

Математическое моделирование обходного высокопоточного экстра-интракраниального шунтирования при лечении сложной церебральной аневризмы

© Е.Р. Благосклонова¹, Д.Д. Долотова^{1,2}, И.В. Архипов^{1,3}, Н.А. Полунина^{4,5}, В.Н. Степанов⁵, В.В. Крылов^{4,5}, А.В. Гаврилов^{1,3}

¹ООО «Гаммамед-Софт», Мытищи, Россия;

²ОСП — Научно-исследовательский клинический институт педиатрии им. акад. Ю.Е. Вельтишева ФГАОУ ВО «Российский национальный исследовательский университет им. Н.И. Пирогова» Минздрава России, Москва, Россия;

³ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова» Правительства Российской Федерации, Москва, Россия;

⁴ФГБОУ ВО «Московский государственный медико-стоматологический университет им. А.И. Евдокимова» Минздрава России, Москва, Россия;

⁵ГБУЗ города Москвы «Научно-исследовательский институт скорой помощи им. Н.В. Склифосовского Департамента здравоохранения города Москвы», Москва, Россия

Резюме

Наличие интракраниальных аневризм (ИА) сопряжено с высоким риском субарахноидального кровоизлияния. В наиболее сложных случаях единственным способом исключения аневризмы из кровотока является реваскуляризация пораженного бассейна путем создания обходного высокопоточного экстра-интракраниального шунта. Данный подход позволяет избежать тяжелых ишемических осложнений, однако необходим тщательный учет индивидуальных анатомических и гемодинамических параметров пациента. Вычислительная гидродинамика (computational fluid dynamics — CFD) может оказать существенную помощь в планировании подобных операций, позволяя создавать пациентспецифичные трехмерные модели мозгового кровообращения.

Цель исследования. Оценить возможности планирования обходного высокопоточного экстра-интракраниального шунтирования с помощью средств компьютерного моделирования.

Материал и методы. В настоящем исследовании мы применили методы компьютерного моделирования в случае пациента с гигантской тромбированной ИА внутренней сонной артерии (ВСА). На основании данных предоперационной компьютерной томографической ангиографии (КТА) построена 3D-модель церебральных артерий пациента с текущей геометрией и три дополнительные модели: «Нормальная анатомия» (без ИА), «Окклюзия» (с лигированной ВСА), «Виртуальное шунтирование» (с шунтированием и лигированной ВСА). Кроме того, построена модель, основанная на послеоперационных данных. Скорости кровотока, используемые в качестве граничных условий, измерены с помощью фазово-контрастной магнитно-резонансной томографии. Расчет гемодинамики проведен в конечно-элементном программном комплексе ANSYS Workbench 19.

Результаты. Продемонстрировано увеличение кровотока на пораженной стороне более чем на 70% после виртуальной операции, а также достижение равномерности распределения кровотока между пораженной и контралатеральной сторонами, что указывает на предположительную эффективность лечения. Результаты моделирования совпали с послеоперационными данными.

Заключение. Исследование показало, что виртуальное предоперационное CFD-моделирование может значительно упростить планирование операции и повысить эффективность хирургического лечения.

Ключевые слова: анализ гемодинамики, интракраниальные аневризмы, сложные аневризмы, кровообращение головного мозга, шунтирование, вычислительная гидродинамика, предоперационное планирование, экстра-интракраниальный анастомоз.

Информация об авторах:

Благосклонова Е.Р. — <https://orcid.org/0000-0002-4678-060X>

Долотова Д.Д. — <https://orcid.org/0000-0002-5538-1109>

Архипов И.В. — <https://orcid.org/0000-0003-4278-2285>

Полунина Н.А. — <https://orcid.org/0000-0001-5680-4663>

Степанов В.Н. — <https://orcid.org/0000-0003-0007-8054>

Крылов В.В. — <https://orcid.org/0000-0001-5256-0905>

Гаврилов А.В. — <https://orcid.org/0000-0002-7838-584X>

Автор, ответственный за переписку: Долотова Д.Д. — dolotova@multivox.ru

Как цитировать:

Благосклонова Е.Р., Долотова Д.Д., Архипов И.В., Полунина Н.А., Степанов В.Н., Крылов В.В., Гаврилов А.В. Математическое моделирование обходного высокопоточного экстра-интракраниального шунтирования при лечении сложной церебральной аневризмы. *Вопросы нейрохирургии имени Н.Н. Бурденко*. 2022;86(3):23–32. <https://doi.org/10.17116/neiro20228603123>

Mathematical modeling of high-flow extra-intracranial bypass in the treatment of a complex cerebral aneurysm

© E.R. Blagosklonova¹, D.D. Dolotova^{1,2}, I.V. Arkhipov^{1,3}, N.A. Polunina^{4,5}, V.N. Stepanov⁵, V.V. Krylov^{4,5}, A.V. Gavrilov^{1,3}

¹Gammamed-Soft LLC, Moscow, Russia;

²Veltischev Research Clinical Institute of Pediatrics, Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia;

³Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;

⁴Evdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry, Moscow, Russia;

⁵Sklifosovsky Research Institute for Emergency Care, Moscow, Russia

Abstract

Background. Intracranial aneurysms (IAs) pose a high risk of spontaneous subarachnoid hemorrhage. In the most complex cases, the only way to exclude the aneurysm from the circulation is to perform a high-flow extracranial-to-intracranial bypass, thus creating a new bloodstream. This avoids severe ischemic complications; however, it requires careful consideration of individual anatomy and hemodynamic parameters. Computational fluid dynamics (CFD) can be of great help in planning such a surgery by creating 3D patient-specific models of cerebral circulation.

Objective. Assessment of the perspective of high-flow extracranial-to-intracranial bypass planning using computational modeling. **Material and methods.** In this research work, we have applied the CFD methods to a patient with a giant thrombosed IA of the internal carotid artery (ICA). Preoperative CTA images and Gamma Multivox workstation were used to create a 3D model with current geometry and three additional models: Normal anatomy (no IA), Occlusion (with ligated ICA), Virtual bypass (with bypass and ligated ICA). The postoperative data were also available. Boundary conditions were based on PC-MRI measurements. Calculation of hemodynamics was conducted with a finite element package ANSYS Workbench 19.

Results. The results demonstrated an increase in the blood flow on the affected side by more than 70% after the virtual surgery and uniformity of flow distribution between the affected and contralateral sides, indicating that the treatment is likely to be efficient. Later, postoperative data confirmed that.

Conclusion. The study showed that virtual preoperative CFD modeling could significantly simplify and improve surgical planning.

Keywords: hemodynamic analysis, intracranial aneurysms, complex aneurysms, cerebral circulation, bypass surgery, computational fluid dynamics, preoperative planning, EC-IC bypass.

