

ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АРТЕРИОВЕНОЗНОЙ МАЛЬФОРМАЦИИ ГОЛОВНОГО МОЗГА

С.В. Головин^{1,2}, А.К. Хе^{1,2}, К.А. Гадьльшина²

¹*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 630090, Новосибирск*

²*Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск*

Артериовенозная мальформация (АВМ) является врожденной аномалией головного мозга, представляющей собой клубок сосудов, в котором происходит прямое шунтирование артериальной крови в венозную, минуя капиллярную систему. При наличии АВМ повышается риск кровоизлияния, особенно для людей в возрасте около 50 лет. Кроме того, АВМ нарушает нормальное кровообращение, что приводит к недостаточному обеспечению тканей необходимыми веществами. Одним из способов лечения АВМ является эмболизация – частичное или полное исключение АВМ из кровотока путем заклеивки сосудов мальформации специальным веществом. Целью работы является построение модели сосудов головного мозга с учетом капиллярной сети и анализ характерных зависимостей между давлением и скоростью потока в артериальном и венозном бассейнах до и после эмболизации.

Математическая модель. Сосудистая сеть венозного и артериального бассейнов моделируется в виде двух непересекающихся между собой (в здоровом организме) графов сосудов, на каждом сегменте которого выполнен закон сохранения массы. Вычисление числа Уомерсли [1] для характерных параметров исследуемых сосудов показывает возможность использования приближения Пуазейля для нахождения расхода жидкости в зависимости от перепада давления. Сечение сосудов считается неизменным во времени, однако, меняющемся вдоль сосуда. Стенки сосудов считаются проницаемыми, что моделирует отходящую от основного сосуда сеть более мелких сосудов, обеспечивающую переток крови в капиллярную сеть. При этом, скорость оттока крови из сосуда пропорциональна разности давлений на внутри сосуда и на его внешней стенке.

Капиллярная сеть в мозговой ткани представляется в виде порового пространства, удовлетворяющего закону Дарси. В качестве пористости используется объемная концентрация капилляров в единичном объеме мозговой ткани. Поскольку диаметр капилляров изменяется при прохождении пульсовой волны, считается, что пористость зависит линейно от давления жидкости. Градиент давления жидкости обеспечивает переток крови из артериальной сети в венозную сквозь поровое пространство, представляющее капиллярную сеть. Граничными условиями для давления являются условие непротекания на внешней границе и условие для скорости обмена жидкостью между капиллярной сетью и сосудами на внутренних границах – сосудах.

Метод решения. Задача решается численно методом конечных элементов. Для этого используется слабая формулировка задачи, позволяющая объединить в одно интегральное равенство уравнения и нелокальные условия на внутренних границах. Особенностью задачи является сочетание в одной слабой формулировке функций, определенных на разных пространствах: давлений крови в основной ткани мозга и давления крови в сосудах. Для численного решения задачи использовался свободный программный пакет FreeFEM++ [2]. При проведении расчетов использовалась сосудистая сеть, изображенная на Рис. 1. Левый граф сосудов соответствует артериальной сети, правый – венозной.

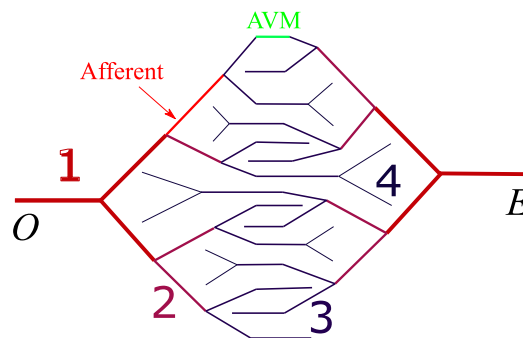


Рис. 1. Артериальная (слева) и венозная (справа) сети сосудов. Артериовенозная мальформация обозначена буквами AVM. Скорость потока и давление жидкости в сосуде вычисляются для афферента и на выходе в т. Е.

На входе в артериальную сеть в точке О задавался источник периодической интенсивности, а на выходе, в точке Е – периодическое давление. Графики двух периодов скорости и давления, приведенные на Рис. 2, соответствуют клиническим данным. Мальформация моделировалась в виде перемычки между артериальной и венозной сетями (обозначена буквами AVM на Рис. 1). Давление и скорость потока вычислялись в афференте (см. Рис. 1) и на выходе из венозной сети в точке Е.

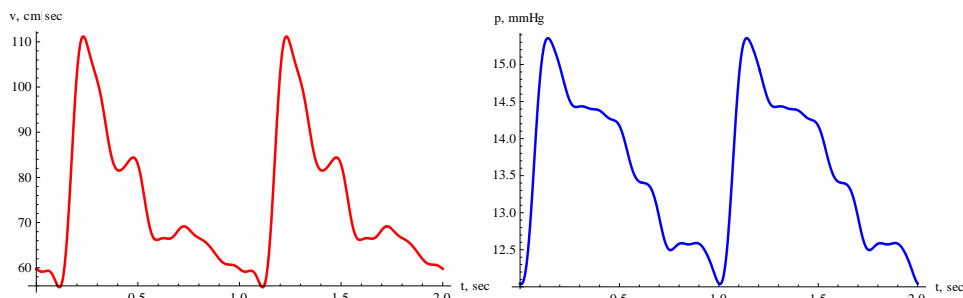


Рис. 2. Скорость на входе О в артериальную сеть (слева) и давление на выходе Е из венозной сети (справа).

