

УДК 007: 57+007:573

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И БИОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КРИТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И КОРРЕКЦИИ СТРУКТУР СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ (Часть 2*)

П. И. Бегун,

доктор техн. наук, профессор

О. В. Кривожижина,

аспирант

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

В. К. Сухов,

доктор мед. наук, заведующий отделением эндоваскулярной хирургии

городская многопрофильная больница № 2 г. Санкт-Петербурга

Разработаны компьютерные модели для исследования перемещений и напряжений при дилатации кровеносных сосудов с бляшками разной степени развития и определения критического состояния истинных мешотчатых аневризм. Проведенные исследования влияния геометрических параметров и механических свойств бляшки и сосуда на величину дилируемого отверстия и выявление критического состояния аневризм определяют необходимость предоперационного анализа с использованием этих моделей.

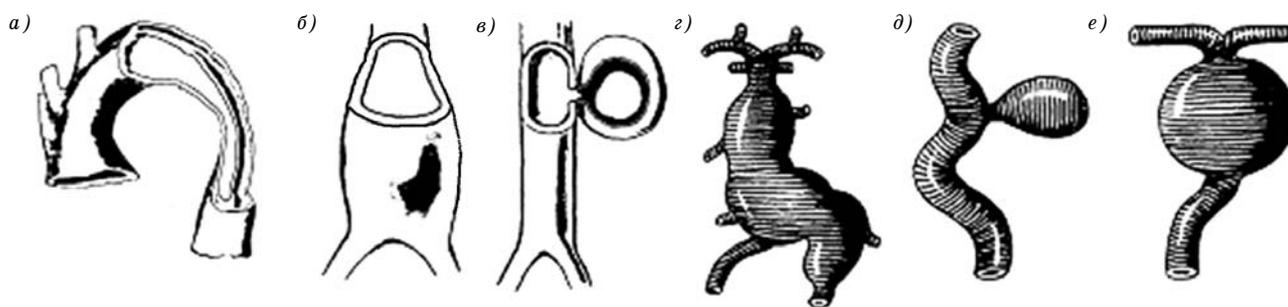
Computer models and scheme of calculation for research of displacement and strains in true aneurysms are developed and at a dilatation of blood vessels with plaques of a different degree of development. Outcomes of the carried out evaluations confirm an imperative need of expansion of number of parameters at clinical diagnostics of a critical condition of aneurysms and preoperative diagnostics of outcomes endovascular surgical operations on stenosed blood vessels.

Аневризматические поражения сосудистой системы и способы их устранения

Аневризма – значительное расширение кровеносного сосуда за счет ограниченного выпячивания его стенки или равномерного растяжения ее на определенном участке вследствие ее патологических изменений или аномалии развития [5]. Аневризматические изменения могут развиваться в любых артериях, начиная от восходящей аорты и кончая артериями диаметром до 2 мм [6–11]. По происхождению различают врожденные и приобретенные аневризмы. Большинство аневризм – приобретенные. Причины их возникновения – атеросклероз, воспаление, травмы.

Различают расслаивающиеся, истинные и ложные аневризмы (рис. 8, а–в). Аневризматические изменения могут развиваться в любых артериях, начиная от восходящей аорты и кончая аортами диаметром до 2 мм. Расслаивающаяся аневризма имеет полость или канал между слоями сосудистой стенки вследствие расслоения последней потоком крови, нагнетаемой через дефект интимы. Стенки истинной аневризмы сохраняют структурные элементы, присущие сосуду. Процесс развития истинных аневризм включает следующие этапы: 1) первичное поражение стенок аорты (атеросклероз, инфекция, генетические дефекты); 2) воспалительная инфильтрация стенок аорты, сопровождающаяся ее утолщением и развитием фиброза тканей, окружающих аневризму; 3) дегенерация и фрагментация эластинового каркаса аорты; 4) растяжение пораженных участков стенки и расширение просвета аорты под влиянием внутрисо-

*Информационно-управляющие системы: Журнал. Ч. 1. 2005. № 6. С. 51–56.



■ **Рис. 8.** *Формы аневризм: а – расслаивающаяся; б – истинная; в – ложная; г – веретенообразная; д – мешкотчатая; е – сферическая*

судистого давления. Ложная аневризма – патологическая полость, возникающая вследствие организации пульсирующей гематомы. Она сообщается с просветом сосуда через сквозной дефект его стенки. Этот дефект образуется в результате травмы сосуда, разрушения его стенки патологическим процессом или аррозии сосудистой анастомоза.