Information about the authors:

Blagosklonova E.R. — <https://orcid.org/0000-0002-4678-060X>

Dolotova D.D. — <https://orcid.org/0000-0002-5538-1109>

Arkhipov I.V. — <https://orcid.org/0000-0003-4278-2285>

Polunina N.A. — <https://orcid.org/0000-0001-5680-4663>

Stepanov V.N. — <https://orcid.org/0000-0003-0007-8054>

Krylov V.V. — <https://orcid.org/0000-0001-5256-0905>

Gavrilov A.V. — <https://orcid.org/0000-0002-7838-584X>

Corresponding author: Dolotova D.D. — dolotova@multivox.ru

To cite this article:

Blagosklonova ER, Dolotova DD, Arkhipov IV, Polunina NA, Stepanov VN, Krylov VV, Gavrilov AV. Mathematical modeling of high-flow extra-intracranial bypass in the treatment of a complex cerebral aneurysm. *Burdenko's Journal of Neurosurgery = Zhurnal voprosy neurokhirurgii imeni N.N. Burdenko*. 2022;86(3):23–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.17116/neiro20228603123>

Список сокращений

БОТ — баллон-окклюзионный тест

ВББ — вертебробазилярный бассейн

ВК — виллизиев круг

ВСА — внутренняя сонная артерия

ИА — интракраниальные аневризмы

КТА — компьютерная томографическая ангиография

НСА — наружная сонная артерия

ПМА — передняя мозговая артерия

СМА — средняя мозговая артерия

ФК МРТ — фазово-контрастная магнитно-резонансная томография

ЭИК — экстра-интракраниальный

ЭЭГ — электроэнцефалография

CFD — computational fluid dynamics

Введение

Интракраниальная аневризма (ИА) — патологическое выпячивание стенки артерии, характеризующееся поражением ее нормальной трехслойной структуры. Постоянно испытывая нагрузку, вызван-

ную воздействием потока крови, ИА имеют тенденцию к росту и разрыву [1, 2].

По различным данным, распространенность ИА в популяции колеблется от 1,5 до 5% [3]. Повышение доступности и качества нейровизуализации привело к увеличению количества пациентов со случайно об-

наруженными неразорвавшимися бессимптомными аневризмами [4]. В связи с этим вопрос о качественном и своевременном лечении становится все более актуальным, особенно в свете того, что проблема оценки рисков разрыва ИА остается нерешенной.

Классические микрохирургические и эндоваскулярные методы выключения аневризм [5] часто неприменимы в случае «сложных» аневризм. Такие аневризмы характеризуются технически трудной для осуществления доступа локализацией, гигантскими размерами (более 25 мм), сложной конфигурацией, широкой шейкой или артериями, отходящими от купола [6]. Около 5% из обнаруживаемых аневризм являются гигантскими, помимо вероятности разрыва они могут приводить к тяжелым осложнениям, вызывая масс-эффект в близлежащих структурах [7]. Часто единственным вариантом лечения гигантских ИА является проксимальная окклюзия несущего сосуда. Однако в случае локализации аневризмы на крупной магистральной артерии такой подход может привести к ишемическим осложнениям, даже в условиях развитого коллатерального кровотока, поэтому тотальную окклюзию артерии обычно выполняют в сочетании с высокопоточным экстра-интракраниальным (ЭИК) шунтированием, которое заключается в создании анастомоза (с помощью трансплантата, изготовленного из вены или артерии пациента) в обход пораженного участка с целью сохранить достаточный кровоток в дистальных ветвях несущей артерии [8]. На этапе планирования операции важно оценить необходимость шунтирования и его послеоперационную эффективность. Наиболее распространенным методом для решения этого вопроса является баллон-окклюзионный тест (БОТ), в ходе которого оценивают цереброваскулярный резерв путем контроля изменений неврологического статуса пациента, данных электроэнцефалографии и состоятельности коллатеральных артерий и венозного кровообращения путем одновременного проведения церебральной ангиографии. Затем тест модифицируют, создавая медикаментозную гипотензию до 20% от исходного уровня. При появлении неврологического дефицита на каком-либо этапе тест прерывают [9]. Очевидно, что подобные эндоваскулярные вмешательства могут вызвать осложнения, включая разрыв нестабильной гигантской аневризмы. Важнейшим фактором при планировании шунтирования является учет индивидуальной анатомии и особенностей гемодинамики пациента. Хирург должен быть уверен в том, что выбранная тактика обеспечит сохранение или увеличение объемов кровотока у конкретного пациента. При развитом кровообращении в виллизиевом круге (ВК) возможны ретроградное заполнение полости ИА, отсутствие тромбирования культи несущего сосуда, обратный поток и, как следствие, образование тромбов в шунте [10].

Значительно облегчить процесс и повысить качество планирования операций реваскуляризации может использование трехмерного математического моделирования кровотока методами вычислительной гидродинамики (computational fluid dynamics — CFD). Применение CFD является достаточно распространенным инструментом изучения параметров гемодинамики, так как позволяет получить количественную информацию о состоянии кровотока на основе неинвазивных исследований [11—13]. Однако количество работ, посвященных моделированию шунтирования в церебральных артериях, немногочисленно, несмотря на безусловные преимущества данного метода (например, возможность виртуальной модификации исходной анатомии сосудов [14]).

Существующие эксперименты в основном описывают анализ параметров потока при локальных изменениях геометрии, а также исследуют эффективность шунтирования, сравнивая показатели гемодинамики до и после операции [12, 15, 16]. Показана зависимость результата от индивидуальной анатомии сосудов и расположения устья анастомоза в конкретных сегментах средней мозговой артерии (СМА). Эксперименты с вариациями диаметра трансплантата и угла его входа в артерию-реципиент выявили незначительное влияние геометрических факторов на итоговый объем кровотока [12]. В работе S.F. Sia и соавт. [17] предложено применение метода CFD для расчета необходимой степени лигирования несущей артерии, конкурирующий поток в которой может привести к закрытию шунта посредством изменения параметров стеноза *in silico*.

Результаты приведенных экспериментов подчеркивают актуальность и необходимость дальнейшего изучения данного вопроса.

Цель исследования — оценить возможности планирования обходного высокопоточного экстра-интракраниального шунтирования с помощью средств компьютерного моделирования.

