

### ТЕОРИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ

С.В. Фролов, С.В. Синдеев, А.Ю. Потлов, Д. Липш

#### Численное моделирование влияния потоконаправляющего стента на гемодинамические характеристики в области церебральной аневризмы

##### Аннотация

Исследование направлено на изучение влияния потоконаправляющего стента на гемодинамические характеристики в области церебральной аневризмы. Приведены результаты моделирования гемодинамики в области аневризмы со сложной формой до и после установки потоконаправляющего стента. Оценены гемодинамические изменения, вызванные установкой стента. Полученные данные могут быть использованы для поддержки принятия врачебных решений при оценке эффективности стентирования и выборе потоконаправляющего стента.

##### Введение

Церебральная аневризма характеризуется значительной деформацией артерии и является острым нарушением мозгового кровообращения. Причины возникновения и развития церебральных аневризм к настоящему моменту точно не установлены, однако многочисленные исследователи предполагают, что главную роль в образовании аневризм играет характер церебральной гемодинамики [1]-[4]. В клинической практике для лечения аневризм и нормализации церебрального кровообращения наибольшее распространение получили методы клипирования и эмболизации. К недостаткам этих методов стоит отнести то, что в ряде случаев подобные методы не могут быть успешно применены при лечении аневризм со сложной геометрией, с широкой шейкой и веретенообразной формой [5]-[7]. В этом случае эффективным оказывается использование потоконаправляющих стентов, которые устанавливаются в пораженную церебральную артерию и нормализуют кровотоки [8].

Потоконаправляющие стенты впервые были применены в клинической практике в 2007 году и показали свою эффективность при лечении сложных видов церебральных аневризм [9]-[11]. В силу своих конструктивных особенностей потоконаправляющие стенты имеют низкую пористость, что обеспечивает изменение тока крови вдоль его нормального направления и значительное снижение скорости крови в мешочке церебральной аневризмы. В случае успешного применения потоконаправляющего стента в мешочке аневризмы образуется тромб, который заполняет полость аневризмы, тем самым блокируя кровотоки внутри аневризмы.

Однако в ряде клинических случаев, несмотря на использование потоконаправляющих стентов, не удается значительно снизить кровотоки в области аневризмы, что приводит в конечном счете к ее дальнейшему росту и разрыву [12], [13]. Таким образом, актуальной проблемой является предоперацион-

ная оценка влияния выбранного потоконаправляющего стента на гемодинамические характеристики в области церебральной аневризмы; при этом необходимо учитывать индивидуальную форму церебральной артерии с аневризмой. Благодаря проведенному предварительному анализу врач имеет возможность оценить предполагаемые изменения гемодинамики после установки потоконаправляющего стента и выбрать наиболее подходящую модель потоконаправляющего стента.

##### Материалы и методы

В качестве модельного примера рассмотрена аневризма левой внутренней сонной артерии (рис. 1). Геометрическая модель аневризмы была получена с помощью метода КТ-ангиографии. Подобная латеральная аневризма имеет сложную форму и широкую шейку, что затрудняет использование традиционного метода эмболизации. Церебральная аневризма характеризуется следующими размерами:  $9,2 \times 9,028 \times 10,452$  мм, шейка аневризмы – 7,9 мм. Длина родительской артерии составляет 25 мм, диаметр – 5,7 мм.

Для определения гемодинамических характеристик в области церебральной артерии до и после установки потоконаправляющего стента использовались методы вычислительной гидродинамики. Исходная геометрическая модель церебральной аневризмы была сглажена по методу Лапласа для устранения неровностей на поверхности. Полученная модель использовалась для построения вычислительной сетки, состоящей из гексаэдров и включающей в себя около 2 млн. элементов.

Плотность крови принималась равной  $1050 \text{ кг/м}^3$ . Течение крови в области церебральной аневризмы характеризуется низким значением степени сдвига, что может существенно искажать результаты моделирования при использовании ньютоновской модели жидкости. Поэтому при рассмотрении кровотока в области церебральной аневризмы были также учтены неньютоновские свойства крови (рис. 2). Зависимость вязкос-

ти крови от степени сдвига была аппроксимирована с помощью степенного закона вязкости жидкости:

$$\eta \left( \frac{\partial u}{\partial n} \right) = K \left( \frac{\partial u}{\partial n} \right)^n, \quad (1)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость крови, Па·с;  $du / dn$  – степень сдвига,  $c^{-1}$ ;  $K, n$  – параметры аппроксимации.