Истинные аневризмы имеют веретенообразную, мешковидную и сферическую формы (рис. 8, г–е). Веретенообразная аневризма – это диффузное расширение всего периметра сосуда, связанное с циркулярным поражением его стенки на определенном протяжении. Мешковидные аневризмы возникают при локализованном поражении одной из сосудистых стенок. В результате этого происходит выбухание стенки в виде тонкостенного мешка. В нем можно обычно различить дно, среднюю часть и шейку. Реже аневризма имеет вид круглого сферического образования.

Размеры аневризм изменяются в широком диапазоне: 1) в аорте выделяют малые аневризмы – 3–5 см, средние – 5–7 см, большие – больше 7 см, гигантские – в 8–10 раз превышающие размер инфраренального отдела аорты; 2) в каротидном и вертебробазиллярном бассейнах: малые – менее 1 см, крупные – 1–2,5 см, гигантские – свыше 2,5 см. У пожилых людей в стенке аорты прогрессируют процессы дегенерации основных структур, обеспечивающих прочность сосуда, что постепенно приводит к формированию аневризмы. С возрастом дегенеративные изменения в стенке сосуда и увеличение артериального давления приводят к увеличению диаметра аорты в норме до 25% по отношению к 25-летнему возрасту. В зависимости от причины возникновения, размеров и локализации аневризмы развивается одно из следующих осложнений: разрыв аневризмы, расслоение стенок аневризмы, эмболизация дистальных артерий, инфицирование стенок и содержания аневризмы, формирование фистулы с соседними структурами, сдавливание соседних структур, тромбоз аневризмы.

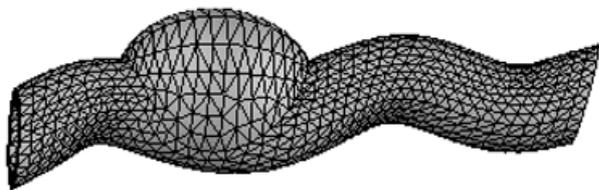
Разрыв аневризмы сопровождается интенсивным, часто смертельным внутренним кровотечением. Летальность при разрыве аневризм составляет более 80% и не имеет тенденции к снижению.

Наиболее часто происходит разрыв больших аневризм или аневризм, имеющих тенденцию к быстрому увеличению своих размеров. Однако внезапный разрыв может осложнить течение любой, даже небольшой по размерам аневризмы [5]. При возникновении патологического расширения участка аорты соседние органы могут подвергаться давлению со стороны аневризмы. Это приводит к нарушению их просвета и к функциональным нарушениям.

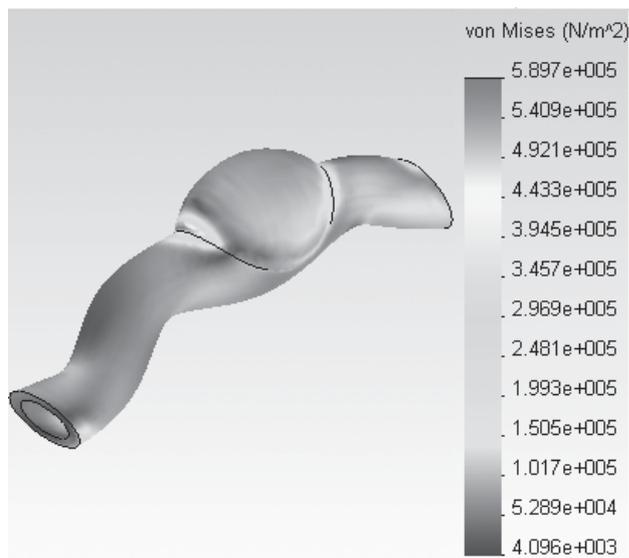
В зависимости от развивающихся патологических изменений клиническая картина аневризматических образований отличается большим разнообразием. Для диагностики аневризм используют различные исследования: ультразвуковое сканирование, рентгенологический метод, компьютерную томографию, чреспищеводную эхоаортографию, рентгеноконтрастную аортографию [5, 7]. С помощью спиральной компьютерной томографии можно проводить объемное исследование с использованием тонких и перекрещивающихся между собой срезов – это позволяет создавать высококачественные трехмерные реконструкции биологических структур [7, 9].

