

Гемодинамика аневризм: моделирование и эксперимент

Паршин Д.В.^{1*}, Липовка А.И.¹, Куянова Ю.О.¹, Тихвинский Д.В.¹,
Карпенко А.А.², Дубовой А.В.³, Бервицкий А.В.³ Бесов А.С.¹, Чупахин А.П.¹

¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

² НМИЦ им. ак. Е.Н. Мешалкина, Новосибирск, Россия

³ Федеральный нейрохирургический центр, Новосибирск, Россия

* parshin@hydro.nsc.ru

Ключевые слова: аневризма; рискованные критерии; виртуальная хирургия; численная гемодинамика; прочностные свойства; вязкоупругие свойства

Мотивация и цель: По данным ВОЗ [1] сосудистые патологии занимают лидирующее место как по количеству населения, так и по смертности по всему миру. Аневризмы составляют значительную часть таких патологий и могут протекать как с проявлениями, так и без проявления симптомов. В современной высокотехнологичной персонализированной медицине большая роль отводится рискованной характеристике аневризм: формирования прогнозов роста и разрыва аневризм. Такая характеристика невозможна без понимания фундаментальных основ их гидродинамики, а также механики тканей аневризм.

Методы и алгоритмы: В данной работе приводятся конкретные подходы, позволяющие сформировать рискованные критерии наблюдения, операции и возникновения постоперационных осложнений для церебральных аневризм (ЦА) и аневризмы брюшной аорты (АБА). Для определения фундаментальных основ гидродинамики аневризм использовался экспериментальный подход с формированием лабораторного гидродинамического контура. Для определения механических свойств использовались различные экспериментальные техники: одноосный механический тест, измерения вязкоупругих свойств, лазерно-индуцированная флуоресценция. Для предсказательного анализа использовалось численное моделирование в ANSYS, а также статистический анализ полученных результатов.

Результаты: Для церебральных аневризм удалось классифицировать материал аневризм согласно их статусу. Оказалось, что в зависимости от статуса церебральных аневризм существенно по-разному экспериментальные данные описываются гиперупругими моделями материалов, которые наиболее часто применяются в вычислительных пакетах. Дана подробная классификация применения таких моделей как в зависимости от статуса аневризмы, так и в зависимости от величины деформации ткани аневризмы [2]. Кроме того, методами ЛИФ и статистического анализа данных одноосного теста удалось показать наличие корреляционной связи между данными таких экспериментов. Оказалось, что, вновь, в зависимости от статуса аневризмы возможно построить модели линейной регрессии между энергетическим откликом на излучение и прочностными характеристиками. Подобные регрессии возможны как для величин предельного напряжения, так и для величин предельной деформации [3]. Методами численного моделирования было показано, что если оценивать разницу величины пристеночных сдвиговых напряжений в области за виртуально-

установленным стентом, то возможно классифицировать по такой величине предполагаемый операционный исход по градации: нет окклюзии, стеноз в области стента, удачная окклюзия [4].

Для АБА с помощью численного моделирования удалось показать прямую связь между ростом аневризмы и ростом давления в системе кровообращения проксимально аневризме при особой конфигурации бифуркации аорты и расположения аневризмы на бифуркации. Это означает, что наблюдение пациентов со схожей конфигурацией бифуркации и бифуркационным положением аневризмы должно происходить регулярнее во избежание возникновения сопутствующих сердечных патологий [5]. Кроме того, с помощью решения контактной задачи о механике внутрипросветного тромба в АБА удалось показать влияние асимметрии на механику стенки и выявить механизм такого влияния [6].

Выводы: Представленные результаты позволяют решать конкретные клинические задачи по наблюдению, операции и оценке постоперационных рисков пациентов с церебральными аневризмами и аневризмами брюшной аорты. Кроме того, в ходе реализации работы получены интересные подходы классификации математических моделей, разработки гемодинамических контуров и подходов к анализу результатов вязкоупругих тестов.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект 20-71-10034, <https://rscf.ru/project/20-71-10034/>).