Материал и методы

Работа проведена на базе отделения неотложной нейрохирургии ГБУЗ «НИИ СП им. Н.В. Склифосовского ДЗМ». В исследовании использованы данные компьютерно-томографической ангиографии (КТА) и фазово-контрастной магнитно-резонансной томографии (ФК МРТ) пациентки (51 год), обратившейся с жалобами на головные боли, двоение в глазах и онемение левой половины лица. В течение последних 15 лет наблюдалась диплопия вследствие недостаточности VI нерва. По данным выполненной в 2005 г. компьютерной томографии головного мозга патология не выявлена, длительно наблюдалась у офтальмолога. За 3 мес до госпитализации возникли боли в зоне иннервации ветвей левого тройничного нерва с последующим развитием гипестезии в этой

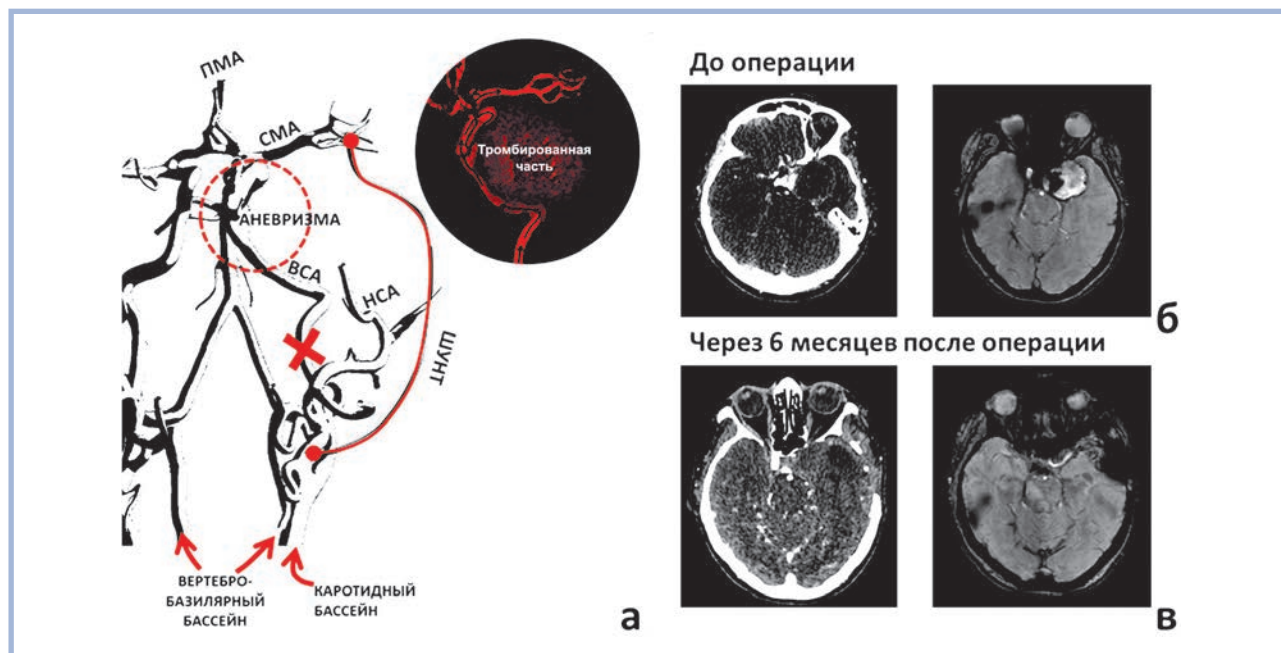


Рис. 1. Данные нейровизуализации.

а — 3D-модель сосудов пациентки, построенная на основании данных компьютерной томографической ангиографии с указанием планируемой локализации окклюзии левой внутренней сонной артерии (красный крест) и высокопоточного шунта между наружной сонной артерией и средней мозговой артерией (красная линия); б — компьютерная и магнитно-резонансная томограммы головного мозга пациентки с гигантской мешотчатой частично тромбированной аневризмой до операции; в — после операции.

зоне. При КТА выявлена гигантская (33×34×36 мм) мешотчатая аневризма кавернозного и глазничного отделов левой внутренней сонной артерии (ВСА) с выраженным тромбозом полости (размер функционирующей части 12×9 мм) (рис. 1). При перфузионной компьютерной томографии выявлена гипоперфузия в левых лобной, височной и теменной долях со снижением СВФ на 20% и СВВ на 40—50% по сравнению с противоположной стороной и повышением МТТ до 7 с (рис. 2а). Учитывая анатомические особенности аневризмы, выполнить открытое хирургическое вмешательство на аневризме с ее клипированием не представлялось возможным. При проведении БОТ выявлена развитая задняя соединительная артерия на стороне поражения, компенсирующая кровоток за счет вертебробазиллярного бассейна (ВББ). Однако коллатеральное кровоснабжение оценивалось как субоптимальное вследствие некоторого дефицита артериального кровотока в теменной области (кортикальные ветви СМА) и венозной задержки более 2 с по классификации Н. Imai и соавт. [18]. Зафиксировано также появление медленных патологических волн по данным ЭЭГ. При цифровой субтракционной ангиографии выявлен критический стеноз ВСА непосредственно проксимальнее аневризмы, что делало эндоваскулярную операцию технически сложной. В связи с изложенным принято решение о проведении реваскуляризирующей операции, включающей создание ЭИК анастомоза между наружной сонной артерией (НСА) и М2 сегментом левой СМА с использованием лучевой артерии в качестве транс-

плантата с последующей проксимальной окклюзией левой ВСА (см. рис. 1а). Операция выполнена в запланированном объеме, в послеоперационном периоде у пациентки отмечали регресс гипестезии и боли в зоне иннервации ветвей левого тройничного нерва.

По пред- и послеоперационным данным КТА реконструированы трехмерные модели исследуемого участка артерий головного мозга пациентки до и после операции [19]. Модели включали дистальные ветви общих сонных (ОСА) и позвоночных артерий. Коммерческая система конечно-элементного моделирования ANSYS Workbench 19.2 (ANSYS Inc., США, лицензия Academic Research) использована для создания измененных моделей сосудов и дальнейшего расчета гемодинамики [20]. Модификации анатомии сосудов созданы на основе модели «До операции». Она преобразована в модели «Нормальная анатомия», имитирующую отсутствие аневризмы, «Окклюзия» и «Виртуальный шунт», представляющие собой геометрию сосудов с полностью лигированной левой ВСА без шунта и с шунтом. Расположение и размер виртуального высокопоточного ЭИК шунта определяли в соответствии с предоперационным планом хирурга (см. рис. 1а) и с учетом индивидуальных анатомических особенностей пациентки. Всего в исследовании использовано 5 расчетных моделей (рис. 3).

