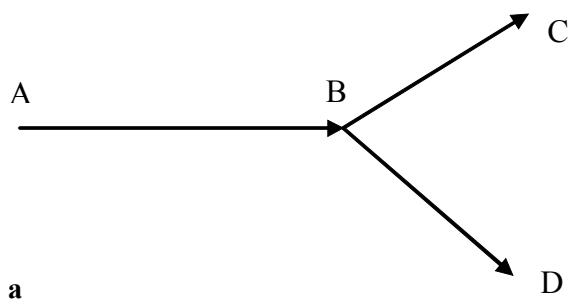
Naudoti du modelių kūrimo metodai: plastikinių vamzdelių sujungimo būdas ir atliejimo technika. Arterijų ir aneurizmos eskizams naudoti rotacinės trimatės skaitmeninės subtrakcinės angiografijos (3D SSA) vaizdai su vidinės miego arterijos (VMA) smegeninės dalies išsišakojimo į priekinę ir vidurinę smegenų arterijas aneurizma, stikliniai aneurizmos modeliai bei

anatominiai žmogaus galvos smegenų pamatinės (PA) bei užpakalinių smegenų arterijų preparatai.

Remiantis 3D SSA ir MRA vaizdais išanalizuota žmogaus galvos smegenų arterinio žiedo anatomija. Naudojantis specialia darbo stotimi „AW 4.2_06sdc“ (gamintojas „General Electric“), programine įranga „Vessel analysis“ išmatuoti arterijų spindžiai bei nubraižyti preliminarūs modelių eskizai. Modeliai gaminti keliais etapais: pirminis modelis gamintas iš rankomis suformuoto žmogaus galvos smegenų arterinio žiedo imitacijos su sukurta aneurizma. Vėliau pagal paciento, turinčio galvos smegenų arterijos aneurizmą, SSA vaizdus, o paskutiniame etape – pagal anatominio žmogaus galvos smegenų arterijų preparato kopiją.

Modelis M1. Iš modifikuotos Girtlio masės, gautos lygiomis dalimis sumaišius ir pakaitinus iki 100°C vašką ir Kanados balzamą, sukurtas plastiškas, 60°C temperatūroje skystėjantis mišinys, iš kurio sukurta galvos smegenų arterinio rato imitacija. PA išsišakojimo į užpakalines smegenų arterijas vietoje suformuota maišelinė aneurizma. Kraujagysles imituojantys stulpelių galai įstatyti į plastikinius vamzdelius, per kuriuos būtų galima leisti skystį. Po to modelis, pasluoksniui (ne storesniais kaip 5 mm sluoksniais) padengtas sąveikoje su oru stingstančiu silikonu „Silicone 10015 Den Braven“. Silikono bloką pakaitinus iki 100°C išpilta suskystėjusi Girtlio masė, gautas silikono blokas su kraujagyslių ertmėmis.

Modelis M2. Modelis formuojamas iš Girtlio masės pagal eskizą (1a pav.). VMA, priekinės smegenų arterijos (PSA), vidurinės smegenų arterijos (VSA) spindžiai matuoti 3D SSA vaizduose, gautuose tiriant pacientą su VMA smegeninės dalies išsišakojimo į priekinę ir vidurinę smegenų arterijas aneurizma. Matavimai atlikti kas 5 mm skaičiuojant matavimų vidurkį. Išmatuotas aneurizmos maišo ilgis, plotis ir kaklo plotis. Nustatyti eskizo matmenys: AB – 20 cm ilgio ir 4,5 mm pločio VMA (C2, C3 ir C4 segmentų) atkarpa, BC – 10 cm ilgio ir 1,8 mm pločio PSA (A1 ir A2 segmentų) atkarpa, BD – 10 cm ilgio ir 1,7 mm



1 pav. M2 modelio eskizas (a); sukurtas modelis M2 (b): nulipdyta vaškinė atlieja

pločio VSA (M1 ir M2 segmentų) atkarpa. Maišelinė aneurizma, kurios ilgis – 5,7 mm, plotis – 6,4 mm ir kaklo plotis – 3 mm, suformuota taške B.