Hemodynamics of aneurysms: modeling and experiment

Parshin D.V.^{1*}, Lipovka A.I.¹, Kuianova Iu.O.¹, Tikhvinsky D.V.¹, Karpenko A.A.², Dubovoi A.V.³, Bervitsky A.V.³, Besov A.S.¹, Chupakhin A.P.¹

¹ Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

² Meshalkin Research Center of Circulation Pathology, Novosibirsk, Russia

³ Federal Neurosurgical Center, Novosibirsk, Russia

* parshin@hydro.nsc.ru

Key words: aneurysm; risk criteria; virtual surgery; numerical hemodynamics; strength properties; viscoelastic properties

Motivation and Aim: According to WHO [1], vascular pathologies occupy a leading place both in terms of population and mortality throughout the world. Aneurysms make up a significant part of such pathologies and can occur with or without symptoms. In modern high-tech personalized medicine, a large role is given to the risk characteristics of aneurysms: the formation of forecasts for the growth and rupture of aneurysms. Such characterization is impossible without understanding the fundamental principles of their hydrodynamics, as well as the mechanics of aneurysm tissue.

Methods and Algorithms: This paper provides specific approaches that allow us to formulate risk criteria for observation, surgery, and the occurrence of postoperative complications for cerebral aneurysms (CA) and abdominal aortic aneurysm (AAA). To determine the fundamental principles of the hydrodynamics of aneurysms, an experimental approach was used with the formation of a laboratory hydrodynamic contour. To determine the mechanical properties, various experimental techniques were

used: uniaxial mechanical test, viscoelastic properties measurements, laser-induced fluorescence. Numerical modeling in ANSYS was used for predictive analysis.

Results: For cerebral aneurysms, it was possible to classify aneurysm material according to their status. It turned out that, depending on the status of cerebral aneurysms, experimental data are described significantly differently by hyperelastic material models, which are most often used in computing packages. A detailed classification of the use of such models is given [2], both depending on the status of the aneurysm and depending on the amount of deformation of the aneurysm tissue. In addition, using LIF methods and statistical analysis of uniaxial test data, it was possible to show the presence of a correlation between the data of such experiments. It turned out that, again, depending on the status of the aneurysm, it was possible to construct linear regression models between the energy response to radiation and strength characteristics. Similar regressions are possible for both the ultimate stress values and the ultimate strain values [3]. Using numerical modeling methods, it was shown that if we evaluate the difference in the magnitude of near-wall shear stresses in the area behind the virtually installed stent, then it is possible to classify the expected surgical outcome according to this value according to gradation: no occlusion, stenosis in the stent area, successful occlusion [4]. For AAA, using numerical modeling, it was possible to show a direct relationship between the growth of the aneurysm and the increase in pressure in the circulatory system proximal to the aneurysm for a special configuration of the aortic bifurcation and the location of the aneurysm on the bifurcation [5]. This means that patients with a similar bifurcation configuration and bifurcation position of the aneurysm should be monitored more regularly to avoid the occurrence of concomitant cardiac pathologies. In addition, by solving the contact problem on the mechanics of an intraluminal thrombus in an AAA, it was possible to show the influence of asymmetry on the mechanics of the wall and identify the mechanism of such an influence [6].

Conclusion: The presented results make it possible to solve specific clinical problems in monitoring, surgery and assessing postoperative risks of patients with cerebral aneurysms and abdominal aortic aneurysms. In addition, during the implementation of the work, interesting approaches were obtained for classifying mathematical models, developing hemodynamic contours and approaches to analyzing the results of viscoelastic tests.

Funding: The work was carried out with financial support from a grant from the Russian Science Foundation (project 20-71-10034, <https://rscf.ru/project/20-71-10034/>).

Список литературы/References

1. <https://www.who.int/ru>
2. Parshin D.V., Lipovka A.I., Yunoshev A.S., Ovsyannikov K.S., Dubovoy A.V., Chupakhin A.P. On the optimal choice of a hyperelastic model of ruptured and unruptured cerebral aneurysm. *Sci Rep*. 2019;9(1)
3. Tsibulskaya E., Lipovka A., Chupakhin A., Dubovoy A., Parshin D., Maslov N. The relationship between the strength characteristics of cerebral aneurysm walls with their status and laser-induced fluorescence data. *Biomedicines*. 2021;9(5):537
4. Tikhvinskii D., Kuianova J., Kislitsin D., Orlov K., Gorbatykh A., Parshin D. Numerical assessment of the risk of abnormal endothelialization for diverter devices: clinical data driven numerical study. *J Pers Med*. 2022;12(4):652
5. Tikhvinskii D.V., Merzhoeva L.R., Chupakhin A.P., Karpenko A.A., Parshin D.V. Computational analysis of the impact of aortic bifurcation geometry to AAA haemodynamics. *Rus J Numer Anal Math Model*. 2022;37(5):311-329
6. Tikhvinsky et al. The role of asymmetry and volume of thrombotic masses in the formation of local deformation of the aneurysmal-altered vascular wall: an in vivo study and mathematical modeling, 2024, PLoS One (accepted)