Моделирование проводили с допущением, что стенки сосудов жесткие, а кровь является ньютоновской жидкостью с постоянными плотностью и вязкостью. Расчетная сетка конечных элементов построена

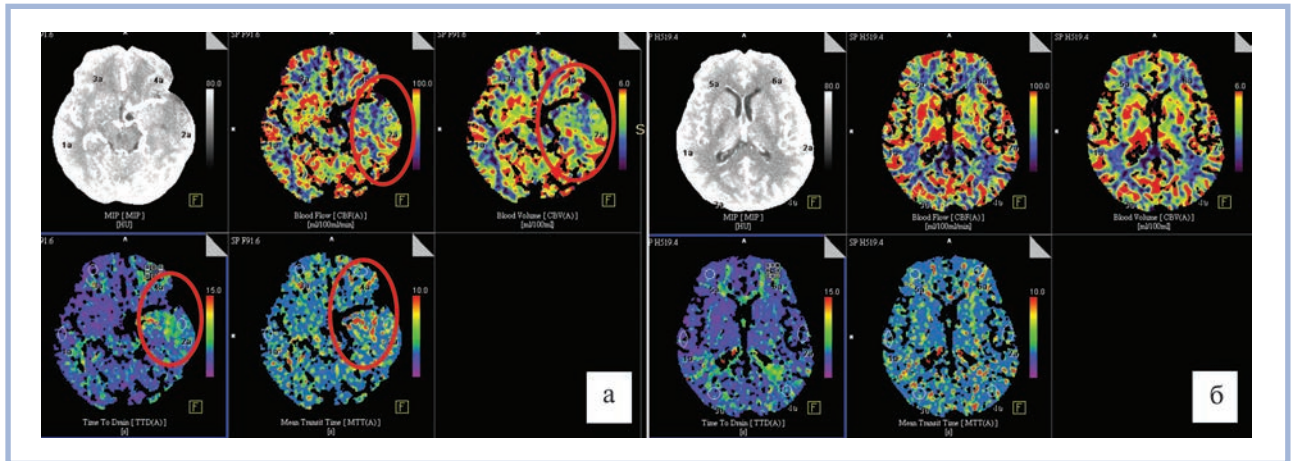


Рис. 2. Перфузионные компьютерные томограммы пациентки (карты MIP, CBF, CBV, TTD, MTT).

а — до операции, красным овалом выделены области дефицита перфузии; б — через 3 мес после оперативного вмешательства.

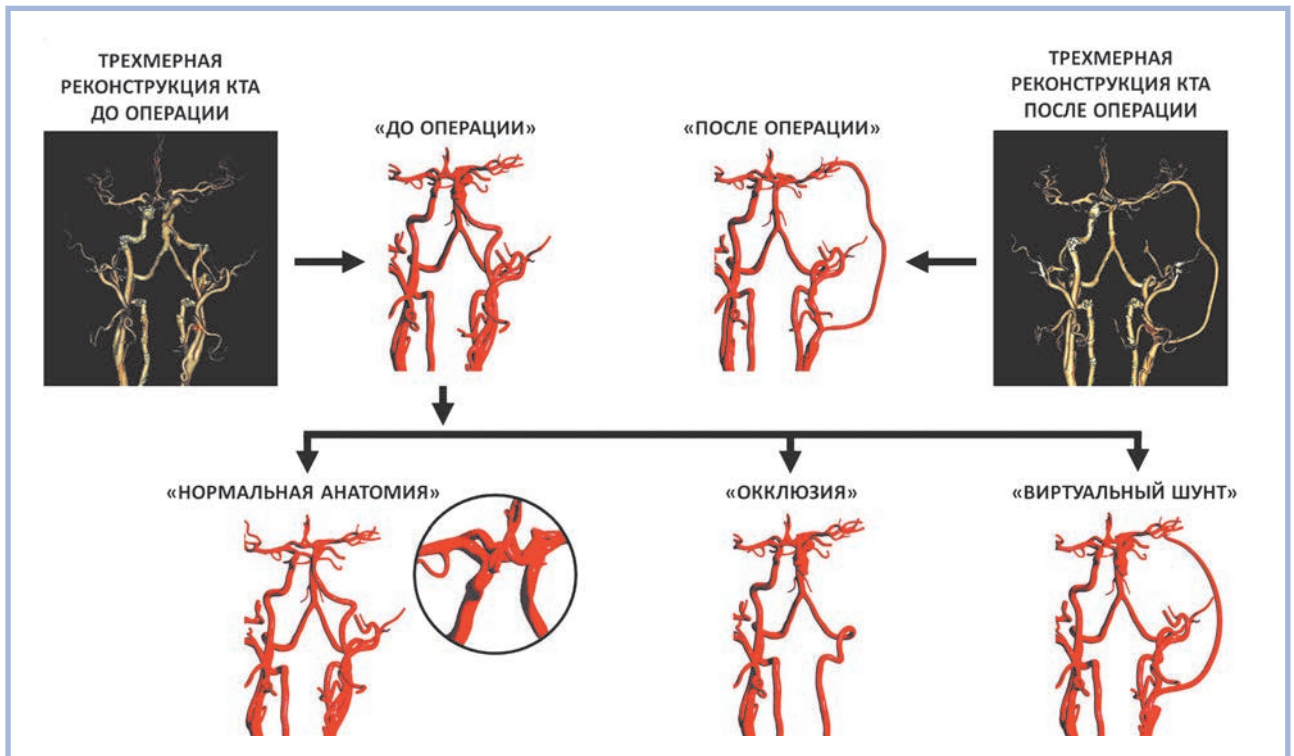


Рис. 3. Трехмерные модели, используемые в исследовании.

Модели «До операции» и «После операции» построены по данным компьютерной томографической ангиографии, полученным до и после хирургического вмешательства. На основе модели «До операции» созданы три дополнительные: «Нормальная анатомия» (без аневризмы), «Окклюзия» (с лигированной левой внутренней сонной артерией) и «Виртуальный шунт» (с анастомозом и лигированной левой внутренней сонной артерией).

с использованием линейных тетраэдрических ячеек, для повышения надежности результатов в пристеночной области она уточнена с помощью пяти слоев призматических элементов. Общее количество элементов для всех моделей в среднем составило 4,3 млн. В качестве граничных условий на входе использованы линейные скорости кровотока для двух сердечных циклов, полученные в выбранных контрольных сечениях при проведении ФК МРТ с кардиосинхронизацией до и после операции (для модели «После операции»).

Ко всем выходам расчетной области применено условие свободного оттока. Верификация расчетов CFD-модели «До операции» выполнена в предыдущем исследовании [21] и включала сравнение линейных скоростей за сердечный цикл с данными ФК МРТ в соответствующих сечениях средних и передних мозговых артерий (ПМА) (рис. 4, красные линии).