Modifikuotos Girtlio masės kraujagysles imituojančių stulpelių bei aneurizmos parametrai matuoti slankmačiu. Kraujagyslių atlieja su aneurizma (1b pav.) užpildyta skystu dviejų komponentų silikonu „Elastosil 7683/25“. Sustingęs silikono blokas pakaitintas iki 100°C temperatūros ir išpilta suskystėjusi Girtlio masė. Gautas silikono blokas su galvos smegenų arterijas ir aneurizmą imituojančiomis ertmėmis.

Modeliai BM1 ir BM2. Panaudojus skirtingo tipo vašką, sukurti modeliai BM1 ir BM2. Modelis BM1 buvo pripildytas pašildyto skysto vaško „K2 exact“. Vašku atvėsus ir sukietėjus, stiklinis blokas sudaužytas, gauta vaškinė aneurizmos atlieja (2a pav.). Modeliui BM2 naudotas vaškas „S-U-CERAMO-CAPS-WAX“ tvirtai prilipdavo prie stiklo ir vaškinę atlieją su aneurizma pavykdavo išimti tik fragmentais, todėl modelio BM2 vaškinė atlieja sukurta rankiniu būdu (2b pav.).

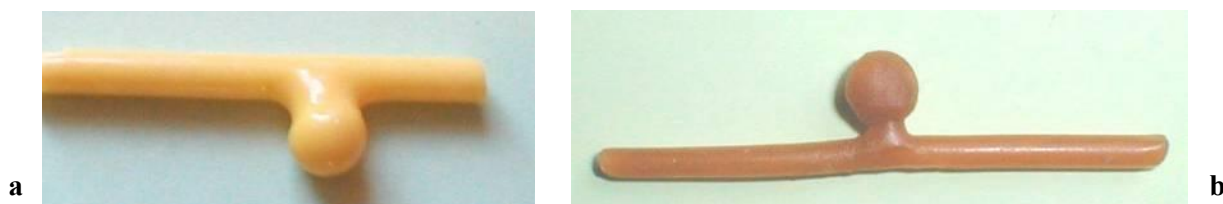
Vaškinių modelių galai įstatyti į lanksčius vamz-

delius ir įlieti į silikoną „Elastosil 7683/25“. Vaškas pašalintas iš sustingusio silikono bloko jį pakaitinus.

Modelis M3. Modelis sukurtas iš plastikinių vamzdelių (3 pav.). Pakaitinti vamzdeliai išlankstyti, aneurizma sukurta suformavus T formos jungtį. Plastikiniai vamzdeliai įlieti į dviejų komponentų silikono bloką „Elite Double 32 Shore-A“.

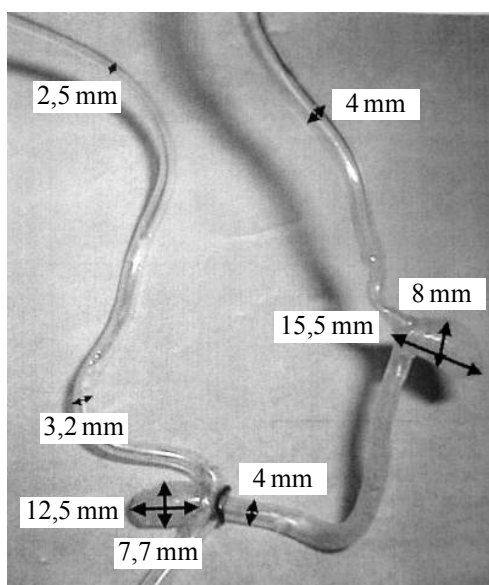
Modeliai M4, M5 ir M6. „Elite Double 32 Shore-A“ silikonas sušvirkštas medicininio švirkštu per plastikinį vamzdelį, įstatytą į lavono slankstelinę arteriją, stebint, kad nesideformuotų arterijų sienelės. Silikonui sustingus, iškirptos PA bei užpakalinės smegenų arterijos. Silikoną dengiančios arterijų sienelės mirkytos vandenyje ir pašalintos perkirpus jas žirkklėmis išilgai kraujagyslių eigos. Gautas silikoningas arterijų atliejos pavaizduotos 4a pav.

