

УДК 531/534: [57+61]

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРЕПАДА  
ДАВЛЕНИЯ НА ТЕЧЕНИЕ КРОВИ В РАЗВЕТВЛЕННЫХ  
АРТЕРИЯХ С УЧЕТОМ ПОДВИЖНОСТИ СТЕНОК

Ю.А. Скобцов, Ю.В. Родин, В.С. Оверко

Донецкий национальный технический университет,  
Институт прикладной математики НАНУ (Донецк)  
[skobtsov@kita.dgtu.donetsk.ua](mailto:skobtsov@kita.dgtu.donetsk.ua)

*Виконано дослідження й візуалізація поведінки потоку крові в розгалужених судинах з урахуванням пружних властивостей стінок, Отримані поля швидкості й тиски в місці розгалуження судини. Показано збільшення силового впливу як на стінки судини, що витончує їх, так і на частки крові. Збільшення впливу на частки крові приводить до їхнього руйнування й зменшення кровопостачання органу.*

Нарушение кровообращения ишемического характера головного мозга, в основном, обусловлено атеросклерозом, аортоартеритом и патологической извитостью артерий. Известно, что треть летальных случаев при инсульте сопровождается аномальным развитием сонных и позвоночных артерий [1]. Много работ посвящено изучению особенностей потока крови (распределение давлений и скоростей) при наличии различных видов патологической извитости [2]. Исследование гемодинамики позволило установить зоны образования вихрей и обратных течений. В настоящее время согласно теории повреждения сосудистой стенки [3-5] существует повышенная вероятность развития атеросклеротического процесса на участках интимы, где наблюдаются пониженное значение касательных напряжений в потоке крови, десквамация (шелушение) эндотелия, развитие фиброза и аневризм сосудистой стенки.

Однако опасные участки артерии с точки зрения развития склеротического процесса могут быть обусловлены и особенностями напряженно-деформированного состояния сосудистой стенки. Для детального изучения механического поведения кровеносных сосудов в зоне патологической извитости необходимо применять уже более сложные нелинейные физические модели, которые учитывают упругость сосудов. В данной работе проведено исследование влияния изменения перепада давления участка артерии на величину деформации стенок артерии.

Система расчетных уравнений (Навье-Стокса и уравнение неразрывности) имеет вид:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

Для расчета выбиралась осредненная динамическая вязкость  $\mu = 4,5$  сантипуаз.

На стенках сосуда задавались условия прилипания, на входе и выходе переменные во времени давления, соответствующие изменению давления жидкость при прохождении по сосуду пульсовой волны

В программном комплексе *Comsol* была построена двухслойная модель бифуркации артерии с нелинейно-упругими свойствами. В работе [3] исследованы механические свойства стенок артерий, результаты которых использованы в данной работе. Механические свойства внешнего слоя описывались линейно-упругими соотношениями с модулем Юнга  $E = 9$  МПа и коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,25$ , а внутреннего слоя с нелинейным гиперупругим потенциалом: *Neo-Hookean*.

В пакете *Comsol* построена пространственная модель артериальной бифуркации. Параллельные концы артерии взяты достаточно длинными для того, чтобы граничные условия на их торцах (жесткое закрепление) не оказывали влияния на напряженно-деформированное состояние. Нагружение модели проводилось путем вычисления напряжений возникающих на стенке при пульсационном характере движения крови, которая в данных расчетах считалась несжимаемой жидкостью.

Расчеты показали, что под действием внутреннего давления деформации значительны в области непосредственно самого разветвления и на внутренней поверхности изгиба основного сосуда, причем деформация внутренней поверхности больше чем внешней, что приводит к уплотнению стенки артерии и, соответственно, потери эластичности (рис.1-3).

