

Энергия гидроупругой системы и ее приложения¹ в церебральной гемодинамике

Маматюков М. Ю.¹, Паршин Д. В.², Хе А. К.², Чупахин А. П.²

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

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Система кровеносных сосудов головного мозга человека представляет собой сложную, геометрически разветвленную сеть сосудов различного калибра. Стенки артерий, имеющие многослойную структуру, являются упругими. Движение крови в них, инициируемое сокращениями сердца, является нестационарным. Описание движения крови в такой гидроупругой системе как в норме, так и при наличии сосудистых аномалий, является сложной задачей гидродинамики многофазных систем и математического моделирования. Эта задача актуальна для практической медицины в связи с большой распространенностью и опасностью сосудистых заболеваний.

В докладе ставится и исследуется задача о представлении энергии и ее вычисления для гидроупругих систем, моделирующих течение крови в сосудах головного мозга при наличии аномалий типа церебральных аневризм (ЦА). Такая аномалия представляет собой локальное раздутие стенки артерии, что снижает ее прочность и нарушает нормальный гемодинамический режим. Такое раздутие вызывает образование вихревого течения в сосуде, что влечет опасность образования тромба и закупорки сосуда. Образовавшаяся аномальная конфигурация гидроупругой системы, образованной кровеносным сосудом, аневризмой и потоком крови, требует повышенной, по сравнению со здоровой, энергии для обеспечения кровотока. Для медицины является очень актуальным вопрос прогноза риска разрыва аневризмы. На сегодняшний день не существует каких-либо доказательных признаков разрыва. Представляется, что адекватная оценка полной

энергии такой гидроупругой системы может служить полезным параметром при определении риска разрыва аневризмы.

В докладе представлены результаты 3D математического моделирования с использованием промышленного пакета ANSYS CFX различных параметров модельной конфигурации и сравнения расчетов с реальными клиническими данными. Рассмотрены конфигурации кровеносного сосуда с фузиформной аневризмой, представляющей собой расширение (балдж) сосуда на его изгибе. Рассмотрены конфигурации сосуда, различающиеся углом поворота сосуда, а также наличием вторичной аномалии (дивертикула), представляющей собой своеобразную вторичную аневризму меньших размеров, растущую из купола большей. Анализируется полная энергия такой системы, складывающаяся из энергии потока крови, упругой энергии стенки сосуда и энергии ее изгибания. Последняя вычисляется как интеграл по поверхности оболочки от квадрата средней кривизны этой поверхности, называется функционалом Уиллмора и интенсивно исследуется сегодня применительно к биологическим мембранам. В докладе представлены диаграммы, связывающие давление и скорость в потоке в гидроупругой системе. Впервые при численном моделировании получены диаграммы, совпадающие с наблюдаемыми в ходе внутрисосудистого мониторинга кровотока, проводимого авторами совместно с нейрохирургами Национального медицинского исследовательского центра им. ак. Е. Н. Мешалкина.

¹ При математическом моделировании были использованы результаты, полученные при реализации проектов РФФИ №№ 14-01-00036, 14-31-50956, 19-48-540010.