

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ КРОВИ В РАЗВЕТВЛЕНИЯХ  
КРОВЕНОСНЫХ СОСУДОВ СО СТЕНОЗОМ

Скобцов Ю.А., д.т.н., проф., кафедра АСУ, Донецкий национальный технический университет; Родин Ю.А., к.м.н., в.н.с. Институт Неотложной и восстановительной хирургии АМН Украины; Озерко В.С., асс.Донецкий национальный университет.

**Актуальность.** В структуре смертности населения Украины сердечно-сосудистые заболевания занимают печальное первое место и их численность повышается год от года [1-3]. Удельный вес ишемических нарушений мозгового кровообращения составляет более 20%. Высокий уровень стойкой инвалидизации больных, перенесших инсульт, низкий процент восстановления трудоспособности (60% и 10% соответственно) побуждает рассматривать эту проблему как общегосударственную [2]. По словам Гуреш Т. [2] осложняет ситуацию также то, что по сравнению со странами мира в Украине длительное время происходит устоявшийся процесс неуклонного уменьшения количества населения. Его численность сократилась с 52,2 млн. чел. в 1993 году до 48,5 млн. в 2002 году. Ученые прогнозируют, что до 2026 года население Украины уменьшится до 42 млн. человек. Цереброваскулярная патология играет в этом не последнюю роль.

В последнее время все больше внимания уделяется проблеме профилактики ишемического инсульта. Стратегическая задача - на ранних стадиях выявить заболевание и определить тактику последующего лечения, в том числе и хирургического. Одним из эффективных направлений ее решения можно считать подход, применяемый в ряде стран, имеющих положительный опыт в этой области – это ежегодное (2 раза в год) обследование всего населения, достигшего возраста 40 лет с применением ультразвуковых методик. Результаты обследований показывают, что примерно у 14,8% мужского населения выявляются цереброваскулярные заболевания различной этиологии.

Донецкая область, наиболее экологически небезопасный промышленный регион нашей страны, занимает печально лидирующее место по этой патологии. По независимой оценке за 2006 год в нашей области произошло более 15 тыс. новых инсультов, умерло от последствий инсультов более 14 тысяч человек, что превышает количество заболевших и умерших от онкопатологии.

### **Цель исследования.**

Оценить прогностическую эффективность системы ранней ультразвуковой диагностики больных хронической сосудистой мозговой недостаточностью (ХСМН).

Возникающая стенозирование бифуркации сонных сосудов ведет к нарушению кровоснабжения мозга. Проблемам расчета течений крови посвящены многие работы, в частности, авторов [4,5] данной статьи. В данной работе исследовано влияние степени стеноза кровеносного сосуда на изменение расхода жидкости в пораженном разветвлении сосудов.

Расчетную область определим следующим образом: к искривленному участку исследуемого сосуда примыкают прямолинейные входной и выходной участки, необходимые для стабилизации потока и последующей постановке нейтральных граничных условий на выходе расчетной области. Поток крови будем считать несжимаемой жидкостью, стенки жесткими.

Система расчетных уравнений имеет вид:

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

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

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial y} + v \frac{\partial w}{\partial z} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

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

Система содержит следующий безразмерный параметр:

$$\text{Re} = \frac{U \cdot D}{\nu} - \text{число Рейнольдса. В данной работе } \text{Re} = 1000.$$

В качестве начальных данных задается исходное поле скоростей и давления. В качестве начального поля скоростей выбран профиль Пуазейля.

Начальный профиль скорости зададим следующим образом:

$$u(0, x, y, z) = u_H \cdot (1 - r^2), \quad v(0, x, y, z) = 0, \quad w(0, x, y, z) = 0.$$

Для давления за начальное распределение примем гидростатическое. Следовательно, рассматриваемое избыточное давление  $P$  будет равно нулю, т.е.  $P(0, x, y, z) = 0$ . Метод численной реализации и проверки устойчивости изложен в работах [4-8].

На основании ультразвуковых исследований, пример которых представлен на рис.1, получены экспериментальные данные, включающие степень стеноза и конфигурацию сосудов, которые использованы при построении модели.

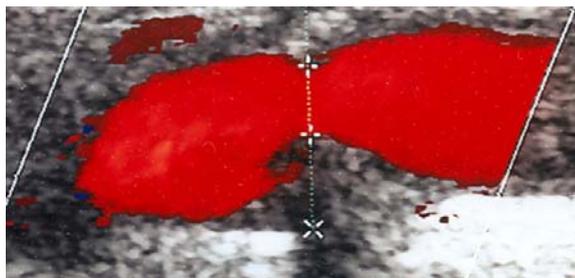


Рис.1. УЗ изображение сонной артерии с атеросклеротической бляшкой

Разработаны математические модели движения жидкости в пораженных разветвляющихся кровеносных сосудах, в основе которых лежит численное решение системы уравнений Навье-Стокса и уравнения неразрывности. Исследовано течение потока крови при наличии атеросклеротических бляшек в разветвлении. Получены распределения полей скоростей и давления для различных степеней стеноза и конфигураций и выполнена их визуализация.