Pašalinus smulkias šakas, silikoninga atlieja buvo įlieta į silikono bloką „Elastosil 7683/25“. Silikonui sustingus, jis įpjautas išilgai kraujagyslių atliejos, kuri išimta ir gauta silikoninga liejimo forma su PA išsišakojimą į užpakalines smegenų arterijas atitinkančiais kanalais.

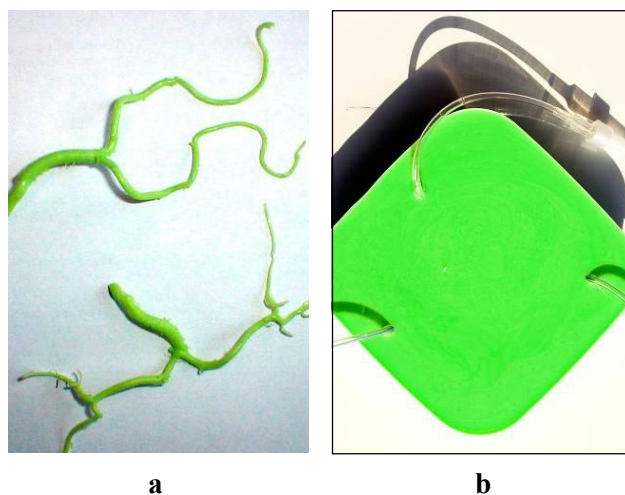


2 pav. BM serijos modeliai

Iš „K2 exact“ modeliavimo vaško (a) ir iš „S-U-CERAMO-CAPS-WAX“ modeliavimo vaško (b).



3 pav. Modelis M3 sukurtas iš plastikinių vamzdelių



4 pav. Silikoningas pamato bei užpakalinių smegenų arterijų atliejos iš anatomicinio preparato (a). Galutinis „Elite Double 32 Shore-A“ silikono blokas (b) (M6 modelis)

Silikoninėje liejimo formoje kanalai užpildyti iki 60°C temperatūros sušildytu želatinos vandeniniu tirpalu santykiu 1:1. Iki kambario temperatūros atvėsęs ir sustingęs želatininis kraujagyslių modelis išimtas iš silikono bloko. Iš sustingusio želatinos tirpalo rankiniu būdu sukurta aneurizma, pritvirtinta PA išsišakojimo srityje. Gauta želatininė kraujagyslių su aneurizma kopija, padengta 3–5 mm storio dviejų komponentų silikonu „Rema-Sil“. Silikonui sustingus, želatininė kraujagyslių kopija ištirpdyta 60°C temperatūros vandens vonelėje. Į išdžiovinto silikono bloko kanalų galus buvo įstatyti lankstūs vamzdeliai ir viskas įlieta į didesnę silikono bloką „Rema-Sil“. Taip sukurti trys modeliai su skirtingo diametro aneurizmomis. M6 modeliui naudotas „Elite Double 32 Shore-A“ silikonas (4b pav.).

Visiems modeliams atlikti angiografiniai tyrimai: KTA, automatinio švirkštu leidžiant kontrastinę medžiagą „Urographin 76 proc.“ (gamintojas „Shering“) ir MRA, leidžiant vandenį lašine sistema bei kontrastinę medžiagą „Omniscan“ (gamintojas „GE Healthcare“) automatinio švirkštu. Buvo lyginami KTA ir MRA gauti kraujagyslių spindžiai, aneurizmos dydžiai (tyrimų duomenis autoriai planuoja paskelbti atskirame straipsnyje).

Rezultatai

Modeliai, jų rentgeno spindulių sugėrimo koeficientas, aneurizmos vieta ir tipas bei naudotos medžiagos pateikiamos 1 lentelėje.

Sukurti aštuoni silikoniniai modeliai su keturiomis šoninėmis bei keturiomis išsišakojimo aneurizmomis. M1 modelis sukurtas pagal smegenų arterinio žiedo anatomiją su PA aneurizma, M2 – pagal rotacinės angiografijos vaizdus su VMA smegeninės dalies išsišakojimo į priekinę ir vidurinę smegenų arterijas aneurizma, BM1, BM2 – pagal stiklinius šoninės aneurizmos maketus. M3 sukurtas iš plastikinių vamzdelių, aneurizma sukurta suformavus T formos jungtį. M4, M5 ir M6 suformuoti iš anatominių žmogaus galvos smegenų arterijų preparatų atliejų su sukurtomis PA aneurizmomis.

