

МОДЕЛЬ ГЕМОДИНАМИКИ СОСУДОВ ГОЛОВНОГО МОЗГА КАК МОДЕЛЬ МНОГОФАЗНОЙ СРЕДЫ

А.В. Михайлова¹, А.А. Черевко^{1,2}, А.П. Чупахин^{1,2}

¹ *Новосибирский государственный университет*

² *Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева
630090, Новосибирск, Российская Федерация*

Изучение гемодинамики сосудов головного мозга представляет большой интерес как с позиции теоретической гидродинамики, так и для практических медицинских приложений. Сосуды головного мозга образуют сложную, геометрически разветвленную сеть, лежащую в гелеобразном окружении мозговых тканей, помещенных в твердую оболочку черепа. Структура, вязко-упругие и прочностные свойства стенок артерий и вен различны, их соединения осуществляются через капиллярную сеть, пронизывающую весь объем мозга. Поток крови является нестационарным. Такая очень сложная гидродинамическая система работает с большой эффективностью и обеспечивает доставку кислорода и питательных веществ “с колес”, поскольку мозг не обладает собственными запасами (депо). Имеется большое число математических моделей, применяющихся для исследования тех или иных аспектов гемодинамики мозга. Представляется, что адекватная модель должна опираться на надежные экспериментальные данные кровотока в сосудах головного мозга и должна описывать динамику системы “нестационарный поток крови – упругие стенки сосуда – окружающая среда мозга” в целом. Такая система может эффективно моделироваться многофазной средой.

Построение и исследование такой модели ведется учеными ИГиЛ СО РАН совместно с медиками нейрохирургического отделения ННИИПК – клиники им. ак. Е. Н. Мешалкина. Основой этой работы является мониторинг кровотока в сосудах головного мозга во время реальных нейрохирургических операций, осуществляемых в ННИИПК с помощью аппарата Volcano Combo Map, с датчиком Combo Wire. Этот датчик измеряет давление и скорость крови во время операции. Полученные данные после обработки являются основой для построения моделей гемодинамики, выявления динамики кровотока в ходе операции, оптимизации сценариев проведения нейрохирургических операций.

Мониторинг кровотока во время нейрохирургической операции позволяет получать

массив экспериментальных данных (u_i, p_i) ($i = 1, \dots, N$) в различных точках сосудов, в различные моменты времени, в разных “фазовых состояниях” (при наличии аномалии и после ее излечения). Эти данные задаются периодическими функциями времени, поэтому для построения непосредственно по этим данным наиболее простой математической модели используется уравнение нелинейного осциллятора типа нагруженного уравнения Ван-дер Поля

$$\varepsilon \frac{d^2 q}{dt^2} + f(q) \frac{dq}{dt} + g(q) = k v(t) \quad (1)$$

Это уравнение описывает релаксационные колебания сложной многофазной системы (здесь ε - малый релаксационный параметр).

В уравнении (1) q и v – нормированные безразмерные значения давления и скоро-

сти, функции $f(q) = a_0 + a_1 q + a_2 q^2$, $g(q) = b_1 q + b_2 q^2 + b_3 q^3$ характеризуют соответственно демпфирование и упругие свойства многофазной системы “поток крови – стенка

сосуда – среда мозга”. Скорость $v(t)$ является в такой постановке управляющей функцией. Такое описание гемодинамики сосудов головного мозга является новым и обладает двумя очень важными достоинствами – основывается на прямых экспериментальных данных и описывает кровоток сложной многофазной системы мозга. Коэффициенты

(a_i, b_i) определяют свойства сосудистой системы индивидуального пациента и находятся на основе алгоритмов теории обратных и некорректных задач.

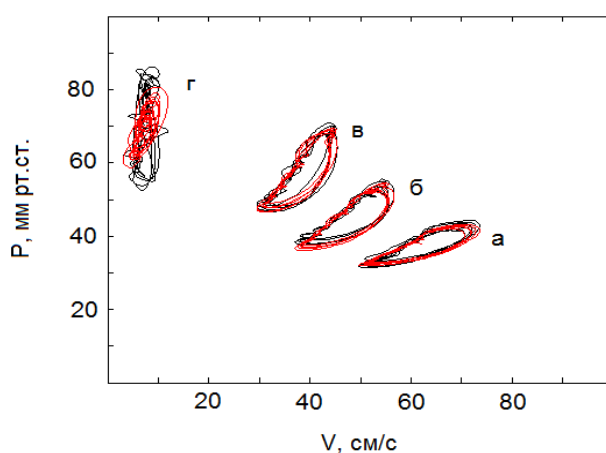


Рис. 1. Аппроксимация экспериментальных (черным) данных данными численных расчетов (красным) на основе уравнения (1).

В настоящее время получены следующие результаты:

1. На основе обработки экспериментальных данных около 20 нейрохирургических операций показано, что уравнение (1) адекватно описывает гемодинамику сосудов головного мозга и является устойчивым относительно вариаций параметров системы (Рис. 1).
2. Изменение демпфирующих $f(q)$ и упругих $g(q)$ характеристик системы адекватно описывает хирургический процесс (эмболизация, установка спиралей, стентов).

Полученные результаты являются новыми, доказывают адекватность и эффективность предложенной модели, основанной на рассмотрении сложной системы "поток крови - стенка сосуда - среда мозга" как многофазной среды и создают основу для практических медицинских приложений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 14-01-00036.