На рис. 2 показано поле скорости и линии тока при начальном уровне развития стеноза. В областях прилегающих к внешним поверхностям развилки начинают формироваться отрывные зоны. С увеличением стеноза процесс вихреобразования происходит более интенсивно.

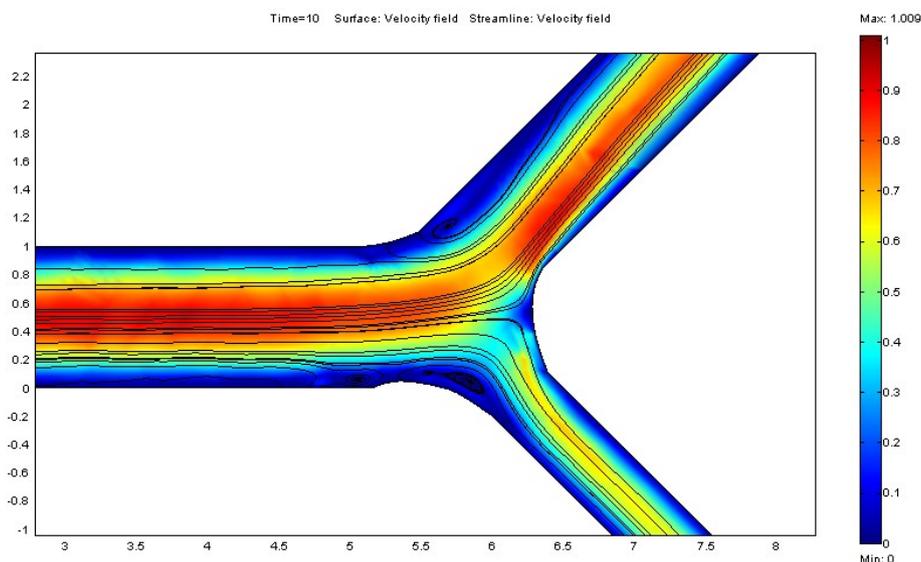


Рис. 2. Линии тока и поле скорости при небольшом уровне стеноза

На рис.3-4 представлены распределения скоростей и давления при увеличенном и большом уровнях стеноза.