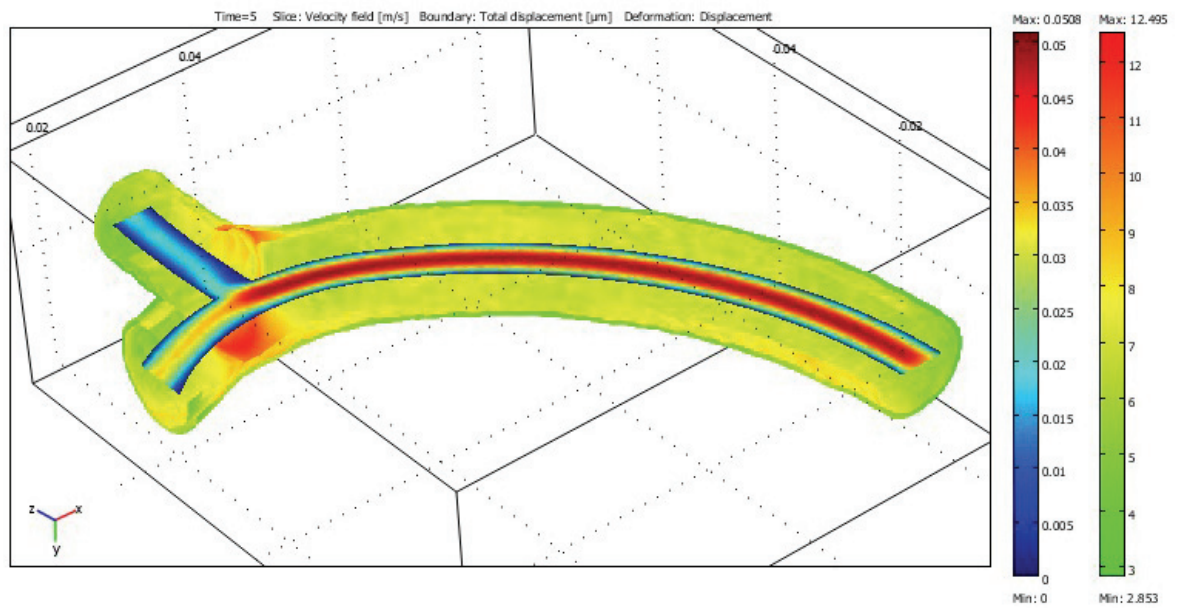


Рисунок 1 – Деформація сосуда и поле скорости при перепаде 8 Па.

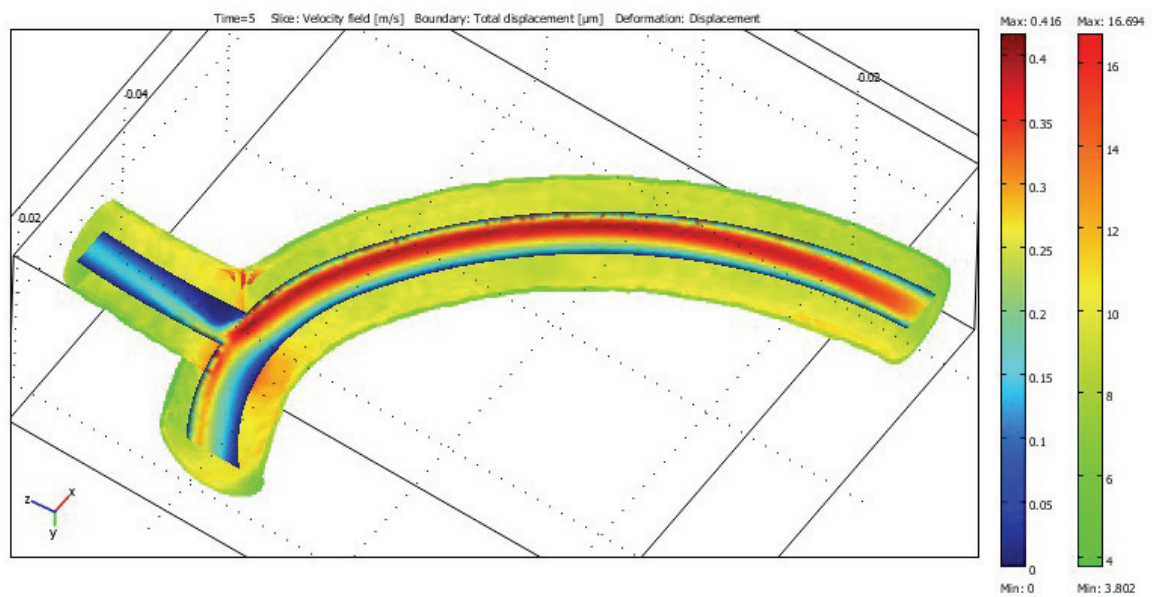


Рисунок 2 – Деформація сосуда и поле скорости при перепаде 88 Па.