Несмотря на тенденцию к занижению линейной скорости в среднем на 15% в течение всего сердечно-го цикла в сечениях обеих СМА, результат продемон-

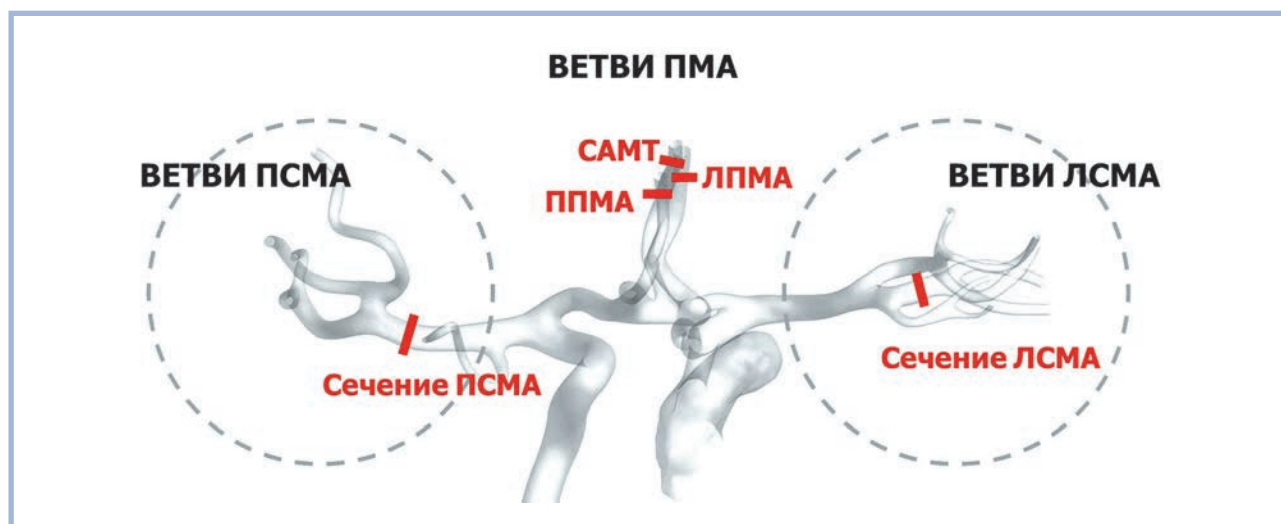


Рис. 4. Области интереса, определенные в моделях, в которых сравнивали скорости и объемы кровотока.

Красными линиями обозначены сечения, в которых при проведении фазово-контрастной магнитно-резонансной томографии измерены скорости кровотока. САМТ — средняя артерия мозолистого тела; ЛСМА — левая средняя мозговая артерия; ПСМА — правая средняя мозговая артерия; ЛПМА — левая передняя мозговая артерия; ППМА — правая передняя мозговая артерия.

стрировал хорошее соответствие расчетных значений реальным параметрам гемодинамики пациентки. В связи с этим можно сделать вывод о достаточной корректности расчета при выбранных условиях моделирования.

Анализ объема крови проводили в трех основных регионах кровоснабжения, включающих дистальные ветви артерий ВК: это область ветвей ПМА, области ветвей левой и правой СМА (см. рис. 4). Оценены общий объем крови в каждом регионе за сердечный цикл и его доля относительно всей поступающей в модель за цикл крови.

Исследование одобрено этическим комитетом ГБУЗ «НИИ СП им. Н.В. Склифосовского ДЗМ». Хирурги не учитывали результаты CFD-моделирования и принимали решение о проведении ЭИК шунтирования только на основании предоперационных обследований (цифровая субтракционная ангиография, БОТ, МРТ, КТА).

Результаты

Качественная оценка линий тока в ветвях левой СМА в момент максимальных значений не показала существенных различий в величине скорости между моделями (рис. 5). Следует отметить, что в модели операции без шунтирования («Окклюзия») скорость в регионе левой СМА почти полностью сохраняется за счет компенсации потока. Крайне низкие значения скорости наблюдались в аневризматическом мешке и на всем протяжении левой ВСА в модели «До операции» с ретроградным потоком из ВББ в определенные моменты времени. Это наблюдение совпадало с данными ФК МРТ, согласно которым максимальная измеренная скорость в левой ВСА составляла 0,2 м/с, а на контралатеральной стороне — 0,6 м/с.

Для количественной оценки изменения кровотока в различных модификациях геометрии анализировали суммарные объемы крови, проходящие через каждую ветвь ПМА и СМА за один сердечный цикл (табл. 1). Для анализа изменения распределения кровотока между областями интереса рассчитана доля в каждой области по отношению к общему кровотоку, поступающему в модель (табл. 2).

Модель «Нормальная анатомия» создана с целью оценки особенностей кровоснабжения на стороне поражения, обусловленных наличием гигантской ИА. При расчете в этом случае в качестве граничного условия в левой ОСА указана величина входной скорости для контралатеральной артерии, которая более соответствовала значениям для здорового человека. Несмотря на то что после «удаления» аневризмы диаметр левой ВСА оставался отличным от нормы и кровотоки из ВББ оставались конкурентными, объем крови в каждом отделе в 1,5–2,5 раза превышал значения исходной модели («До операции») (см. табл. 1). Распределение между ветвями относительно входного объема также было выше (в условиях незначительного снижения потока, поступающего в ветви НСА, и увеличения общего входного объема на 12%) (см. табл. 2).

При сравнении двух вариантов операции показана незначительная разница (менее 10%) в показателях объемов крови в пользу модели с наличием шунта. Можно сделать вывод, что лигирование сонной артерии без создания анастомоза не приведет к ухудшению кровоснабжения головного мозга. Такой результат, скорее всего, связан с эффективным потоком из ВББ. Однако мы не могли быть уверены в достаточном наполнении более дистальных кортикальных ветвей СМА, в которых предоперационный БОТ демонстрировал дефицит кровотока.

Таблица 1. Суммарный объем крови, проходящий за один сердечный цикл через ветви каждой области интереса, и изменение параметра по сравнению с исходной, предоперационной, моделью

Область интереса	Суммарный объем крови за один сердечный цикл, мл				
	«Нормальная анатомия»	«До операции»	«Окклюзия»	«Виртуальный шунт»	«После операции»
Ветви ЛСМА	1,20	0,67	1,16 (↑71%)	1,21 (↑79%)	1,12 (↑65%)
Ветви ПСМА	2,40	0,92	1,11 (↑21%)	1,22 (↑32%)	1,09 (↑18%)
Ветви ПМА	1,12	0,77	1,08 (↑41%)	1,13 (↑48%)	1 (↑31%)

Примечание. ЛСМА — левая средняя мозговая артерия; ПСМА — правая средняя мозговая артерия; ПМА — передняя мозговая артерия.