Результаты вычислений. Измерения *in vivo* скорости и давления в сосудах головного мозга дают характерную VP-диаграмму, изображенную на Рис. 3 слева [2]. Особенности диаграммы являются: а) форма диаграммы в виде пера; б) движение точки по диаграмме во время пульсовой волны против часовой стрелки в артериальной сети и по часовой стрелке в венозной; в) дрейф диаграммы влево-вверх во время и после эмболизации.

На Рис. 3 справа приведены VP-диаграммы, полученные в результате расчета по предложенной модели. Видно, что все полученные диаграммы отражают все отмеченные экспериментальные факты: форма диаграммы, направление движения при прохождении пульсовой волны и дрейф диаграммы во время эмболизации. Таким образом, предложенная модель адекватно учитывает исследуемые особенности кровотока. Наличие мальформации уравнивает давление крови в артериальном и венозном бассейнах, что является потенциальной причиной разрыва сосудов. В качестве иллюстрации, на Рис. 5 показаны распределения давления в ткани головного мозга и в сети сосудов.

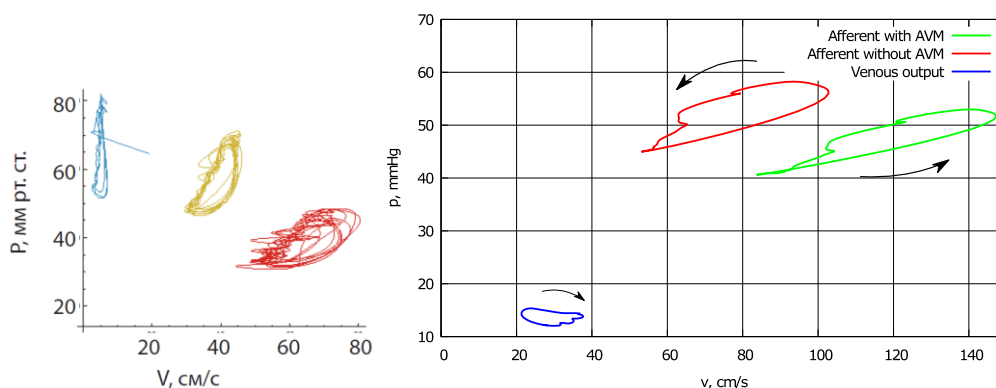


Рис. 3. VP-диаграммы, полученные путем измерения скорости и давления крови in vivo (слева) [2] и вычисленные при помощи предложенной модели (справа).

Предложенная модель позволяет проводить исследования различных конфигураций сосудов и мальформаций, рассчитывать давления крови в разных участках артериального и венозного бассейнов, варьировать сценарии эмболизации (порядок, скорость и степень заклейки сосудов) для выявления оптимальных сценариев эмболизации.

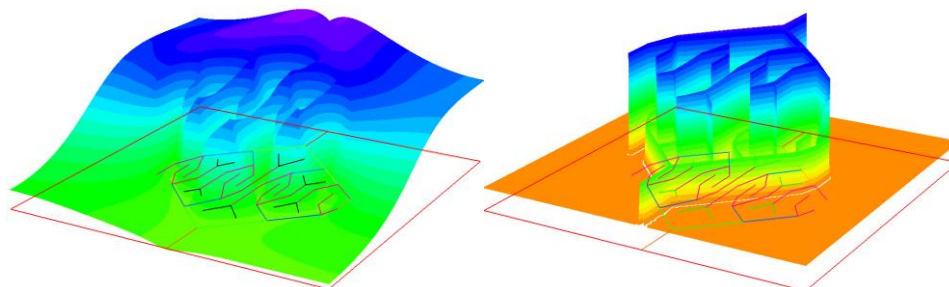


Рис. 4. Характерное давление жидкости в ткани головного мозга (слева) и на графах сосудов артериального и венозного бассейнов (справа).

Путем построения точных решений в виде элементарных волновых пакетов для простейшей задачи о взаимодействии одного полубесконечного сосуда с цилиндрической пористой средой показано, что сдвиг фазы между скоростью и давлением в такой системе обязательно имеется при всех конечных значениях параметров задачи.

Работа выполнена при частичном финансировании Президентского гранта поддержки ведущих научных школ НШ-2133.2014.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каро К., Педли Т., Шротер Р., Сид У. Механика кровообращения. М.: Мир.1981. 624 с.
2. Hecht F. New development in FreeFem++. // J. Numer. Math. 20 (2012), no. 3-4, 251–265. 65Y15
3. Чухахин А.П., Черевко А.А., Хе А.К., Телегина Н.Ю., Кривошапкин А.Л., Орлов К.Ю., Панарин В.А., Баранов В.И. Измерения и анализ церебральной гемодинамики у больных с сосудистыми мальформациями головного мозга // Патология кровообращения и кардиохирургия. 2012. № 4. С. 27–31.