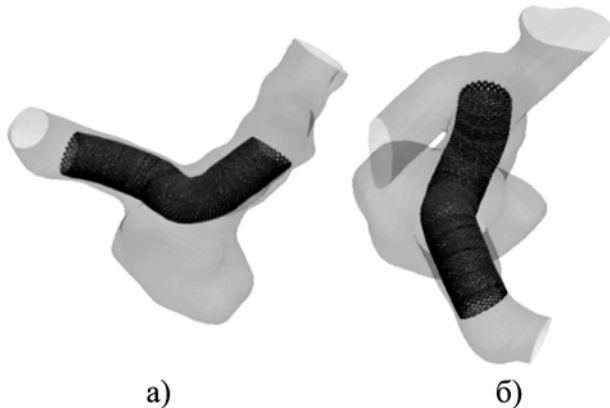


Рис. 1. Геометрическая модель аневризмы левой внутренней сонной артерии с имплантированным потоконаправляющим стентом: а) вид сбоку; б) вид сверху

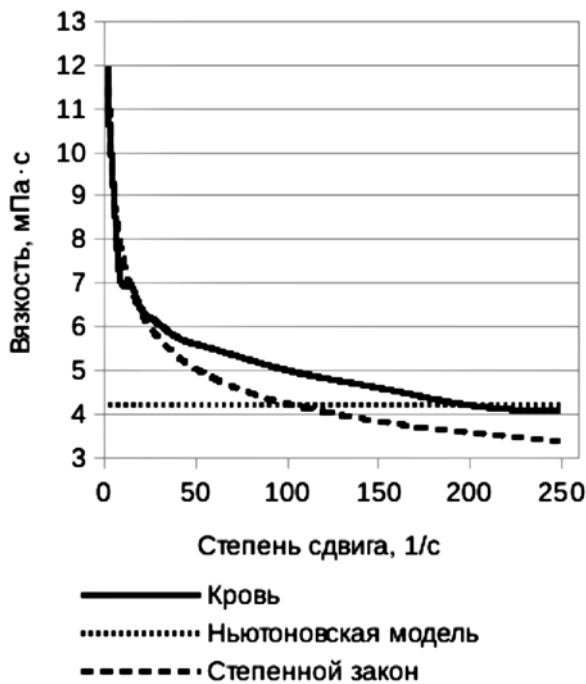


Рис. 2. Зависимость вязкости крови от степени сдвига

Параметры аппроксимации равнялись  $K = 13,22$ ;  $n = -0,247$ . Использование степенного закона вязкости жидкости обусловлено его достаточной точностью и вычислительной эффективностью по сравнению с другими известными законами вязкости. Движение крови в церебральных артериях имеет ламинарный характер, число Рейнольдса  $Re$  в момент систолического пика не превышает 800. Для описания движения крови в области церебральной аневризмы совместно с уравнением (1) были использованы уравнения Навье-Стокса:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u - \nu \Delta u + \frac{1}{\rho} \nabla P = 0, \quad \nu = \frac{\eta}{\rho}; \quad (2)$$

$$\operatorname{div} u = 0, \quad (3)$$

где  $u$  – скорость крови, м/с;  $\rho$  – плотность крови,  $kg/m^3$ ;  $\nu$  – кинематическая вязкость крови,  $m^2/s$ ;  $P$  – давление, Па.

Для оценки влияния потоконаправляющего стента на изменение гемодинамических характеристик в области церебральной

артерии была построена реалистичная геометрическая модель применяемого клинически потоконаправляющего стента. Потоконаправляющий стент имеет следующие геометрические характеристики: длина – 15 мм; диаметр – 5,5 мм; количество нитей – 48; диаметр нити – 0,04 мм. Модель стента была виртуально имплантирована в модель церебральной артерии с аневризмой. Как показано на рис. 1, потоконаправляющий стент в достаточной степени повторяет геометрию родительской церебральной артерии. Ввиду того, что ячейки потоконаправляющего стента обладают малым размером, была построена новая вычислительная сетка из 11 млн. элементов. Такое количество элементов позволило достаточно точно отразить минимальные геометрические элементы стента. В качестве граничных условий использовались экспериментально определенные значения скорости крови во входном сегменте родительской артерии и выходного давления. Моделировался период времени, равный 5 сердечным циклам. Время сердечного цикла равнялось 1 с. Результаты моделирования последнего сердечного цикла применялись для анализа гемодинамических характеристик в области церебральной аневризмы.

## Результаты

С помощью высокопроизводительных вычислений на суперкомпьютере «Ломоносов» (НИВЦ МГУ им. Ломоносова) были проведены численные исследования предоперационного и послеоперационного состояний гемодинамики пациента с аневризмой левой внутренней сонной артерии (1)-(3). Для анализа гемодинамических характеристик в области церебральной артерии с аневризмой до и после установки потоконаправляющего стента был выбран момент систолического пика  $t = 0,2$  с. Выбор обусловлен тем, что в момент систолического пика гемодинамические характеристики, и в первую очередь скорость крови, имеют максимальное значение и оказывают наибольшее воздействие на стенку церебральной аневризмы.

