

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОМЫВКИ ГЛАЗА ПРИ ХИРУРГИИ КАТАРАКТЫ

К.Г. Вачнадзе<sup>1,2</sup>; А.С.Шишаева<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Московский физико-технический институт (государственный университет), Москва, Россия*  
<sup>2</sup> *ООО «Тесис», Москва, Россия*

## 1. Введение

Катаракта – помутнение хрусталика глаза. Одним из современных радикальных методов лечения катаракты является лечение с помощью хирургического вмешательства методом факоемульсификации (ФЭК) [1]. Метод ФЭК заключается в механическом дроблении хрусталика с помощью специальных инструментов, вводимых в переднюю камеру глаза через малые разрезы, и удалении полученных фрагментов вместе с внутриглазной жидкостью путём её аспирации. Одновременно осуществляется подача замещающей жидкости во избежание коллапса передней камеры под действием разряжения. Существуют два альтернативных метода ФЭК: коаксиальная и бимануальная. При коаксиальной ФЭК дробление, аспирация и ирригация осуществляются одним прибором, состоящим из двух коаксиальных трубок. При бимануальной ФЭК используются аспирационный и ирригационный приборы, которые в процессе операции разносятся на некоторое расстояние и располагаются под углом друг к другу.

В хирургии катаракты существует ряд гидродинамических задач. Одна из них – уменьшение травмирующего гидродинамического воздействия на ткани глаза. Травма может вызываться повышенным давлением жидкости, трением на поверхности роговицы, коллапсом передней камеры глаза вследствие большого перепада внешнего и внутреннего давления.

Данная работа посвящена моделированию этапа промывки глаза в нескольких задачах: во время операции по лечению катаракты методом бимануальной ФЭК и по лечению катаракты методом коаксиальной ФЭК. В последней задаче рассмотрен также случай с имплантированной ранее факичной интраокулярной линзой (ФИОЛ). Цель работы – уменьшение вероятности травмирования глаза в центральной области роговицы путём оптимизации положений хирургических инструментов, сравнение полученных результатов в различных методиках операции.

## 2. Постановка задачи

В данной работе использовался программный комплекс [FlowVision HPC](#) [2], с помощью которого моделировалось ламинарное течение ирригационной жидкости. Ирригационная жидкость рассматривается как несжимаемая вязкая среда, находящаяся в условиях стационарного течения. Рассматривалась одна фаза – ирригационная жидкость с параметрами плотности  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$  и вязкости  $\nu = 0.014 \text{ Па} \cdot \text{с}$  [3].

Определим число Рейнольдса, чтоб проверить, не является ли течение турбулентным:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot L \cdot V}{\nu}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $V$  – скорость течения,  $\nu$  – коэффициент динамической вязкости,  $L$  – характерный размер. В случае истечения ирригационной жидкости,  $L$  – диаметр трубки, который может достигать до 3 мм. Тогда по формуле (1) имеем, что число Рейнольдса не превышает 90, что меньше критического значения  $\text{Re} = 2300$ , свойственного течением в трубах. Следовательно, ирригационный поток жидкости является ламинарным. В случае течений эмульсии в операционном поле, значение  $L$  имеет значение порядка 10 мм, тогда из формулы (1)  $\text{Re} = 300$ , что тоже далеко от порогового значения. Следовательно, в нашей задаче мы имеем дело только с ламинарными потоками жидкости.

В качестве модели будем использовать дифференциальные уравнения Навье-Стокса, которые описывают гидродинамику исследуемых потоков. Они будут решаться численными методами, с учётом имеющихся граничных условий. В результате будут определены искомые параметры течения (давление, скорость) в различных точках исследуемой области.

### 2.1. Расстановка начальных и граничных условий

В методе бимануальной ФЭК используются ирригационный и аспирационный хирургические инструменты. На поверхности передней камеры, хрусталика, хирургических инструментов устанавливается тип границы «стенка» с граничным условием для скорости «прилипание» (т.е. равной нулю). На торцевой поверхности ирригационного прибора задаётся относительное давление 0 Па (отсчитывается от абсолютного давления, равного 101000 Па). На торцевой поверхности аспирационного прибора устанавливается скорость откачки 0.4 м/с.

В методе коаксиальной ФЭК используется хирургический инструмент с коаксиальным наконечником, в котором совмещены функции аспирации и ирригации жидкости. Постановка граничных и начальных условий задачи не отличается от метода бимануальной ФЭК.

В методе коаксиальной ФЭК под ФИОЛ рассматривается операция промывки глаза методом коаксиальной ФЭК на глазу, с ранее имплантированной искусственной линзой. Постановка граничных и начальных условий не отличается от предыдущих случаев.

### 3. Результаты моделирования

Расчётная сетка, используемая во Flowvision HPC, является ортогональной и адаптивно локально измельчённой. В данной работе генерировалась определённая начальная сетка, которая затем адаптировалась в местах высоких градиентов переменных. Было проведено исследование сходимости по сетке. Рассматривались адаптации различных уровней и с различным числом слоёв. В качестве критерия сходимости по сетке было использовано усреднённое давление в центральной области роговицы. Количество расчётных ячеек оказалось равным 123877, 188882 и 155149 в методах бимануальной ФЭК, коаксиальной ФЭК и коаксиальной ФЭК под ФИОЛ соответственно.

