

Эффективный метод математического моделирования клинических процедур для определения механических характеристик глаза

¹Г. А. Любимов, ²И. Н. Моисеева, ³А. А. Штейн

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова

¹GA_Lubimov@bk.ru

²moiseeva.ir@yandex.ru

³stein.msu@bk.ru

Глаз представляет собой сложную механическую систему, включающую различные ткани и жидкости. Для решения многих задач глазное яблоко может быть схематично представлено деформируемой оболочкой, состоящей из роговицы и склеры и распираемой изнутри давлением заключенной в ней жидкости. Внутриглазное давление оказывает существенное влияние на протекающие в глазу процессы, и его оценка имеет большое значение для диагностики. В клинике внутриглазное давление оценивается косвенно на основании различных методов тонометрии, базирующихся на измерении упругого отклика глазной оболочки, обычно роговицы, на внешние воздействия. Упругие свойства глазных тканей демонстрируют существенную пространственную неоднородность и анизотропию, и их точное определение в опыте затруднительно. Кроме того, они существенно различаются для разных индивидуумов, что делает осредненные данные малоприменимыми для корректной интерпретации клинических измерений. Поэтому требующие задания множества параметров громоздкие численные расчеты не дают эффективного решения практических задач.

Многие задачи механики глаза, включая задачи тонометрии, рассматривают процессы, в основном разыгрывающиеся в области роговицы, тогда как склеральная область вовлечена в них лишь через перераспределение внутриглазной жидкости. Кроме того, данные экспериментов и анализ структуры роговицы дают основание предполагать, что она слабо сопротивляется изгибу. В соответствии с этим нами разработана максимально упрощенная модель, в которой роговица представлена безмоментной (мягкой) упругой поверхностью, а склеральная область заменяется упругим элементом, откликающимся изменением объема на изменение давления. Если считать роговицу линейно упругой и по упругим

свойствам пространственно однородной и изотропной, такая модель характеризуется лишь тремя упругими константами. Речь идет, конечно, лишь о свойствах роговицы как поверхности: третье измерение в модели отсутствует. В задачах с нагружением, не слишком отклоняющимся от изотропного, основных определяющих констант оказывается еще меньше: две.

Простота модели позволяет эффективно ставить и решать задачу об определении в клинических испытаниях как истинного внутриглазного давления (т.е. давления в не нагруженном извне глазу), так и индивидуальных упругих характеристик, которые, как показывают клинические исследования, имеют самостоятельную диагностическую ценность. Замена трехмерного тела поверхностью делает метод не применимым к задачам, характерный масштаб которых сопоставим с толщиной роговицы, что имеет место, например при популярном методе тонометрии по Гольдману.

Зависимости, рассчитанные на основе предложенной модели, хорошо согласуются с осредненными по множеству глаз эмпирическими зависимостями, полученными в результате исследований, направленных на тарировку тонометров Маклакова (нагружение плоским тяжелым штампом) и Шиотца (нагружение тонким стержнем роговицы, предварительно нагруженной вогнутым штампом). Вместе с тем, они существенно меняются при значительном отклонении упругих констант от средних значений.

Показано, что надежная оценка истинного внутриглазного давления и индивидуальных упругих констант с помощью статических тонометров одного типа (хотя бы и с разными нагружающими весами) невозможна, что связано с близостью зависимости давления от веса груза к линейной функции. Для этого необходимо использование комбинации тонометров, осуществляющих нагружение существенно различным образом, например, плоского и сильно выпуклого штампов или плоского штампа и тонометра Шиотца.

Первоначально при расчетах мы считали роговицу линейно упругой, изотропной в тангенциальном направлении и пространственно однородной, а склеральный элемент линейно упругим. В большинстве случаев такое приближение достаточно для описания статической тонометрии. Между тем, применяемый метод позволяет отказываться от частных допущений по мере необходимости в соответствии с решаемой задачей при сохранении общего

подхода. В числе возможных обобщений: учет нелинейности упругого поведения (при большом внутриглазном давлении); быстрой фойгтовской и медленной максвелловской вязкоупругости (для изучения нестационарного нагружения измерительными устройствами и длительных перестроечных процессов соответственно); пространственной неоднородности роговицы (как в норме, так и возникающей в результате хирургического воздействия).

Работа поддержана РФФИ (проект № 17-01-00380).

Напряжения и деформации в растущей диффузионной зоне при пайке стекла со сталью

О. Н. Любимова, А. В. Морковин

Дальневосточный федеральный университет

berms@mail.ru

В работе предлагается к рассмотрению моделирование технологических процессов изготовления слоистого композиционного материала — стеклометаллокомпозита на основе стекла и стали [1,2]. Не смотря на то, что этот материал является спаем сжатия, технология изготовления которых известна в электротехнике, температурный режим получения стеклометаллокомпозита на основе стекла и стали имеет особенности, например, при разных технологических режимах соединение стекла с металлом может варьироваться от соединения внатяг до спая с развитой диффузионной зоной на границе контакта. Экспериментально доказано, что высокими прочностными характеристиками обладают экспериментальные образцы с развитой диффузионной зоной на границе соединения стекла и стали [3]. При проведении экспериментальных исследований замечено также, что причиной и непосредственным участником диффузионных процессов является оксидный слой на стальной поверхности, образование соединения стекло-сталь включает формирование полного физического контакта и диффузионные процессы, связанные с растворением оксидного слоя на стали в стекле и последующей диффузией железа в стекло [2,3]. Математическому моделированию диффузионных процессов посвящено огромное количество работ, однако, для каждой технологической задачи при оптимизации экспериментальных исследований актуальной остается проблема выбора соответствующей модели и ее корректировки.