

## ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ГЕМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРЕПОДАВАНИИ МЕДИЦИНСКОЙ И БИОЛОГИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

**Мансуров В.А., Гольцев М.В., Рагунович Л.Д.**

Учреждение образования «Белорусский государственный медицинский университет»

Минск, Республика Беларусь

*E-mail:* mansurov.valeryxx@mail.ru

*Аннотация:* работа посвящается опыту применения трехмерных численных моделей гемодинамических процессов и их визуализации при преподавании медицинской и биологической физики. Проведена проверка качества обучения с использованием разработанных численных модели гемодинамики элементов сосудистой системы. Показано, что средняя оценка студентов, полученных на экзамене, существенно отличалась в лучшую от средней оценки студентов, которые обучались с использованием численных моделей.

*Ключевые слова:* трехмерные численные модели, гемодинамика, визуализация, преподавание, медицинская и биологическая физика.

## APPLICATION OF NUMERICAL MODELS OF HEMODYNAMIC PROCESSES IN THE TEACHING OF MEDICAL AND BIOLOGICAL PHYSICS

**Mansurov V.A., Goltsev M.V., Ragunovich L.D.**

*Educational institution "Belarusian State Medical University"*

*Minsk, Republic of Belarus*

*E-mail:* mansurov.valeryxx@mail.ru

*Abstract.* The work is devoted to the experience of using three-dimensional numerical models of hemodynamic processes and their visualization in the medical and biological physics teaching. The quality of training was checked using the developed numerical models of hemodynamics of vascular system elements. It was shown that the average grade of students received on the exam differed significantly for the better from the average grade of students who were trained using numerical models.

*Keywords:* 3D numerical models, hemodynamics, visualization, teaching, medical and biological physics.

Использование в медицинском образовании информационных образовательных технологий позволяет за счёт применения современных компьютерных средств и использования трехмерных математических моделей гемодинамических процессов осуществлять обучение специалистов на

качественно более высоком уровне, облегчить восприятие материала при самоподготовке специалистов.

Постижение гемодинамических процессов, определяющих движения крови в сосудистом русле, представляет значительную трудность при моделировании, поскольку эти процессы зависят от многих факторов, которые находятся в неразрывной связи – это: реологические свойства крови; механика сердечного сокращения; упругие свойства стенок различных сегментов сосудов; артериальное и венозное давление; механизмы управления гемодинамикой, её адаптивной регуляцией. Поэтому создание реалистичных численных моделей гемодинамики, которые будут служить основой для эффективного, реалистичного взаимодействия пользователей с объектами и средой моделирования на основе программно-аппаратных решений является актуальной задачей. Не менее важной проблемой является применение полученных моделей в целях прогноза динамики медико-биологических процессов и в учебном процессе подготовки специалистов в области медицины.

Основная задача данной работы – оценить влияние разработанных численных моделей на качество обучения студентов с использованием разработанных численных моделей гемодинамики элементов сосудистой системы с использованием разработанных численных моделей гемодинамики.

Целостная картина профессиональной деятельности создается через синтез в сознании обучающегося огромного объёма абстрактной теоретической информации из содержания множества учебных предметов. Научить использовать знания в реальной действительности можно путем реализации компетентного подхода в образовании, который позволяет обучить специалистов необходимым знаниям, сформировать у них умения и навыки, способность самостоятельно решать нетипичные проблемы в активных обучающих упражнениях [1].

Понятия «модель» и «моделирование» в педагогическом контексте стало активно применяться в последние десятилетия, однако уже русские педагоги В.П. Вахтеров, Б.Е. Райков, К.Д. Ушинский выделяли и пропагандировали модели в качестве наглядных средств обучения. Во второй половине 20 века исследования В.В. Давыдова и Д.Б. Эльконина убедительно продемонстрировали, что работа с моделями изучаемых понятий способствует успешному их усвоению учащимися. Авторы первыми поставили вопрос о том, что моделирование может являться всеобщим принципом усвоения знаний в системе начального образования. В частности, Д.Б. Эльconiным при проведении экспериментов по моделированию ребенком звукового строения слова было показано, что «благодаря построению моделей очень интенсифицируется овладение теми сторонами действительности, которые выражены и воссозданы в модели» [2].