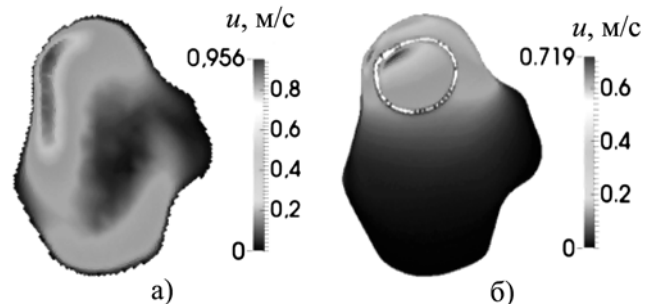


Рис. 3. Распределение скорости крови в поперечном сечении аневризмы в момент систолического пика: а) без стента; б) после установки стента

На рис. 3 представлено сравнение распределения скорости крови в поперечном сечении аневризмы до и после установки потоконаправляющего стента. Следует отметить, что до установки стента (рис. 3а) области с наибольшей скоростью крови располагались у левой верхней границы аневризмы (диапазон изменения скорости крови 0,513...0,956 м/с) и у нижней границы (диапазон изменения скорости крови 0,338...0,416 м/с). В центре же аневризмы наблюдалась область низких скоростей со средней скоростью тока крови порядка 0,1 м/с. Средняя скорость в центральном сечении аневризмы до установки потоконаправляющего стента равнялась 0,2051 м/с. Также в случае, когда стент не был установлен, в области аневризмы наблюдалось присутствие завихрения, что является нарушением физиологически нормального тока крови и может приводить впоследствии к тромбообразованию.

Установка потоконаправляющего стента в аневризму вызвала значительные изменения гемодинамических характеристик (рис. 3б). В первую очередь за счет стента удалось восстановить нормальный ток крови вдоль родительского сосуда. Завихрение тока крови в мешочке аневризмы не наблюдалось. Основной объем крови проходит по потоконаправляющему стенту со средней скоростью 0,584 м/с. Область высоких

скоростей крови (0,4...0,719 м/с) наблюдается лишь вблизи границ стента, в то время как часть потока крови, которому удалось пройти сквозь ячейки потоконаправляющего стента, имеет низкую среднюю скорость порядка 0,0615 м/с. Таким образом, благодаря использованию потоконаправляющего стента в центральном поперечном сечении удалось снизить скорость крови по сравнению с исходным состоянием с 0,2051 до 0,0615 м/с, т. е. в 3,335 раза.

Для анализа изменений гемодинамических параметров в области аневризмы было выделено пять поперечных сечений. Первое поперечное сечение соответствует входному сегменту аневризмы, третье сечение – центральному сечению (рис. 3), а пятое – выходному сегменту аневризмы. Для каждого поперечного сечения была вычислена средняя скорость движения крови в мешочке аневризмы. Был проведен сравнительный анализ средней скорости крови для каждого сечения до и после установки потоконаправляющего стента. Результаты сравнения представлены на рис. 4 и приведены в табл. 1.

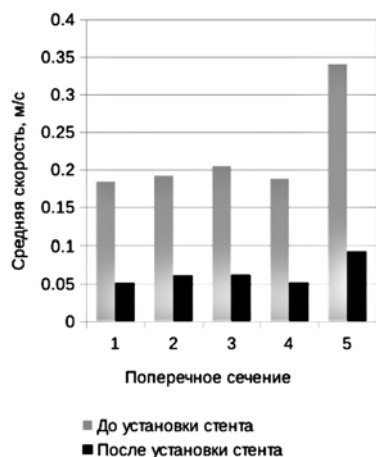


Рис. 4. Изменение средней скорости крови в различных поперечных сечениях области аневризмы в момент систолического пика до и после установки потоконаправляющего стента

Таблица 1

Скорость крови в поперечных сечениях церебральной аневризмы

Номер сечения	Скорость крови до установки стента, м/с			Скорость крови после установки стента, м/с		
	макс.	мин.	сред.	макс.	мин.	сред.
1	0,872	0,017	0,1842	0,329	0,0061	0,0506
2	0,885	0,0178	0,1922	0,394	0,0078	0,0607
3	0,956	0,019	0,2051	0,41	0,008	0,0615
4	0,853	0,0174	0,1884	0,338	0,0067	0,0513
5	1,204	0,032	0,3405	0,547	0,0126	0,0922

Как показал сравнительный анализ, для всех сечений было достигнуто значительное сокращение средней скорости тока крови в момент систолического пика. В среднем скорость движения крови в области церебральной аневризмы при использовании потоконаправляющего стента снизилась в 3,5 раза по сравнению с исходным состоянием.