#### 3.1. Метод бимануальной факоемульсификации

Было проведено моделирование течения при варьировании различных параметров конфигурации приборов: углов перпендикулярных плоскости радужной оболочки глаза, углов параллельных плоскости радужки и глубины проникновения инструментов. Рассматривались 9 различных ситуаций, из которых были выделены наилучшие и наихудшие положения. В качестве критерия для выбора использовались давление на центральной поверхности роговицы (относительно давления на входе жидкости ирригационного прибора) и средняя скорость потока в центральной области роговицы (мера силы трения на роговице). Наилучший результат был получен, когда приборы располагались симметрично и были направлены в центр хрусталика. Наихудшие результаты были получены, когда инструменты располагались под небольшим углом друг к другу и имели различную глубину проникновения. Для дальнейшей оптимизации выбраны два параметра. Первый параметр – угол  $\alpha$  в плоскости, перпендикулярной плоскости радужки. По нему оба инструмента будут симметрично двигаться в определённых пределах. Второй параметр – угол  $\beta$  в плоскости, параллельной плоскости радужки. Он будет зафиксирован у ирригационного прибора, а у аспирационного – варьироваться в заданных пределах (рис. 1).

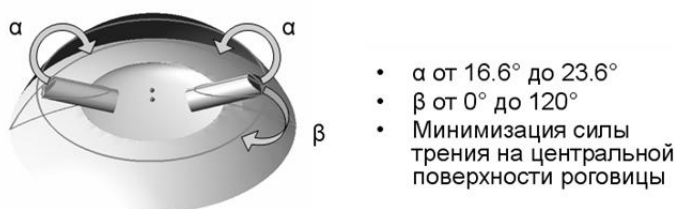


Рис.1. Параметры для оптимизации

#### 3.2. Метод коаксиальной факоемульсификации

Было проведено моделирование течения при варьировании глубины проникновения коаксиального прибора. Было рассмотрено 5 различных положений инструмента. Отслеживалась средняя скорость потоков жидкости в центральной области роговицы и давления в центральной области роговицы (относительно давления на входе жидкости ирригационного прибора). Было установлено, что при уменьшении глубины проникновения инструмента, силы трения на роговицу со стороны жидкости линейно растут, а перепад давлений в глазу резко увеличивается при минимальной глубине проникновения.

#### 3.3. Оптимизация положения приборов в методе бимануальной факоемульсификации

С помощью программного комплекса IOSO NM [4] была проведена оптимизация положений приборов в методе бимануальной ФЭК по выбранным параметрам  $\alpha$  и  $\beta$ . Было рассмотрено около 100 различных вариантов и выделен наилучший с точки зрения минимальной средней скорости потоков жидкости в центральной области роговицы (минимальной силы трения). Минимальная скорость оказалась равной 0,0032 м/с при следующих углах:  $\alpha = 23^\circ$ ,  $\beta = 3.4^\circ$  (рис. 2).

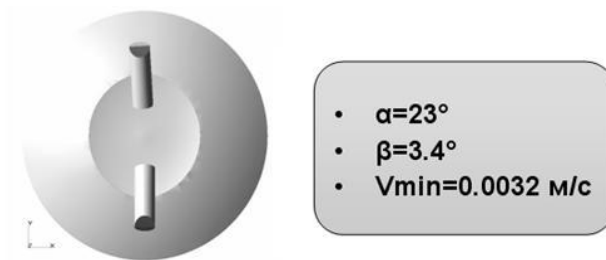


Рис.2. Результаты оптимизации

#### 4. Заключение

В данной работе было проведено трехмерное численное моделирование операции ФЭК процедуры промывки глаза при удалении катаракты. Были найдены оптимальные положения инструментов при бимануальной и коаксиальной ФЭК, при которых сила трения на центральной поверхности роговицы минимальна. Также было успешно проведено моделирование промывки передней полости глаза в ходе операции коаксиальной ФЭК катаракты при ФИОЛ.

Результаты этой работы были доложены в МНТК Микрохирургии глаза им Федорова и получили положительный отзыв. В дальнейшем планируется продолжать работу исследованием операции ФЭК катаракты в глазу, перенесшем тотальную витрэктомию (с удалённым стекловидным телом), учитывая деформации тканей глаза вследствие течений жидкости при промывке.

#### Литература

1. Зими́на Т.Ю., Спи́рочкин Ю.К., Плетне́в И.В., Труби́лин В.Н. О решении гидродинамических проблем в хирургии катаракты // Сборник трудов конференции «Биомеханика глаза» - 2005 - Т.5 - С.179-186.
2. FlowVision HPC. Руководство пользователя, Версия 3.06 – 2007.
3. Малюгин Б.Э. Медико-технологическая система хирургической реабилитации пациентов с катарактой на основе ультразвуковой факоемульсификации с имплантацией интраокулярной линзы // Диссертация на соискание учёной степени докт. мед. наук. – М.: ГУ МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Фёдорова. 2002.
4. Справка IOSO NM, Версия 1.1. – 2008.