Таблица 2. Доля суммарного объема крови, проходящего за один сердечный цикл через ветви каждой области интереса, по отношению к общему объему, поступившему в модель

Область интереса	Суммарный объем крови за один сердечный цикл, %				
	«Нормальная анатомия»	«До операции»	«Окклюзия»	«Виртуальный шунт»	«После операции»
Ветви ЛСМА	5,7	3,7	7,4	6,5	6,8
Ветви ПСМА	11,5	5,4	7,2	6,5	6,6
Ветви ПМА	5,3	4,3	6,9	6	6,1

Примечание. ЛСМА — левая средняя мозговая артерия; ПСМА — правая средняя мозговая артерия; ПМА — передняя мозговая артерия.

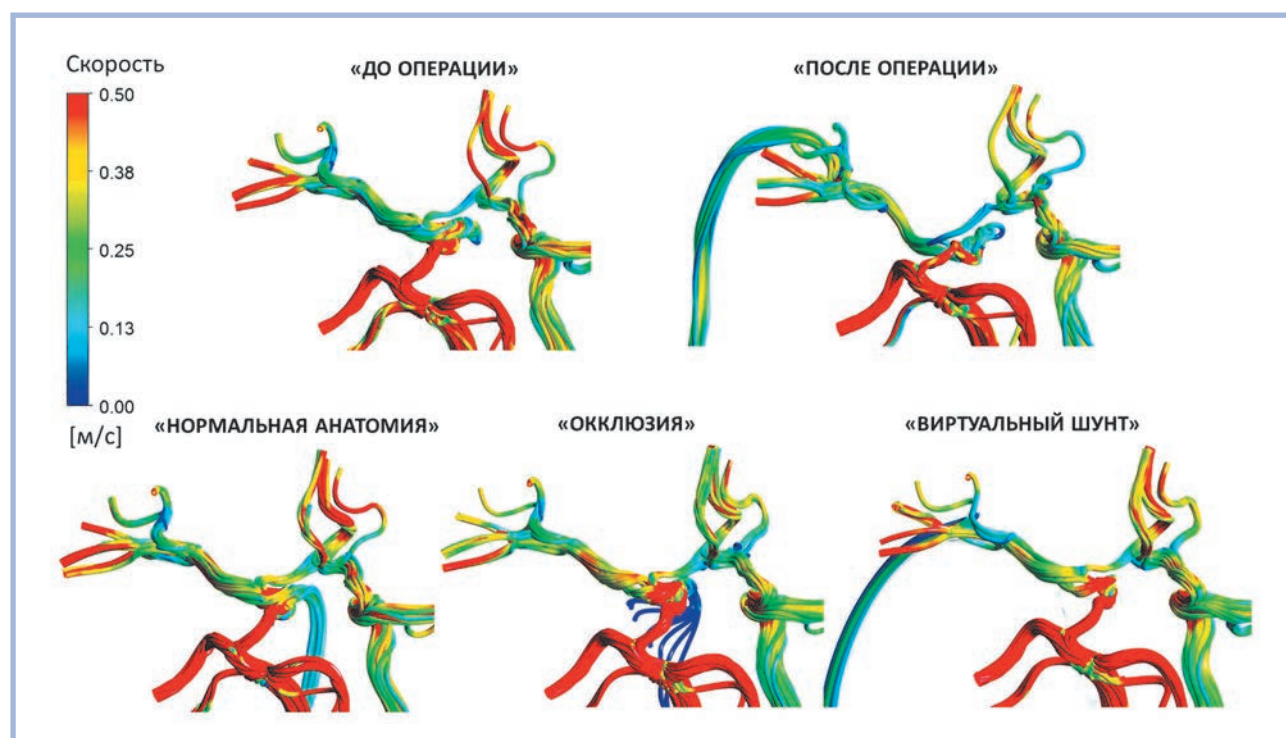


Рис. 5. Профили скорости кровотока в пяти исследуемых моделях.

Пояснения в тексте.

Моделирование виртуальных операций продемонстрировало увеличение объема кровоснабжения во всех регионах по сравнению с исходной, дооперационной, моделью (см. табл. 1). Поток в области левой СМА увеличился более чем на 70%, справа — на 20–30%, в ветвях ПМА — более чем на 40%, что может свидетельствовать об улучшении церебральной перфузии после операции, особенно на стороне поражения. Модель «После операции» (с реальной геометрией после вмешательства) подтверждает предположение об улучшении состояния кровотока

после выбранной тактики ревазуляризации. Увеличение объема во всех исследуемых регионах оказалось ниже, чем при расчете виртуальных операций, что может быть следствием использования новых граничных условий (значения скоростей, полученных при ФК МРТ после операции), но значения распределения потока по ветвям ВК было очень близким. Интересно, что в моделях «Нормальная анатомия» и «До операции» наблюдается схожий характер распределения между тремя регионами — большая доля потока направляется в ветви правой СМА. Для обе-

их моделей с лигированием левой ВСА (модели «Окклюзия» и «Виртуальный шунт») поток в правый регион приближается к значениям в других областях. Такой же результат наблюдался и в случае с реальной моделью после операции.

Результат также соответствовал клиническому исходу. В послеоперационном периоде в течение 6 мес наблюдались нормальное функционирование шунта и тромбирование левой ВСА, а также полная облитерация аневризмы и уменьшение тромбированного аневризматического мешка в размерах (см. рис. 1в). Отмечено отсутствие новых неврологических нарушений и восстановление церебральной перфузии в левых лобной, височной и теменной долях с синхронизацией обоих полушарий по данным перфузионной компьютерной томографии через 3 мес после операции (см. рис. 2б).

Обсуждение

Исследования с использованием CFD популярны в медицинской науке. Результатом CFD-анализа являются количественные данные параметров гемодинамики, рассчитанные на основе неинвазивных измерений персонально для пациента [11]. Компьютерные технологии позволяют варьировать анатомию и физические условия моделирования. Тем не менее в настоящее время планирование оперативных вмешательств с помощью компьютерного моделирования не распространено, большая часть исследований в этой области направлена на прогнозирование успешности стентирования [22–25]. Это может быть связано с некоторыми ограничениями метода, в том числе с необходимостью наличия специализированного программного обеспечения и участия в работе инженера или математика, значительными затратами времени для создания моделей, чувствительностью к граничным условиям. В данной работе мы использовали некоторые упрощения, которые часто применяются при расчете сложных моделей сосудов. В частности, мы не учитывали неньютоновское поведение крови и упругие свойства сосудов, поскольку достаточно крупные артерии головного мозга характеризуются относительно жесткими стенками [26, 27]. Необходимость включения этих свойств в модель подлежит обсуждению, так как корректные персонализированные физические характеристики получить невозможно, а значение их влияния на результаты можно установить только в ходе дальнейшего изучения. Детальное исследование этой проблемы затруднено спецификой сбора данных. Собрать репрезентативную выборку наблюдений со всеми необходимыми параметрами и известным отдаленным исходом довольно сложно. По результатам настоящего исследования можно выделить успешную ве-

рификацию расчетных моделей, соответствие виртуальной окклюзии данным БОТ и прогнозирование эффективности выбранной тактики, что свидетельствует о большом потенциале метода и актуальности проведения дополнительных исследований.