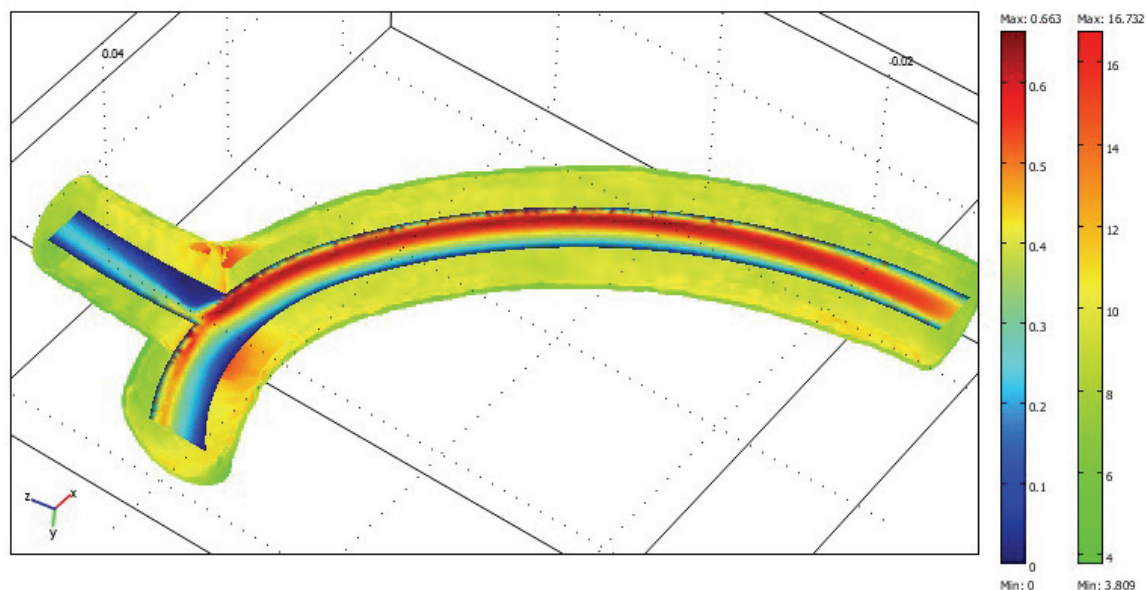


Рисунок 3 – Деформація сосуда і поле швидкості при перепаді 168 Па.

Крім того, що артерія «дышит» спостерігаються також переміщення в площині вигибу артерії. В межах просторової моделі нелінійно-пружого двохшарового артеріального сосуда в обчислювальній середі *Comsol* проведено чисельне моделювання процесу деформування біфуркації артерії при діянні внутрішнього тиску.

Із порівнянь даних по деформаціям і полям швидкості можна зробити висновок, що найбільші зміщення спостерігаються в області непрямого розгалуження і на внутрішній поверхні вигибу. Це пояснюється непрямым соударенням потоку рідини в місці відгалуження (в першому випадку) і деформацією поля швидкості зі зміщенням максимуму в область зовнішньої сторони вигибу, як наслідок цього збільшується тиск на внутрішній поверхні і, відповідно, збільшення деформації.

Збільшення перепаду тиску призводить до збільшення швидкості потоку і, як наслідок, збільшенню касательних напружень на стінці. Величина деформації артеріальної стінки збільшується незначительно. Даний ефект можна пояснити демпфуючим впливом оточуючих тканин. Із вищеприведеного можна зробити висновок про те, що в механізмі утворення аневризми значительна роль належить зниженню пружості оточуючих судин тканин.

---

**Список литературы**

1. Казанчян П.О., Попов В.А., Гапонова Е.Н., Рудакова Т.В. Диагностика и лечение патологической извитости сонных артерий // *Ангиология и сосудистая хирургия.* – 2001. – № 2. – С. 93–103.
2. Скобцов Ю.А., Родин Ю.В., Оверко В.С. Моделирование и визуализация поведения потоков крови при патологических процессах. Донецк:ИПММ НАНУ, Изд-во Заславский. – 2008. – 212с.
3. Аптуков В.Н., Осоргина Л.Ю. Определение параметров потенциала нелинейного сжимаемого материала сонной артерии человека при различных стадиях атеросклероза // *Российский журнал биомеханики.* – 2008. – Т. 12, № 3(41). – С. 23–31.
4. Вагнер Е.А., Суханов С.Г., Аптуков В.Н. Механическое поведение сосудистого анастомоза на склерозированных артериях и его моделирование // *Механика композитных материалов.* – 1982. – № 2. – С. 336–342.
5. Красавин В.А., Дружинин С.О., Суслов И.И., Морозов К.М., Кузьмин В.А. Концепция системных нарушений иммунитета в генезе аномалий ветвей дуги аорты // *Региональное кровообращение и микроциркуляция.* – 2007. – № 1(21). – С. 81–83.

Получено 07.09.2011