Под учебной моделью в дидактике понимают средство обучения, которое используется в процессе обучения для замещения объекта изучения и дальнейшего переноса полученной с их помощью информации на «прототип», «оригинал». Важную роль в этих процессах играет визуальное представление изучаемой численной (абстрактной) модели – визуализация этих моделей и процессов в ней происходящих на экране. Для достижения поставленной цели

были разработаны и апробированы в учебном процессе несколько типов численных моделей как стационарных, так и динамических процессов.

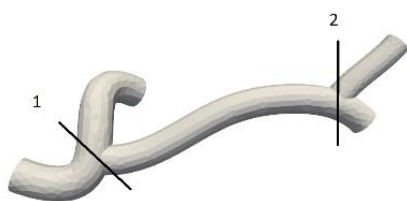
Для трехмерного моделирования использовался численный конечно-разностный расчет полей скоростей течения, распределения давления, деформации и напряжения сосудистой стенки и градиента скорости на стенке сосуда с учетом взаимодействия упругой стенки и жидкой среды при различных начальных и граничных условиях [3].

Для визуализации указанных параметров в учебном процессе использовался программный пакет ParaView– открытый графический кроссплатформенный пакет для интерактивной визуализации в исследовательских целях, разрабатываемый Национальной Лабораторией Сандиа, компанией Kitware и Национальной Лабораторией Лос-Аламоса. Этот пакет имеет оптимизированный интерфейс, который обеспечивает построение трехмерных фигур. Пакет ParaView предоставляет пользователю возможности интерактивной визуализации и исследования больших массивов данных для качественного и количественного анализа [4].

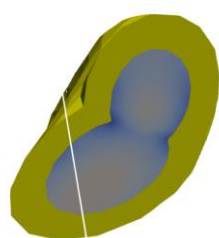
Примеры численных результатов численного моделирования гемодинамики, разработанных на кафедре медицинской и биологической физики и включенных в учебный процесс, показаны на нижеследующих рисунках, на которых изображены примеры течения и деформации стенки сосуда в стационарных условиях распределения скоростей течения в разных сечениях и в динамических условиях при распространении пульсовой волны. Все отрезки сосудов соответствуют анатомическим образцам. Рассматриваются различные типы геометрии: прямой сосуд, искривленный сосуд, одиночная бифуркация, искривленный сосуд с двумя бифуркациями, а также картина течения и деформация стенки сосуда для различных сечений рассматриваемых сосудов.



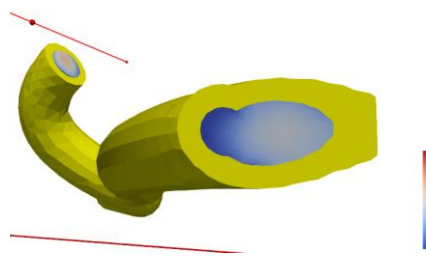
## Сечения



Часть Виллизевого круга. 1 и 2  
расположение сечений

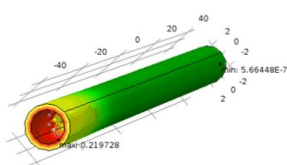


Скорость течения для 1

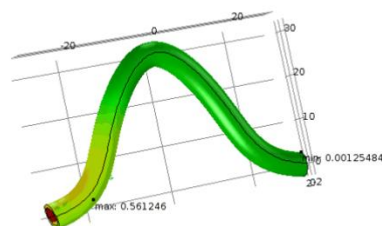


Скорость течения для 2

## Динамика



Пульсовая волна прямой



Пульсовая волна сосудистой петле

Проверка качества обучения с использованием разработанных численных моделей гемодинамики проводилась на факультативных занятиях по дисциплине «Механика кровообращения», согласно учебной программе учреждения образования, разработанной в соответствии с образовательным стандартом высшего образования по специальностям 7-07-0911 01 «Лечебное дело»; 7-07-0912 01 «Фармация».

При обучении использовались элементы созданных математических моделей при объяснении законов гемодинамики в сложных геометриях и наличии патологий сосудистого русла. Для исследований были произвольно выбраны 4 группы лечебного и 4 группы фармацевтического факультетов 1 курса БГМУ. 2 группы изучали медицинскую и биологическую физику с помощью традиционной методики и 2 группы (всего 52 студента) использовали при обучении разработанные численные модели гемодинамики и визуализацию с их помощью гемодинамических процессов.