Заключение

Опыт применения математического моделирования гемодинамики показал его состоятельность применительно к виртуальному планированию экстраинтракраниального шунтирования у больной с гигантской аневризмой внутренней сонной артерии. В дальнейших исследованиях с использованием большего количества клинических случаев потребуется добиться более точной согласованности результатов моделирования и данных о потоках крови, измеренных до и после операции, определить критерии оценки эффективности реваскуляризации по трехмерным моделям и разработать методику проведения исследования. Это обеспечит инструмент, который поможет хирургам самостоятельно получать данные о гемодинамике. При достижении положительных результатов можно будет применить CFD-моделирование в рутинной клинической практике для выбора правильной хирургической тактики для каждого пациента со сложной аневризмой. В совокупности это позволит снизить количество предоперационных исследований и риск развития осложнений.

Участие авторов:

Концепция и дизайн исследования — Гаврилов А.В., Крылов В.В., Благосклонова Е.Р., Долотова Д.Д.

Сбор и обработка материала — Степанов В.Н., Полунина Н.А., Архипов И.В.

Анализ данных — Архипов И.В., Благосклонова Е.Р., Долотова Д.Д.

Написание текста — Благосклонова Е.Р., Долотова Д.Д.

Редактирование — Долотова Д.Д., Полунина Н.А.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина» МГУ им. М.В. Ломоносова.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №18-29-26007).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Steiner T, Juvela S, Unterberg A, Jung C, Forsting M, Rinkel G; European Stroke Organization. European Stroke Organization Guidelines for the Management of Intracranial Aneurysms and Subarachnoid Haemorrhage. *Cerebrovascular Diseases (Basel, Switzerland)*. 2013;35(2):93-112. <https://doi.org/10.1159/000346087>
- Etminan N, Buchholz BA, Dreier R, Bruckner P, Torner JC, Steiger HJ, Hänggi D, Macdonald RL. Cerebral Aneurysms: Formation, Progression, and Developmental Chronology. *Translational Stroke Research*. 2014;5(2):167-173. <https://doi.org/10.1007/s12975-013-0294-x>
- Etminan N, Rinkel GJ. Unruptured intracranial aneurysms: development, rupture and preventive management. *Nature Reviews. Neurology*. 2016;12(12):699-713. <https://doi.org/10.1038/nrneuro.2016.150>
- Крылов В.В., Элиава Ш.Ш., Яковлев С.Б. Хейреддин А.С., Белоусова О.Б., Полунина Н.А. Клинические рекомендации по лечению неразорвавшихся бессимптомных аневризм головного мозга. *Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко*. 2016;80(5):124-135. Krylov VV, Eliava ShSh, Yakovlev SB, Kheyreddin AS, Belousova OB, Polunina NA. Clinical guidelines for treatment of unruptured asymptomatic brain aneurysms. *Burdenko's Journal of Neurosurgery*. 2016;80(5):124-135. (In Russ.). <https://doi.org/10.17116/neiro2016805124-135>
- Choudhri O, Mukerji N, Steinberg GK. Combined Endovascular and Microsurgical Management of Complex Cerebral Aneurysms *Frontiers in Neurology*. 2013;4:108. <https://doi.org/10.3389/fneur.2013.00108>
- Andaluz N, Zuccarello M. Treatment Strategies for Complex Intracranial Aneurysms: Review of a 12-Year Experience at the University of Cincinnati. *Skull Base*. 2011;21(04):233-242. <https://doi.org/10.1055/s-0031-1280685>
- Hanel RA, Spetzler RF. Surgical treatment of complex intracranial aneurysms. *Neurosurgery*. 2008;62(6 Suppl 3):1289-1297; discussion 1297-1299. <https://doi.org/10.1227/01.neu.0000333794.13844.d9>
- Straus DC, da Silva HB, Sekhar LN. *Complex Aneurysms and Cerebral Bypass*. In: Principles of Neurological Surgery. Fourth Ed. Elsevier Inc.; 2018:295-312.e1. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-43140-8.00019-6>
- Menon G, Menon S, Hegde A. Does universal bypass before carotid artery occlusion obviate the need for balloon test occlusion: Personal experience with extracranial-Intracranial bypass in 23 patients. *Journal of Neurosciences in Rural Practice*. 2019;10(2):194-200. https://doi.org/10.4103/jnrp.jnrp_381_18
- Menon G, Jayanand S, Krishnakumar K, Nair S. EC-IC bypass for cavernous carotid aneurysms: An initial experience with twelve patients. *Asian Journal of Neurosurgery*. 2014;9(2):82-88. <https://doi.org/10.4103/1793-5482.136718>
- Morris PD, Narracott A, von Tengg-Kobligh H, Silva Soto DA, Hsiao S, Lungu A, Evans P, Bressloff NW, Lawford PV, Hose DR, Gunn JP. Computational fluid dynamics modelling in cardiovascular medicine. *Heart (British Cardiac Society)*. 2016;102(1):18-28. <https://doi.org/10.1136/heartjnl-2015-308044>
- Takayama S, Watanabe M, Takao H, Mamori H, Murayama Y, Yamamoto M. *Numerical Analysis of Blood Flow for Effectiveness of STA-MCA Anastomosis Operation*. The Proceedings of the Fluids Engineering Conference. Barcelona, Spain; 2015. https://doi.org/10.1299/jsmefed.2015_1303-1_1
- Löhner R, Cebal J, Soto O, Yim P, Burgess JE. Applications of patient-specific CFD in medicine and life sciences. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 2003;43:637-650. <https://doi.org/10.1002/flid.544>
- Krylov V, Grigoryeva E, Dolotova D, Blagosklonova E, Gavrilov A. CFD Modelling of Local Hemodynamics in Intracranial Aneurysms Harboring Arterial Branches. *Studies in Health Technology and Informatics*. 2017;238:64-67.
- Sia SF, Qian Y, Zhang Y, Morgan MK. Mean Arterial Pressure Required for Maintaining Patency of Extracranial-to-Intracranial Bypass Grafts. *Neurosurgery*. 2012;71(4):826-832. <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e3182666c2>
- Zhang Y, Sia SF, Morgan MK, Qian Y. Flow resistance analysis of extracranial-to-intracranial (EC-IC) vein bypass. *Journal of Biomechanics*. 2012;45(8):1400-1405. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2012.02.025>
- Sia SF, Zhang Y, Qian Y, Kadir KAA, Nor HM, Morgan MK. Hemodynamic effects resulting from a common carotid to middle cerebral bypass with varying degrees of proximal internal carotid stenosis. *Neurology Asia*. 2014;19(3):241-247.
- Imai H, Watanabe K, Miyagishima T, Yoshimoto Y, Kin T, Nakatomi H, Saito N. The outcome of a surgical protocol based on ischemia overprotection in large and giant aneurysms of the anterior cerebral circulation. *Neurosurgical Review*. 2016;39(3):505-517. <https://doi.org/10.1007/s10143-016-0721-z>
- Multivox Homepage. Accessed December 01, 2021. <https://multivox.ru>
- Ansys Homepage. Accessed December 01, 2021. <https://www.ansys.com>
- Blagosklonova E, Dolotova D, Polunina N, Stepanov V, Kiseleva A, Arhipov I, Gavrilov A, Krylov V. Virtual Planning of Extra-Intracranial Bypass with Numerical Investigation of Hemodynamics. *Studies in Health Technology and Informatics*. 2019;262:308-311. <https://doi.org/10.3233/SHT1190080>
- Ragkousis GE, Curzen N, Bressloff NW. Computational Modelling of Multi-folded Balloon Delivery Systems for Coronary Artery Stenting: Insights into Patient-Specific Stent Malapposition. *Annals of Biomedical Engineering*. 2015;43(8):1786-1802. <https://doi.org/10.1007/s10439-014-1237-8>
- Janiga G, Berg P, Beuing O, Neugebauer M, Gasteiger R, Preim B, Rose G, Skalej M, Thévenin D. Recommendations for accurate numerical blood flow simulations of stented intracranial aneurysms. *Biomedizinische Technik. Biomedical Engineering*. 2013;58(3):303-314. <https://doi.org/10.1515/bmt-2012-0119>
- Raptis A, Tasso P, Batzalexis K, Gallo D, Xenos M, Morbiducci U, Gianoukas A. Remodeling effects of carotid artery stenting versus endarterectomy with patch angioplasty in terms of morphology and hemodynamics. *Computers in Biology and Medicine*. 2022;140:105072. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.105072>
- Abdehkhakha A, Hammond AL, Patel TR, Siddiqui AH, Dargush GF, Meng H. Cerebral aneurysm flow diverter modeled as a thin inhomogeneous porous medium in hemodynamic simulations. *Computers in Biology and Medicine*. 2021;139:104988. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104988>
- Torii R, Wood NB, Hadjiloizou N, Dowsey AW, Wright AR, Hughes AD, Davies J, Francis DP, Mayet J, Yang G-Z, Thom SAM, Xu XY. Fluid-structure interaction analysis of a patient-specific right coronary artery with physiological velocity and pressure waveforms. *Communications in Numerical Methods in Engineering*. 2009;25(5):565-580. <https://doi.org/10.1002/cnm.1231>
- Valencia A, Zarate A, Galvez M, Badilla L. Non-Newtonian blood flow dynamics in a right internal carotid artery with a saccular aneurysm. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 2006;50(6):751-764. <https://doi.org/10.1002/flid.1078>