Modelių rentgeno spindulių sugėrimo koeficientas – nuo 30 iki 368 HV.

Rezultatų aptarimas

Kuriant modelius, sunku parinkti ir gauti KT ir MRT tyrimams tinkamas medžiagas. Literatūroje aprašomos įvairios medžiagos anatominiams žmogaus galvos smegenų kraujagyslių preparatams užpildyti. Vieni autoriai naudoja metilmetakrilato ir bario sulfato mišinį (8), kiti – plastiką (9) arba akrilą (2). Mes pirmųjų modelių atliejų gamybai naudojome lengvai

formuojamą vašką bei jo pagrindo mases, tačiau pastebėjome, kad medžiagos lengvai trupa ir deformuojasi, nevysiškai pasišalina iš silikono bloko, todėl KTA ir MRA vaizduose užfiksuoti artefaktai. Vaško nuspręsta atsisakyti ir dėl to, kad jis tirpsta aukštoje temperatūroje (~100°C). Tokioje temperatūroje anatominio preparato kraujagyslės išdžiūva ir tampa trapios. Mūsų gautais duomenimis, anatominių preparatų užpildymui tinka greitai kietėjantis dviejų komponentų silikonas. Jo privalumai: greitas, nesudėtingas paruošimas, stingimas kambario temperatūroje ir elastingumas preparuojant kraujagysles. Naudojant silikoną, galima atsisakyti kitų autorių naudojamo specialaus KOH 15 proc. 40°C temperatūros tirpalo kraujagyslių sienelėms pašalinti (8, 9). Be to, pakanka turėti tik vieną silikoninę atlieją, kuri gali būti panaudota daugkartinei modelių gamybai.

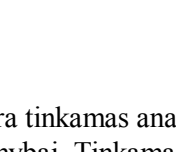
Pagal gautą kraujagyslių atlieją gaminamos literatūroje aprašytos vaškinės kopijos, kurios įliejamos į sintetinę dervą. Kaitinant suskystėjęs vaškas išpilamas, gaunami kraujagyslių eiga ir geometriją atitinkantys kanalai dervoje (2, 8). Literatūroje nepavyko rasti autorių, kurie būtų naudoję želatinos tirpalą kopijų gamybai. Želatinos tirpalas 50°C temperatūros santykiu 1:1 su vandeniu lengvai užpildo silikono bloke esančias kraujagyslių ertmes, lėtai stingsta, išlieka elastingas, lengvai išimamas iš silikono. Želatiną lengva išplauti iš silikono bloko vandeniu, nelieta artefaktų. Dirbant su želatina, pastebėtas vienas trūkumas: patalpinus želatinines kraujagysles ir aneurizmos modelį į skystą dviejų komponentų silikoną, dėl medžiagų tankių skirtumo želatininis modelis kyla į paviršių, kinta aneurizmos išsidėstymo kampas kraujagyslių atžvilgiu.

Neturėdami galimybės atlikti stereolitografiją Lietuvoje, M1, M2, BM2 modelius gaminome rankiniu būdu. Gamindami M2 modelį, bandėme atkartoti VMA smegeninės dalies išsišakojimo į priekinę ir vidurinę smegenų arterijas aneurizmos bei VSA ir PSA parametrus pagal 3D SSA vaizdus, matuodami gaminamas kraujagyslių kopijas slankmačiu.

Modelių kūrimui naudojamą vamzdelių sujungimo technologiją, kai aneurizma sukurama suformuojant T formos jungtį (3, 4), dar reikia tobulinti. Iš plastikinių vamzdelių kraujagyslių ir aneurizmų modelius gaminti techniškai sudėtinga: įkaitinti vamzdeliai elastingi būna trumpą laiką, sunku išgauti reikiamus matmenis ir formą.