### Заключение

На основе модельного примера показана эффективность установки потоконаправляющего стента в аневризму сложной формы для нормализации церебрального кровообращения. Применение стента позволило значительно снизить скорость крови в мешочке аневризмы и направить основной поток крови вдоль родительской артерии, что уменьшило влияние кровотока на стенку церебральной аневризмы. Полученные данные могут быть использованы для поддержки принятия вра-

чебных решений при оценке эффективности стентирования и выборе модели потоконаправляющего стента.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-15-10327). Работа выполнена с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ им. М.В. Ломоносова.*

### Список литературы:

1. Cebal J.R., Castro M.A., Appanaboyina S. et al. Efficient pipeline for image-based patient-specific analysis of cerebral aneurysm hemodynamics: Technique and sensitivity // IEEE Trans. Med. Imaging. 2005. Vol. 24. PP. 457-467.
2. Radaelli A.G., Augsburger L., Cebal J.R. et al. Reproducibility of haemodynamical simulations in a subject-specific stented aneurysm model – A report on the Virtual Intracranial Stent Challenge 2007 // J. Biomech. 2008. Vol. 41. PP. 2069-2081.
3. Zhang Y.S., Yang X.J., Wang S.Z. et al. Hemodynamic effects of stenting on widenecked intracranial aneurysms // Chin. Med. J. 2010. Vol. 123. PP. 1999-2003.
4. Tateshima S., Tanishita K., Hakata Y. et al. Alternation of intraaneurysmal hemodynamics by placement of a self-expandable stent // J. Neurosurg. 2009. Vol. 111. PP. 22-27.
5. Nishido H., Piotin M., Bartolini B. et al. Analysis of complications and recurrences of aneurysm coiling with special emphasis on the stent-assisted technique // AJNR Am. J. Neuroradiol. 2014. Feb. Vol. 35 (2). PP. 339-344.
6. Pierot L., Wakhloo A.K. Endovascular treatment of intracranial aneurysms: Current status // Stroke. 2013. Jul. Vol. 44 (7). PP. 2046-2054.
7. Brinjikji W., Cloft H.J., Kallmes D.F. Difficult aneurysms for endovascular treatment: Overwise or undertall? // AJNR Am. J. Neuroradiol. 2009. Sep. Vol. 30 (8). PP. 1513-1517.
8. Wong G.K., Kwan M.C., Ng R.Y. et al. Flow diverters for treatment of intracranial aneurysms: Current status and ongoing clinical trials // J. Clin. Neurosci. 2011. Vol. 18 (6). PP. 737-740.
9. Lubicz B., Collignon L., Raphaeli G. et al. Flow-diverter stent for the endovascular treatment of intracranial aneurysms: A prospective study in 29 patients with 34 aneurysms // Stroke. 2010. Oct. Vol. 41 (10). PP. 2247-2253.
10. Giacomini L., Piske R.L., Baccin C.E. et al. Neurovascular reconstruction with flow diverter stents for the treatment of 87 intracranial aneurysms: Clinical results // Interv. Neuroradiol. 2015. Jun. Vol. 21 (3). PP. 292-299.
11. Berge J., Biondi A., Machi P. et al. Flow-diverter SILK stent for the treatment of intracranial aneurysms: 1-year follow-up in a multicenter study // AJNR Am. J. Neuroradiol. 2012. Jun. Vol. 33 (6). PP. 1150-1155.
12. D'Urso P.I., Lanzino G., Cloft H.J. et al. Flow diversion for intracranial aneurysms: A review // Stroke. 2011. Aug. Vol. 42 (8). PP. 2363-2368.
13. Cebal J.R., Mut F., Raschi M. et al. Aneurysm rupture following treatment with flow-diverting stents: Computational hemodynamics analysis of treatment // AJNR Am. J. Neuroradiol. 2011. Jan. Vol. 32 (1). PP. 27-33.

Сергей Владимирович Фролов,

д-р техн. наук, профессор,

Сергей Вячеславович Синдеев,

мл. научный сотрудник,

Антон Юрьевич Потлов,

мл. научный сотрудник,

кафедра «Биомедицинская техника»,

ФГБОУ ВО «ТГТУ»,

г. Тамбов,

Дитер Лити,

д-р техн. наук, профессор,

Мюнхенский университет прикладных наук,

г. Мюнхен, ФРГ,

e-mail: sergej.frolov@gmail.com