

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ЭМБОЛИЗАЦИИ АРТЕРИОВЕНОЗНОЙ МАЛЬФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Т.С. Гологуш¹, А.А. Черевко¹, И.А. Петренко², В.В. Остапенко¹

¹*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15*

²*Владимирский государственный университет,
600000, Россия, Владимир, ул. Горького, 87*

Артериовенозная церебральная мальформация (АВМ) является врожденной патологией развития сосудов головного мозга, при которой артериальное и венозное кровеносные русла соединены клубком беспорядочно переплетенных выродившихся сосудов. Это опасное заболевание, влияющее на функционирование головного мозга, при котором велик риск внутримозгового кровоизлияния. Наиболее предпочтительным методом лечения артериовенозных мальформаций является эмболизация - малоинвазивное хирургическое вмешательство, представляющее собой внутрисосудистое заполнение клубка патологических сосудов специальной эмболизирующей композицией. Данный метод лечения широко применяется, но не смотря на хорошо развитую технику операций по эмболизации, по-прежнему сохраняется риск интраоперационного разрыва сосудов. В связи с этим, моделирование процесса эмболизации АВМ является актуальной задачей.

Артериовенозная мальформация может адекватно моделироваться пористой средой в силу того, что она состоит из хаотического переплетения взаимопересекающихся выродившихся сосудов различных малых диаметров (до 0.01 см), осуществляющих шунтирование крови из артерии в вену. Процесс эмболизации описывается в этой модели введением в пористую среду, заполненной жидкостью (кровью), другой жидкости (эмболизирующей композицией), несмешивающейся с первой. Совместное течение в теле артериовенозной мальформации моделируется на основе одномерной модели двухфазной фильтрации, описываемое уравнением Баклея-Левретта. Поток крови, поступающий в АВМ, меняется с течением операции за счет перераспределения крови в соседние здоровые сосуды. Этот эффект в модели учитывается путем введения для течения крови дополнительного обходного сосуда с постоянным сопротивлением. Уравнение Баклея-Левретта решается численно с помощью новой модификации схемы Кабаре, обеспечивающей правильное описание распадов разрывов для уравнения с невыпуклой функцией потока [1].

В данной работе изучается оптимальный с точки зрения безопасности и эффективности сценарий эмболизации АВМ. Сформулирована задача оптимальной эмболизации с ограничениями, возникающими из медицинских показаний. Из медицинской практики известно, что АВМ малого размера следует максимально заполнять эмболизирующим веществом за одну операцию. Так как целью операции по эмболизации является прекращение кровотока через патологические сосуды, то в данной работе в качестве величины, минимизируемой в задаче оптимального управления, была выбрана доля сосудистого пространства АВМ, занятая кровью в конце операции. А в качестве управляющей функции был выбран режим подачи эмболизирующей композиции на вход в АВМ. Необходимо, управляя подачей эмболизирующей композиции на вход артериовенозной мальформации добиться эффективного и безопасного перекрытия кровотока через патологические сосуды. Для этого должны быть выполнены следующие ограничения: эмболизирующая

композиция не должна попасть в вену, давление в сосудах не должно превышать критического значения. Операция считается законченной при прекращении поступления эмболизирующей композиции на вход в АВМ. Для специального закона подачи эмболизата рассчитаны допустимые и оптимальные сценарии эмболизации. Выявлены способы допустимой и оптимальной эмболизации, снижающие риск разрыва сосудов АВМ.

При изучении задачи оптимальной эмболизации использовались функции Баклея-Левретта, построенные с помощью приближения клинических данных, полученных во время мониторинга гемодинамических параметров во время нейрохирургических операций в НМИЦ им. Мешалкина [2].

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства Российской Федерации №14.W03.31.0002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ostapenko V.V., Cherevko A.A.** Application of the CABARET scheme for calculation of discontinuous solutions of the scalar conservation law with nonconvex flux. // Dokl. Phys., Pleiades Publishing Ltd. 2017. Vol. 62. P. 470–474.
2. **Khe A.K., Cherevko A.A., Chupakhin A.P., Krivoschapkin A.L., Orlov K.Yu., Panarin V.A.** Monitoring of hemodynamics of brain vessels // J. App. Mech. Tech. Phys. 2017. Vol. 58. P. 763–770.