Išbandę keturis skirtingo kietumo koeficientų silikonus, priėjome prie išvados, kad tinkamas silikono kietumo koeficientas buvo 32 („Elite Double 32 Shore-A“). Minkštesnis silikonas „Elastosil 7683/25“ patogus modelių gamybai, tačiau lengvai deformuojasi

1 lentelė. Pagaminti modeliai

Metai	Modelis	Modelio medžiaga	Silikoninis užpildas	Rentgeno spindulių sugėrimo koeficientas (HV)	Aneurizmos vieta, tipas	Eskizai
2005	M1	Girtlio masė	<i>Silicone 10015 Den Braven</i>	30	Pamatinė arterija, šoninė	
	M2	Girtlio masė	<i>Elastosil 7683/25</i>	188	Vidinės miego arterijos smegeninė dalis, išsišakojimo	
	BM1	„K2 exact“ vaškas	<i>Elastosil 7683/25</i>	230	Šoninė	
	BM2	„S-U-CERAMO-CAPS-WAX“ vaškas	<i>Elastosil 7683/25</i>	228	Šoninė	
2006	M3	Girtlio masė	<i>Elite Double 32 Shore-A</i>	345	Šoninė	
	M4	Želatina	<i>Elite Double 32 Shore-A</i>	391	Pamatinė arterija, išsišakojimo	
	M5	Želatina	<i>Rema-Sil</i>	180	Pamatinė arterija, išsišakojimo	
	M6	Želatina	<i>Rema-Sil</i>	181	Pamatinė arterija, išsišakojimo	

angiografinių tyrimų metu leidžiant kontrastą, dėl to gaunami iškreipti aneurizmos bei kraujagyslių dydžių parametrai. „Silicone 10015 Den Braven“ kietumo koeficientas didesnis už 32, tačiau jis kietėja tik sąveikaudamas su oru, dėl to stingstant lieka daug oro ertmių. Nevientisa silikono masė turi įtakos KT ir MRT tyrimų kokybei. Dėl didelio kiekio oro ertmių „Silicone 10015 Den Braven“ rentgeno spindulių absorbcijos koeficientas artimiausias žmogaus smegenims (30 HV). Oro ertmių lieka mažiau dviejų komponentų silikonuose „Rema-Sil“ ir „Elite Double 32 Shore-A“, kurie kietėja visu tūriu be kontakto su oru.

Dirbtinių modelių kūrimas Lietuvoje tik prasideda, o gamybos technologijos gali būti tobulinamos, eksperimentuojant su naujomis medžiagomis, labiausiai atitinkančiomis žmogaus audinius.

Išvados

1. Dviejų komponentų silikonas yra tinkamas anatominių arterijų preparatų atliejų gamybai. Tinkamas silikono kietumo koeficientas – 32.

2. Želatinos tirpalas 50°C temperatūros santykiu 1:1 su vandeniu gali būti naudojamas kraujagyslių kopijų gamybai.

3. Vaškas ir jo pagrindo masės lengvai formuojamos gaminant kraujagyslių modelius rankomis, tačiau netinka anatominių arterijų preparatų užpildymui.

Padėka

Straipsnis parengtas vykdant EUREKA projektą E!3475 AMRA. Dėkojame Lietuvos valstybiniam mokslo ir studijų fondui, kuris finansuoja šį projektą (sutarties Nr. V-83/2006).

Models of intracranial aneurysms for angiographic imaging modalities. A technical note

Edvardas Žurauskas^{1, 2}, Jurgita Ušinskienė³, Virginija Gaigalaitė⁴, Raphael Blanc⁵,
Andrius Ušinskas⁶, Arvydas Laurinavičius^{1, 2}

¹National Center of Pathology, ²Department of Pathology, Forensic Medicine, and Pharmacology, Faculty of Medicine, Vilnius University, ³Department of Tomographic Imaging, Santariškės Clinics of Vilnius University Hospital, ⁴Clinic of Neurology and Neurosurgery, Vilnius Emergency Hospital, Lithuania, ⁵Department of Neuroradiology, Henri Mondor Hospital, Paris, France, ⁶Department of Electronic Systems, Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania

Key words: vascular models; intracranial aneurysms; methodology.

Summary. *Objective.* To delineate technical aspects of vascular models with intracranial aneurysm *in vitro* production, suitable for angiographic imaging.