При диагностике определяют: распространенность аневризматического расширения; 2) наличие признаков воспалительного процесса на стенках аневризмы; 3) размеры и состояние пристеночного тромба в просвете аневризмы; 4) состояние артериальных сосудов выше и ниже участка аневризматического расширения; 5) наличие соустьев между аневризмами и соседними структурами; 6) характер вовлечения соседних с аневризмой органов в патологический процесс [9].

Самым верным прогностическим фактором в клинике признают диаметр аневризмы [12–14]. При этом за диаметр принимают максимальный размер аневризмы. Как сами сосуды, так и аневризмы имеют разные геометрические и биомеханические характеристики, которые индивидуальны и зависят от возраста. Жесткость стенок с возрастом увеличивается, а прочность уменьшается. Различные участки одного и того же сегмента аорты обладают разными биомеханическими свойствами [15].



■ **Рис. 9.** Конечно-элементная модель аневризмы на криволинейном сегменте кровеносных сосудов



■ **Рис. 10.** Распределение напряжений σ в истинной мешотчатой аневризме внутренней сонной артерии:
 $L_a = 20$ мм; $H_a = 6,5$ мм; $h_a = 1,5$ мм;
 $E_c = 0,85$ МПа; $E_a = 2,55$ МПа; $p = 1,6 \cdot 10^4$ Па

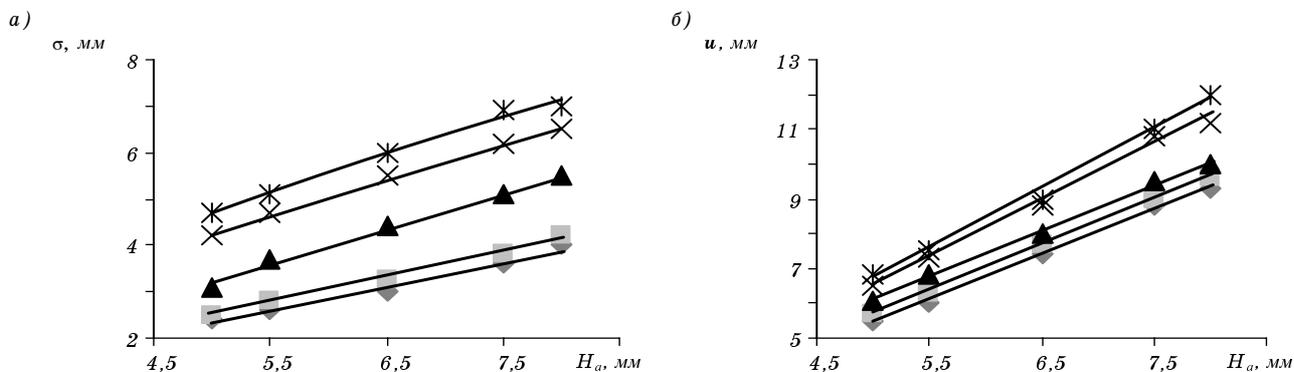
Для решения вопросов активной восстановительной хирургии сосудов с аневризматическими образованиями необходимы точные сведения о всех размерах аневризмы, толщине ее стенки, особенностях топографо-анатомического расположения, условиях взаимодействия с окружающими тканями, о гемодинамике в окрестности аневризмы и о механических свойствах стенки аневризмы и сосуда. Одной из важных задач для построения системы предоперационной диагностики является анализ критического состояния аневризмы. В основе этого анализа лежат исследования напряженно-деформированного состояния аневризматического образования [3]. Сведения о напряженно-деформированном состоянии аневризмы и прилегающих биологических структур позволяют оценить степень риска предстоящей коррекции и более целенаправленно провести предоперационную подготовку.

Для определения критического состояния аневризм необходимо выполнить компьютерное моделирование и исследование НДС в аневризмах.

Компьютерное моделирование и исследование критического состояния аневризм

Расчетные схемы истинных мешотчатых аневризм построены при следующих допущениях: 1) кровеносный сосуд и аневризма – трехмерные тела; 2) материал аневризмы однородный и изотропный; 3) купол аневризмы осесимметричный; 4) стенка аневризмы однослойная, с конструктивным модулем упругости E ; 5) начальные напряжения в структурах сосуда и аневризмы отсутствуют. Вычисления проведены методом КЭ при разбиении исследуемой структуры на 80 тысяч тетраэдральных элементов (рис. 9).