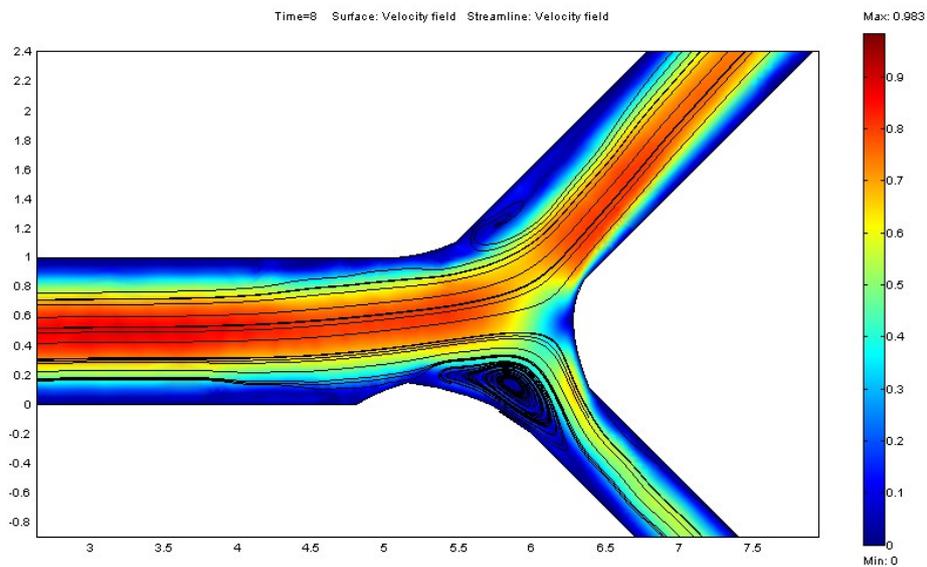


Рис. 3. Линии тока и поле скорости при увеличенном уровне стеноза

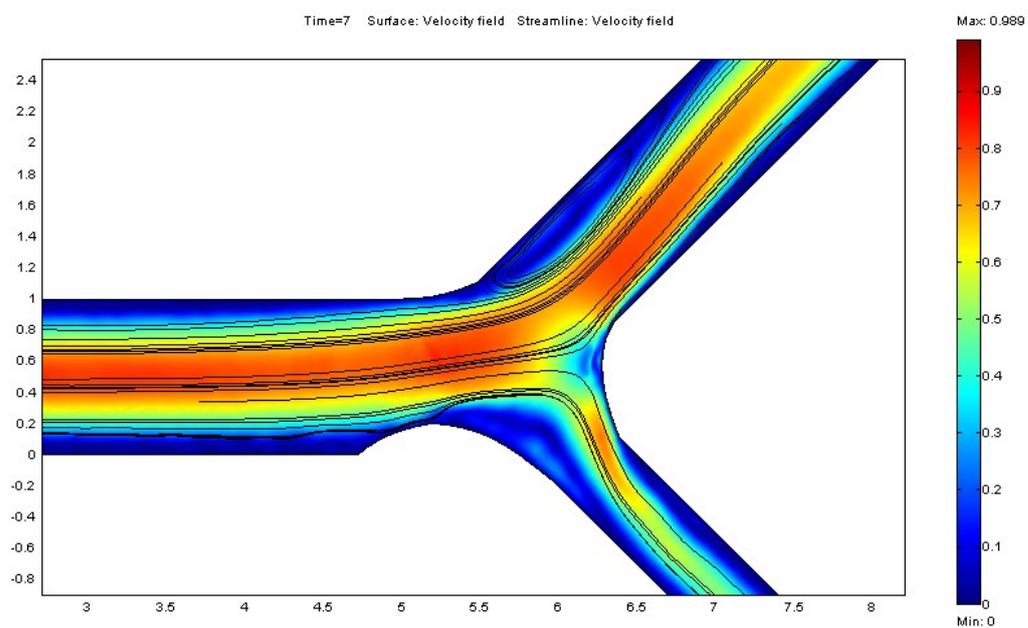


Рис. 4. Линии тока и поле скорости при большом уровне стеноза

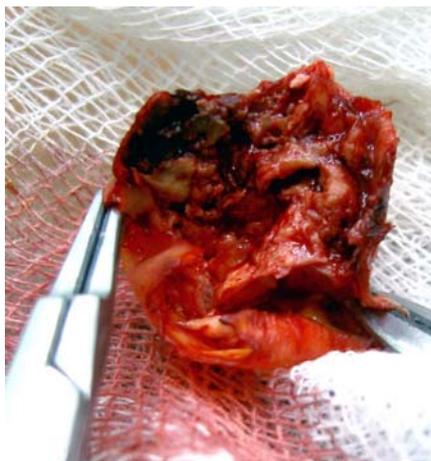


Рис. 5. Данные послеоперационного исследования

На рис.5 показан интраоперационный материал блокировки кровотока в пораженном сосуде. Из анализа расчетных данных видно, что с увеличением уровня стеноза значительно увеличивается отрывная зона в ветви непосредственно прилегающей к атеросклеротической бляшке. Как следствие этого уменьшается проходное сечение и локальное гидродинамическое сопротивление, в результате происходит блокировка кровотока в данной ветви. Кроме того, в верхней ветви тоже происходит увеличение отрывной зоны, хотя и не столь интенсивное, как в нижней. Это связано с тем, что изменяется угол входа потока в ветвь. Следовательно, возникновение стеноза приводит не только к блокировке кровотока в пораженной ветви, но и к ухудшению кровотока в смежном ответвлении.

#### ***Выводы.***

1. Сочетание ультразвуковых исследований и математического моделирования позволяет выставлять показания к оперативному лечению сонных артерий до развития острых неврологических событий.
2. Имеется четкая корреляция клинической картины и блокирования кровотока вычисленной математическими методами .

#### ***Литература***

1. Белов Ю.В., Базылев В.В., Степаненко А.Б. Отдаленные результаты хирургического лечения больных с асимптомным стенозом сонных артерий // Хирургия .-2002.-№. 5.-С/4-6.
2. Гуреш Т. Нема кого послати у Декрет!: Демографічна криза в Україні і в світі // Укр. слово. - 2000. - 18-24 трав. - С. 15.

3. Ballotta Enzo, Da Giau Giuseppe, , Piccoli ` Antonio, , Baracchini Claudio. Durability of carotid endarterectomy for treatment of symptomatic and asymptomatic stenoses ? //JVS.-2004.-V.40.-N.-2.-P.270-278
4. Ю.А.Скобцов, Н.В.Финошин, В.С.Оверко, Ю.В.Родин. Исследование течения потока крови в атеросклеротически стенозированном кровеносном сосуде//Труды института прикладной математики и механики НАН УкраиныДонецк:2003,том.8.-с.135-141.
5. Скобцов Ю.А., Родин Ю.В., Озерко В.С. Исследование и визуализация поведения потоков крови в ветвящихся сосудах// Вестник Херсонского национального технического университета.- Херсон:2006.-№1 (24).-с.50-54.
6. Каро, Педли и др. Механика кровообращения. М, Мир.-1981, 624 с.
7. Э. Ричардсон. Динамика реальных жидкостей. М.: Мир, 1965.-328 с.
8. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. М, Физматгиз, 1994.- 245 с.

Получено 01.06.07