

ОТЗЫВ

официального оппонента Подопросветовой Анастасии Борисовны
на диссертацию Валовой Галины Сергеевны

«Исследование взаимодействия внутримозговых жидкостей на основе математической модели многожидкостной пороупругости», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Актуальность работы. Диссертационная работа Валовой Г.С. посвящена математическому моделированию совместного течения внутримозговых жидкостей (гемоликвородинамики) и их взаимодействию с тканью головного мозга. Гемоликвородинамика головного мозга относится к числу ключевых факторов его нормального функционирования, а ее нарушение лежит в основе многочисленных заболеваний нервной и сосудистой систем, которые занимают лидирующие позиции в мире по числу инвалидизации и смертности населения. Улучшение понимания взаимодействия ткани головного мозга и жидких сред центральной нервной системы в норме и при патологических нарушениях, например, при гидроцефалии, способствует ранней диагностике вышеперечисленных заболеваний. В связи с этим, актуальность диссертационной работы Валовой Г.С., целью которой является исследование зависимости решения математической модели многожидкостной пороупругой фильтрации на внутренней границе области от входящих в коэффициенты уравнений параметров модели, описывающих взаимодействие между жидкими средами головного мозга, не вызывает сомнений. Результаты работы могут в дальнейшем быть полезны в клинической практике неврологических патологий.

Обоснованность и достоверность результатов диссертации обусловлена применением известных математических методов и представительной серией численных экспериментов. Корректность результатов математического моделирования подтверждается проделанной проверкой численных алгоритмов на сходимость при измельчении конечно-элементных сеток. Достоверность регрессионной модели подтверждается удовлетворением условиям теоремы Гаусса-Маркова и анализом на отсутствие влиятельных наблюдений.

Новизна научных результатов, полученных Валовой Г.С., также не вызывает сомнений, поскольку задача многожидкостной пороупругости рассматривалась с учетом экспериментальной геометрии, основанной на МРТ данных сагиттального среза головного мозга. Наиболее существенным новым результатом является приближенная формула, которая позволяет установить связь между параметрами взаимодействия поровых жидкостей и величиной среднего смещения внутренней границы области. На основе полученной формулы был выявлен характер влияния параметров взаимодействия поровых жидкостей, найдены величины коэффициентов взаимодействия поровых жидкостей, которые соответствуют клинической картине неврологических патологий.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 104 страницы с 24 рисунками и 6 таблицами, список литературы содержит 123 наименования.

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, отмечается новизна полученных результатов, описана их теоретическая и практическая значимость, перечислены публикации по теме диссертации с указанием личного вклада автора.

В **первой главе** приведен обширный обзор наиболее распространенных актуальных методов и подходов для изучения взаимодействия внутричерепной гемодинамики и вещества головного мозга в норме и при различных патологических процессах.

Вторая глава состоит из 4-х разделов. Первый раздел посвящен общей постановке задачи. Рассматривается задача многожидкостной пороупругой фильтрации в ограниченной области с заданными внутренней и внешней границами. Поровыми жидкостями являются артериальная, капиллярная, венозная кровь и цереброспинальная жидкость. Таким образом, математическая модель содержит уравнения для перемещения и давления четырех поровых жидкостей. Исходя из физиологии ставится краевая задача с условиями на внешней и внутренней границах области. Второй раздел данной главы содержит физиологическую интерпретацию математической модели. В третьем разделе пороупругая ткань головного мозга моделируется между двумя концентрическими окружностями, представляющими череп и церебральные желудочки. В таком случае система уравнений модели представляет собой систему обыкновенных

дифференциальных уравнений. Результаты данного раздела позволяют использовать полученные оценки параметров, обеспечивающих нормальные физиологические величины, в случае более сложной геометрии. В четвертом разделе исследование решения математической модели на внутренней границе области от параметров взаимодействия поровых жидкостей рассмотрено в случае геометрии, которая представляет собой сагиттальный срез головного мозга, полученный по данным МРТ. Итоговая краевая задача была решена методом конечных элементов. В работе показана сходимость численного метода, исследована зависимость решения рассматриваемой задачи от количества элементов расчетной сетки. В завершение раздела проводится анализ локализации максимального смещения внутренней границы области в зависимости от величины среднего смещения: место максимального смещения внутренней границы может располагаться только в одной из трех локальных зон.

Третья глава посвящена исследованию количественной зависимости среднего смещения внутренней границы от параметров взаимодействия поровых жидкостей с помощью регрессионного анализа. В первом разделе описан используемый статистический аппарат и способ построения приближенной формулы, которая позволяет установить связь между параметрами взаимодействия поровых жидкостей и величиной среднего смещения внутренней границы области. Во втором разделе приведен анализ коэффициентов регрессии, а в третьем – интерпретация регрессионной модели с точки зрения нескольких патологических состояний. В четвертом разделе приведены общие выводы для третьей главы.

В **заключении** приведены основные результаты работы и сформулированы выводы.

Все основные результаты диссертации опубликованы в 4-х статьях в ведущих изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК, а также в изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus. Материалы исследования докладывались на многочисленных конференциях и семинарах.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации и её основные результаты.

Замечания по диссертационной работе:

1. При выборе стационарной математической модели многожидкостной пороупругой фильтрации автор не дает обоснования возможности пренебрежения рядом параметров: сжимаемость артериальных и венозных сосудов, которые оказывают большое влияние при таком рассматриваемом в диссертационной работе приложении, как гидроцефалия. При этом учитывается сжимаемость мозгового вещества, которая пренебрежимо мала.
2. При рассмотрении физиологической интерпретации граничные условия ставятся на границе желудочков головного мозга и на границе черепа. Автор не дает объяснения отсутствия учета субарахноидального пространства между желудочками и черепом, а также возможного влияния на полученные результаты при его учете.
3. Для анализа зависимости решения краевой задачи параметры, определяющие взаимодействие поровых жидкостей, изменялись на восемь порядков. Вероятно, оценка влияния различных факторов позволила бы сократить количество вычислений.

Вместе с тем, указанные замечания не снижают положительного впечатления от работы и не ставят под сомнение достоверность полученных в работе результатов, а рассмотренная модель с предложенными допущениями может быть рассмотрена в качестве первого приближения к дальнейшим исследованиям.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, которая выполнена на высоком уровне и содержит новые результаты в области механики жидкости, газа и плазмы, имеющие прикладное значение.

Заключение. Диссертация «Исследование взаимодействия внутримозговых жидкостей на основе математической модели многожидкостной пороупругости» удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, соответствует требованиям «Положения о порядке присуждении ученых степеней», а ее автор, Валова Галина Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени

кандидата физико-математических наук по научной специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Я, Подопросветова Анастасия Борисовна, согласна на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Валовой Галины Сергеевны, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент



Подопросветова А.Б.

Кандидат физико-математических наук, специальность ВАК 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», научный сотрудник лаборатории экспериментальной гидродинамики НИИ Механики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Адрес: 119192, г. Москва, Мичуринский проспект, 1

Телефон: +7-495-939-31-21

e-mail: poroshina_ab@mail.ru

Подпись к.ф.-м.н. Подопросветовой А.Б. заверяю

Ученый секретарь НИИ Механики МГУ



Рязанцева М.Ю.

29 . 08 . 2022 г.