Зависимости экстремальных значений напряжений и перемещений в сегментах сосудов с анев-



■ **Рис. 11.** Зависимости экстремальных напряжений σ (а) и перемещений u (б) в криволинейном сегменте внутренней сонной артерии с мешотчатой аневризмой от высоты аневризмы H_a :
 $E_c = 0,85$ МПа; $L_a = 20$ мм; $R_c = 3,5$ мм; $h_a = 1,5$ мм; $p = 1,6 \cdot 10^4$ Па; $\nu = 0,4$ (E_a (а): \blacklozenge – 2,55; \blacksquare – 1,7; \blacktriangle – 0,85; \times – 0,425; \ast – 0,28 МПа; E_a (б): \blacklozenge – 0,28; \blacksquare – 0,425; \blacktriangle – 0,85; \times – 1,7; \ast – 2,55 МПа)

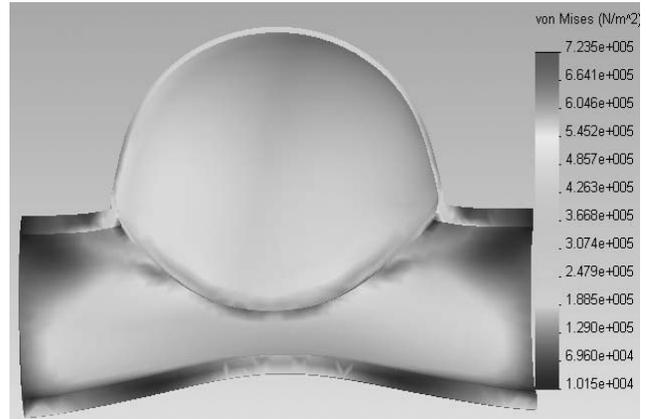
ризмами от их геометрических параметров и механических свойств при давлении $p = 1,6 \cdot 10^4$ Па приведены на рис. 10–13. Разрушающее напряжение в сонной артерии $\sigma_{кр} = 1,56 \cdot 10^6$ Па, в исследуемых участках аорты $0,71 \cdot 10^6$ Па. При анализе критического состояния аневризм введен коэффициент запаса $k = 2,5$.

В аневризмах сонной артерии (рис. 10, 11):

1) в сегментах с параметрами $L_a = 20$ мм; $H_a = 6,5$ мм; $h_a = 1,5$ мм; $E_c = 0,85$ МПа, $\nu = 0,4$ при изменении E_a в диапазоне $0,2 \div 3$ МПа напряжение увеличивается в 2 раза, а перемещение уменьшается в 2 раза (критическое состояние аневризмы не возникает);

2) в сегментах с параметрами $L_a = 20$ мм; $h_a = 1,5$ мм; $E_c = 0,85$ МПа; $\nu = 0,4$ при изменении H_a от 5 до 8 мм напряжение увеличивается в 1,5 раза, а перемещение – в 1,7 раза (при значениях $E_a = 0,28 \div 0,85$ МПа напряжение ниже критического, при значениях $E_a = 1,70 \div 2,55$ МПа при $H_a \geq 6,5$ мм возникает критическое состояние);