Material and methods. Wax (K2 exact, S-U-CERAMO-CAPS-WAX), Girtl's mass, gelatin, and silicone (Silicone 10015 Den Braven, Elastosil 7683/25, Elite Double 32 Shore-A, Rema-Sil) were used for model production. Construction of models was based on T-shaped plastic tube connections and lost core techniques. Images of rotational angiography, glass tubes with aneurysm, and casts obtained in human specimen were used as samples of cerebral arteries.

Results. Technical aspects of vascular models production were delineated in experience of eight silicone models produced. M1 was hand made with basilar tip aneurysm; M2 was obtained according to angiography images with internal carotid artery supraclinoid part bifurcation to anterior and middle cerebral artery aneurysm. BM1 and BM2 casts were made using glass tubes with lateral aneurysm, M3 – from T-shaped plastic tubes with lateral aneurysms. M4, M5, and M6 were formed using casts obtained in human specimen with basilar tip aneurysm.

Conclusions. Silicone of two components is practical for casts of cerebral arteries in human specimen production. Gelatinous solution 50°C diluted 1:1 with water can be used for copies of arterial casts production. Wax materials are unsuitable for making casts in a human specimen.

Correspondence to E. Žurauskas, National Center of Pathology, P. Baublio 5, 08406 Vilnius, Lithuania
E-mail: edvardas.zurauskas@vpc.lt

Literatūra

1. Tateshima S, Murayama Y, Villablanca JP, Morino T, Takahashi H, Yamauchi T, et al. Intraaneurysmal flow dynamics study featuring an acrylic aneurysm model manufactured using a computerized tomography as a mold. *Neurosurgery* 2001;95:1020-27.
2. Kerber CW, Heilman CB. Flow dynamics in the human carotid artery: a preliminary observations using a transparent elastic model. *AJNR Am J Neuroradiol* 1992;13:173-80.
3. Isoda H, Ramsey RG, Takehara Y, Takahashi M, Kaneko M. MR Angiography of aneurysm models of various shapes and neck sizes. *AJNR Am J Neuroradiol* 1997;18:1463-72.
4. Isoda H, Kinosada Y, Isogai S, Takehara Y, Ito T. Tagged MR imaging of intracranial aneurysm models. *AJNR Am J Neuroradiol* 1999;20:807-11.
5. Piotin M, Gailloud P, Bidaut L, Mandai S, Muster M, Moret J, et al. CT angiography, MR angiography for volumetric assessment of intracranial aneurysms. An experimental study. *Neuroradiology* 2003;45:404-9.
6. Barath K, Cassot F, Rufenacht DA, Fasel JHD. Anatomically shaped internal carotid artery aneurysm *in vitro* model for flow analysis to evaluate stent effect. *AJNR Am J Neuroradiol* 2004;25:1750-59.
7. Sugiu K, Martin J-B, Jean B, Gailloud P, Mandai S, Rufenacht DA. Artificial cerebral aneurysm model for medical testing, training, and research. *Neurol Med Chir* 2003;43:69-73.
8. Gailloud P, Pray JR, Muster M, Piotin M, Fasel JHD, Rufenacht DA. An *in vitro* anatomic model of the human cerebral arteries with saccular arterial aneurysms. *Surgical-Radiologic Anatomy* 1997;19:119-21.
9. Kerber CW, Heilman CB, Zanetti PH. Transparent elastic arterial models. *Biorheology* 1989;26(6):1041-49.
10. Smith RF, Rutt BK, Holdsworth DW. Anthropomorphic carotid bifurcation phantom for MRI applications. *J Magn Reson Imaging* 1999;10:533-44.
11. Fahrig R, Nikolov H, Fox AJ, Holdsworth DW. A three-dimensional cerebrovascular flow phantom. *Medical Physics* 1999;26:1589-99.
12. Watts DM, Sutcliffe CJ, Morgan S, Wardlaw J, Connell M, Bastin ME, et al. Anatomical flow phantoms of the nonplanar carotid bifurcation. Part I: Computer-aided design and fabrication. *Ultrasound Med Biol* 2007;33:296-302.

Straipsnis gautas 2007 01 18, priimtas 2007 06 28
Received 18 January 2007, accepted 28 June 2007