Поступила/Received 17.03.2022
Принята к печати/Accepted 25.03.2022

Комментарий

Исследование особенностей кровотока в сосудах головного мозга всегда имело большое значение в диагностике и выборе тактики лечения цереброваскулярной патологии. Несмотря на широкий арсенал современных методов измерения церебральной перфузии и величин кровотока в отдельных участках сосудов артериального круга большого мозга, целостной трехмерной картины течения крови и ее воздействия на стенки сосудов они не предоставляют. Для этих целей в последнее время все чаще используют методы математического моделирования гемодинамики, позволяющие «неинвазивно» заглянуть в просвет артерии с целью выявления патогенетических механизмов заболевания и прогнозирования его исходов. Развитие и широкая доступность в настоящее время высокопроизводительной вычислительной техники, разработка алгоритмов расчетов, сегментации и построения расчетных сеток по индивидуальным данным строения сосудистой системы головного мозга открывают новое перспективное направление пациентоориентированного математического моделирования гемодинамики, которое все чаще пытаются применить в клинической практике. Представленная работа Е.Р. Благосклоновой и соавторов является отражением данной тенденции и направлена на прогнозирование изменений параметров гемодинамики при моделировании выключения внутренней сонной артерии из кровотока и шунтирующей операции. В качестве объекта исследования выбрано клиническое наблюдение пациентки с гигантской аневризмой внутренней сонной артерии. Авторами использованы наиболее распространенная математическая модель гемодинамики, основанная на уравнениях Навье—Стокса, и сегментированная трехмерная модель сонной артерии и артерий виллизиева круга. Следует отметить скрупулезность проведенной работы. Большое внимание уделено созданию трехмерной расчетной области на основании реальных ангиографических данных пациента. Проведенные расчеты демонстрируют совпадение с данными интраоперационных измерений. Тем не менее возникает ряд существенных ограничений, влияющих, вероятно, на информативность и корректность проведенного моделирования. Так, граничные условия «свободного потока», используемые

в дистальных участках модели, не учитывают наличие периферического сопротивления в бассейнах исследуемых артерий, в том числе эффекты ауторегуляции мозгового кровотока. Это объясняет неправдоподобное увеличение кровотока в наружной сонной артерии при окклюзии внутренней. Представленная модель отражает в первую очередь гидродинамическую способность артерий виллизиева круга компенсировать окклюзию внутренней сонной артерии. При удовлетворительной компенсации мозгового кровотока, о чем можно судить по данным приведенных клинических исследований и баллон-окклюзионной пробы, этого достаточно. В противном случае значительную роль в компенсации мозгового кровотока играет лептоменингеальная коллатеральная сеть — она вообще не учитывалась в модели. Таким образом, представленная модель может лишь определить признаки компенсации мозгового кровотока по виллизиеву кругу, что и получено в приведенном исследовании как в расчетах, так и по данным интраоперационных измерений. В таком случае возникает вопрос целесообразности наложения экстраинтракраниального анастомоза, тем более в его широкоформатном исполнении. Представленная работа направлена в первую очередь на иллюстрацию возможностей и перспектив развития математического моделирования в решении сложных клинических задач лечения цереброваскулярной патологии. Его применение в клинической практике, безусловно, преждевременно и недопустимо в настоящее время, что признают и сами авторы статьи. Развитие более корректных и клинически верифицированных методов математического моделирования мозгового кровообращения связано со значительным усложнением используемой модели гемодинамики и решением ряда специализированных математических и физических задач. Необходим широкий междисциплинарный подход к решению данной проблемы с привлечением специалистов с высокой математической квалификацией. В то же время материал представляет существенный интерес для специалистов и может быть использован как фундамент дальнейших междисциплинарных исследований в области вычислительной гемодинамики.

В.А. Лукшин (Москва)