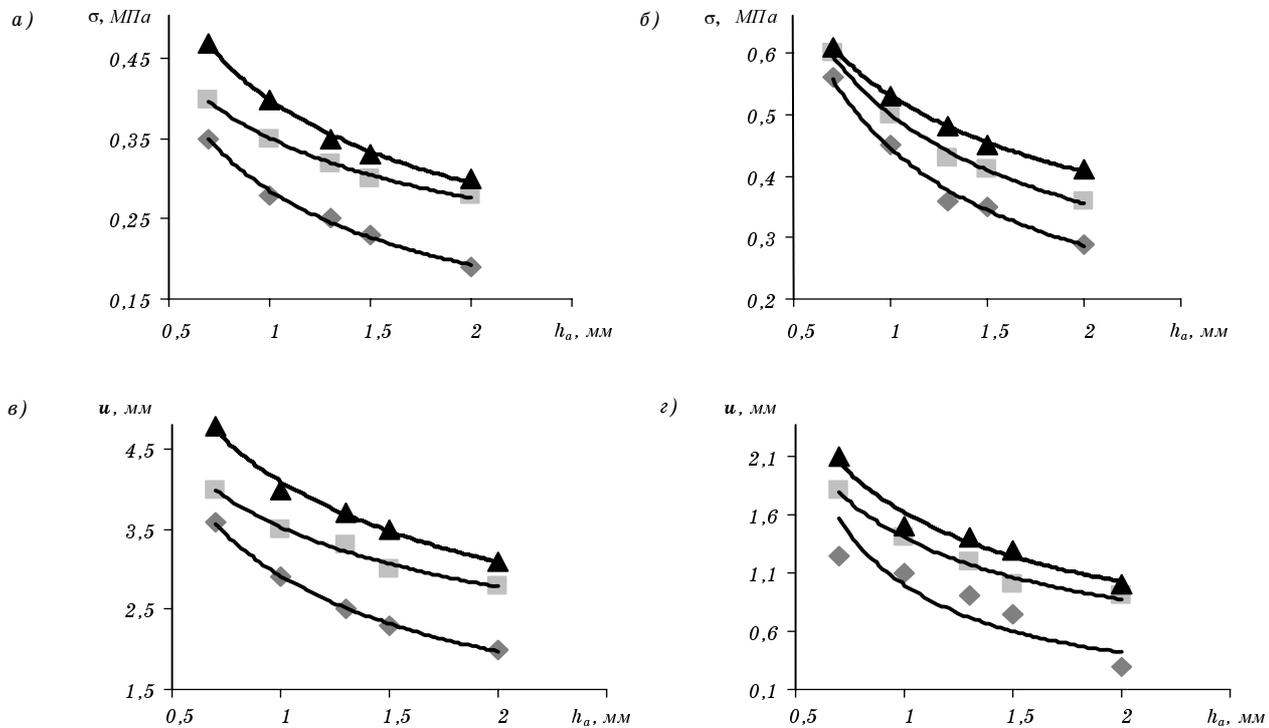
3) в сегментах с параметрами $L_a = 20$ мм; $H_a = 6,5$ мм; $E_c = 0,85$ МПа; $\nu = 0,4$ при изменении h_a от 1 до 2 мм ($E_a = 0,28 \div 0,85$ МПа) напряжение уменьшается в 1,4, а перемещение в 1,5 раза (напряжение ниже критического); при значениях $E_a = 1,70 \div 2,55$ МПа и $h_a < 1,5$ мм возникает критическое состояние.



■ Рис. 12. Распределение напряжений σ в истинной мешотчатой аневризме в прямолинейном сегменте аорты:
 $L_a = 19,5$ мм; $H_a = 15,7$ мм; $h_a = 0,7$ мм;
 $E_c = 0,9$ МПа; $E_a = 0,45$ МПа; $p = 1,6 \cdot 10^4$ Па

В аневризме аорты (рис. 12, 13):

1) в сегментах с параметрами $L_a = 19,5$ мм; $H_a = 15,7$ мм; $h_a = 0,7$ мм; $E_c = 0,9$ МПа; $\nu = 0,4$ на ПС при $E_a = 0,2 \div 1$ МПа критическое состояние не возникает, а на КС аневризмы находится в критическом состоянии;



■ Рис. 13. Зависимость экстремальных напряжений σ (а, б) и перемещений u (в, г) в прямолинейном (а, в) и криволинейном (б, г) сегментах аорты с мешотчатой аневризмой от толщины стенки аневризмы: $E_c = 0,9$ МПа; $p = 1,6 \cdot 10^4$ Па; $L_a = 19,5$ мм; $\nu = 0,4$ (E_a (а, б): \blacklozenge – $0,3$; \blacksquare – $0,45$; \blacktriangle – $0,9$ МПа; E_a (в, г): \blacklozenge – $0,3$; \blacksquare – $0,45$; \blacktriangle – $0,9$ МПа)

2) в сегментах с параметрами $L_a = 19,5$ мм; $H_a = 15,7$ мм; $E_c = 0,9$ МПа; $\nu = 0,4$ при изменении h_a от 0,5 до 2 мм на ПС при значениях $E_a = 0,45 \div 0,9$ МПа возникает критическое состояние, а при $E_a = 0,3$ МПа критическое состояние возникает при $h_a < 1$ мм (на КС критическое состояние возникает во всем диапазоне рассмотренных параметров);

3) в сегментах с параметрами $L_a = 19,5$ мм; $h_a = 0,7$ мм; $E_c = 0,9$ МПа; $\nu = 0,4$ при изменении H_a от 12 до 18 мм на ПС при значениях $E_a = 0,3 \div 0,9$ МПа критическое состояние не возникает, напряжение не обнаружено (на КС критическое состояние возникает во всем диапазоне рассмотренных параметров).