Результаты экзаменационного контроля посредством сравнения средних экзаменационных оценок и доверительного интервала, и U-критерия Манна-Уитни показали положительное влияние на успеваемость студентов. Средняя оценка студентов, полученных на экзамене, существенно отличалась от средней оценки студентов, которые обучались по дисциплине «Механика кровообращения». Уровень значимости U-критерия показал, что имеется однозначная связь между успеваемостью студентов, которые проходили обучение традиционными методами и методами с использованием результатов математического моделирования ( $U = 135$  при интервале значимости 210–247) (рисунки 1, 2). На рисунках: левый столбец - средняя оценка за экзамен студентов без использования указанных визуализаций при преподавании медицинской и

биологической физики, правый столбец - с использованием указанных визуализаций.

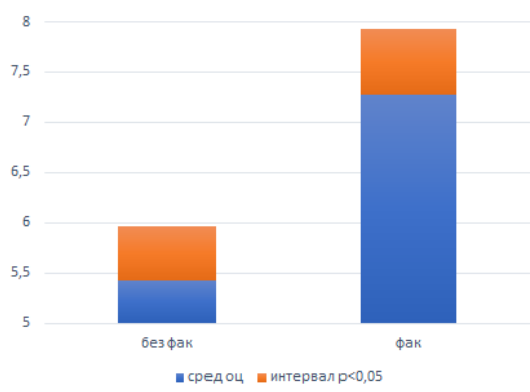


Рисунок 1 – средняя оценка за экзамен на лечебном факультете.

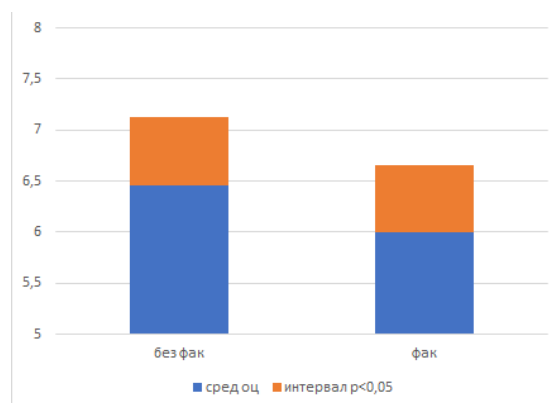


Рисунок 2 – средняя оценка за экзамен на фармацевтическом факультете.

Различия между оценками по факультетам можно объяснить тем, что гемодинамика на фармацевтическом факультете не является профилирующей дисциплиной, в связи с чем студенты относятся с некоторым пренебрежением к изучению этого предмета в отличие от студентов лечебного факультета, которым придётся применять полученные знания при изучении других теоретических дисциплин таких как, например, физиология человека.

В заключение укажем, что применение полученных моделей в учебном процессе позволяет организовать деятельность учеников, направленную на поиск реальных объектов, ситуаций, что позволяет создать целостную картину профессиональной деятельности и научиться использовать знания в реальной действительности путем реализации компетентного подхода. Проверка качества обучения показала, что средняя оценка студентов, полученных на экзамене, существенно отличалась в лучшую сторону от средней оценки студентов, которые обучались с использованием численных моделей.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Конвергенция 2025», задание 3.04.2 «Построение и верификация компьютерных моделей медико-биологических объектов и процессов, исследование их поведения в спроектированных средах на базе технологий виртуальной и дополненной реальности».

#### Список литературы

1. Кустицкая, Т.А. Прогнозирование успешности обучения: проблемы и задачи / Т.А. Кустицкая, М.В. Носков, Ю.В. Вайнштейн // Наука и школа. – 2023. – № 4. – С. 71–83.
2. Эльконин, Д.Б. Избранные психологические труды / под ред. В. В. Давыдов. – Москва: Педагогика, 1989. – 554 с.
3. Fluid-structure interaction: modelling, simulation, optimization: Lecture notes in computational science and engineering. Fluid-structure interaction / H.-J. Bungartz, M. Schäfer. – Berlin; New York: Springer-Verlag, 2006. – № 53. – 385 p.
4. ParaView – Open-source, multi-platform data analysis and visualization application. – URL: <https://paraview.org> (date of access: 14.12.2024).