Литература

1. Сухов В. К., Шлойдо Е. А., Качанов И. Н. К вопросу о современных подходах в лечении ИБС // Современные направления в диагностике, лечении и профилактике заболеваний. СПб.: Ольга, 2001. 184 с.
2. Jean Marco, Gincarlo Biamino, Jean Fajadet, Marie Claude Morice. The Paris course on revascularization // Europa organization. Paris, 2000. 441 p.
3. Бегун П. И. Гибкие элементы медицинских систем. СПб.: Политехника, 2002. 300 с.
4. Бегун П. И., Сухов В. К. Проблемы информационного обеспечения малоинвазивных интервенционных рентгено-хирургических операций на кровеносных сосудах // Информационно-управляющие системы. 2002. № 1. С. 52–56.
5. Седов В. М., Богомолов М. С., Бабков А. А. Аневризмы брюшного отдела аорты: Учеб. пособие / СПбГМУ. СПб., 2001. 58 с.
6. Дооперационная оценка степени риска хирургического лечения больных с аневризмами брюшной аорты / А. В. Покровский, В. Н. Дан, Ю. П. Богатов, А. М. Златовчен // Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. 2003. № 1. С. 48–51.
7. Новое и старое во внутрисосудистом лечении аневризм сосудов головного мозга / В. С. Папувцев, А. Ю. Иванов, А. В. Скупченко, Д. Е. Мацко // Регионарное кровообращение и микроциркуляции. 2003. Т. 2. С. 28–36.
8. Хирургические технологии в лечении аневризм грудного и торакоабдоминального отделов аорты / Ю. В. Белов, А. Б. Степаненко, А. П. Генс и др. // Хирургия. 2003. № 2. С. 22–27.
9. Белов Ю. В., Хамитов Ф. Ф. Диагностика аневризм торакоабдоминального отдела аорты // Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. 2001. № 3. С. 72–77.
10. Метод обходного временного шунтирования в хирургии аневризм грудного и торакоабдоминального отделов аорты / В. С. Аракелян, С. П. Новиков, Н. Р. Гамзеев и др. // Хирургия сердца и сосудов. 2003. № 3. С. 47–52.
11. Белов Ю. В., Чарчан Э. Р. Клапаносохраняющие операции у больных аневризмой восходящего отдела аорты с аортальной недостаточностью // Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. 2004. № 1. С. 59–64.
12. Ледерле Ф., Сэмьюэл В., Джонсон Т. Какой подход лучше при небольшой аневризме брюшного отдела аорты: безотлагательное иссечение или динамическое наблюдение? // Международный медицинский журнал. 2004. № 5. С. 497–503.
13. Nevitt M. P., Ballard D. J., Hallet J. W. Jr. Prognosis of abdominal aortic aneurysms: a population-based study / N Engl J Med. 1989. N 321. P. 1009–1014.
14. Natural history of patients with abdominal aortic aneurysm. Glimaker H, Holmberg L, Elvin A et al. // Eur J Vase Surg. 1991. N 5. P. 125–130.
15. Бегун П. И., Шукейло Ю. А. Биомеханика: Учебник для вузов. СПб.: Политехника, 2000. 463 с.

Вывод

Проведенные исследования влияния геометрических параметров и механических свойств бляшки и сосуда на величину дилатируемого отверстия и выявление критического состояния аневризм определяют необходимость предоперационного анализа с их использованием, а вводимые при этом погрешности вычислений – возможность предоперационной диагностики результатов эндоваскулярных малоинвазивных рентгенохирургических операций на сосудах и определения критического состояния аневризм.

Работа выполнена при поддержке научной программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (код 75403), грант РФФИ № 05-01-00768.