

**В.Л. Якушев, В.Р. Цибульский**

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ПО БИОМЕХАНИКЕ ГЛАЗА**

*Статья посвящена рассмотрению различных аспектов биомеханики глаза: механике роговицы и склеры, циркуляции водянистой влаги; динамике стекловидного тела; отслойке сетчатки; механике глаукомы; моделированию движений глаза. Приведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов.*

### **Биомеханика, глаз, обзор, результаты, аппаратура**

Биомеханика человеческого глаза является составной частью общей биомеханики — раздела естественных наук, изучающего на основе моделей и методов механики механические свойства живых тканей, отдельных органов и систем или организма в целом, а также происходящие в них механические явления. Биомеханические исследования охватывают различные уровни организации живой материи: биологические макромолекулы, клетки, ткани, органы, системы органов, а также целые организмы и их сообщества.

Ряд физиологических и патологических процессов в глазе тесно связан с механикой жидкости и/или механикой деформируемого твердого тела, и по этой причине специалисты в области биомеханики посвящают в последние годы все большее внимание моделированию различных явлений внутри и вокруг глаза. Исследования в этой области, ориентированные на клинический результат, должны выполняться на мультидисциплинарной основе, что предполагает объединение ученых с опытом из разных областей науки, в том числе врачей, биологов, инженеров, механиков и математиков. При этом одним из центральных этапов исследований является создание математических моделей, позволяющих достаточно полно описать происходящие в глазе явления на базе современных представлений механики сплошной среды.

Ежегодно в мире и в России проходят совещания, конференции и другие мероприятия, на которых рассматриваются вопросы, связанные с биомеханикой глаза.

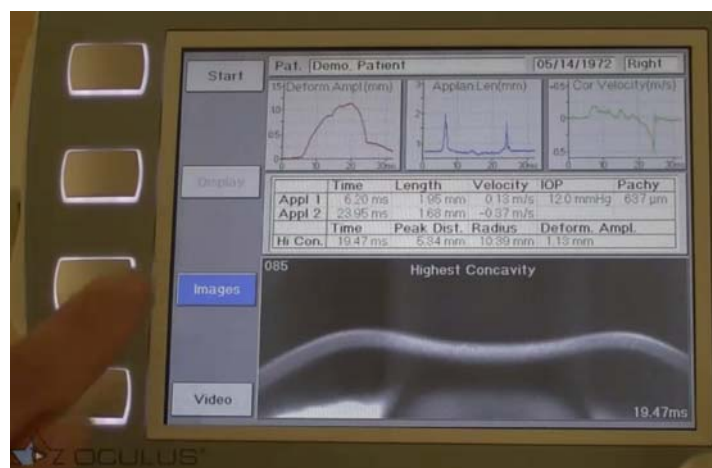
С 22 по 24 июля 2013 г. в г. Генуя (Италия) проходил Европейский коллоквиум 533 «Биомеханика глаза» (Eurumech Colloquium 533 “Biomechanics of the Eye”). Коллоквиум проводился в Генуэзском университете, организатором и председателем коллоквиума был профессор этого университета Рудольфо Репетто. На нем было заслушано около 30 докладов ученых из Европы, США и Японии [1].

Первый автор настоящей статьи был приглашен туда для участия и выступления с устным докладом на тему «Математическое моделирование деформаций роговицы и склеры глаза при измерении внутриглазного давления» (Simulation of the corneoscleral rigidity in the measurement of intraocular pressure) [2]. Эта работа была поддержана грантом № 13-01-00801 Российского фонда фундаментальных исследований.

Темами коллоквиума являлись аспекты физиологии или патологии глаз, в которых механика играет определяющую роль, в том числе, например, следующие темы: динамика слезной жидкости; механика роговицы, склеры, радужной оболочки и хрусталика; циркуляция водянистой влаги и ее дренаж; динамика стекловидного тела; отслойка сетчатки; механика глаукомы; моделирование движений глаза.

Следует отметить, что наряду с построением моделей сейчас появляется все больше медицинских приборов, которые позволяют исследовать форму глаза, механические свойства его тканей, происходящие в нем процессы перемещения жидкости и деформации роговицы и склеры и тем самым сделать математические модели более достоверными и ориентированными на практическое применение. Фактически на коллоквиуме большинство докладов было посвящено сравнению теоретических моделей с экспериментальными результатами. Причем используются уникальные приборы, как специально созданные, так и заимствованные из других областей естественных наук и адаптированные для исследовательских целей биомеханики глаза. Часто в приборы встраиваются небольшие компьютеры, которые сразу же анализируют полученные результаты и производят их визуализацию.

Один из примеров показан на рис. 1, на котором отображены графические результаты и показана одна из промежуточных форм роговицы при измерении внутриглазного давления пневмометрическим методом прибором OCULUS. До недавнего времени подобные изображения получать не удавалось, а сейчас этот прибор широко используется при клинических исследованиях.



**Рис. 1.** Одна из промежуточных форм роговицы, полученных с помощью прибора OCULUS

Упомянуть все произнесенные на коллоквиуме доклады здесь не представляется возможным. Остановимся лишь на некоторых. Более полную информацию можно найти в Интернете по ссылке [1].

Доклад L. Esposito и др. [3] был посвящен травмам, возникающим при ударе тупого предмета в глаз. Подобные травмы являются основной причиной отслойки сетчатки у детей и подростков. Повреждения сетчатки имеют иногда фатальные последствия и в результате приводят к частичной или полной потере зрения. Проведенные исследования были направлены на выявление и понимание реальных биомеханических механизмов, ответственных за травматические повреждения глаз при тупом ударе, с особым вниманием к процессам повреждения, которые происходят в сетчатке. С этой целью были проведены численные и экспериментальные исследования на свежих энуклеированных свиных глазах. Глаза помещались в контейнер, заполненный на 10 % желатином, имитирующим жировые ткани, окружающие глаз. Миниатюрный

датчик давления был вставлен в глаз около зрительного нерва, чтобы измерить давление в глазе при ударе тупым предметом.

На рис. 2 показана временная последовательность одного из тестов. Средняя скорость пули достигала 86,6 м/с и была измерена с помощью скоростной видеосъемки.

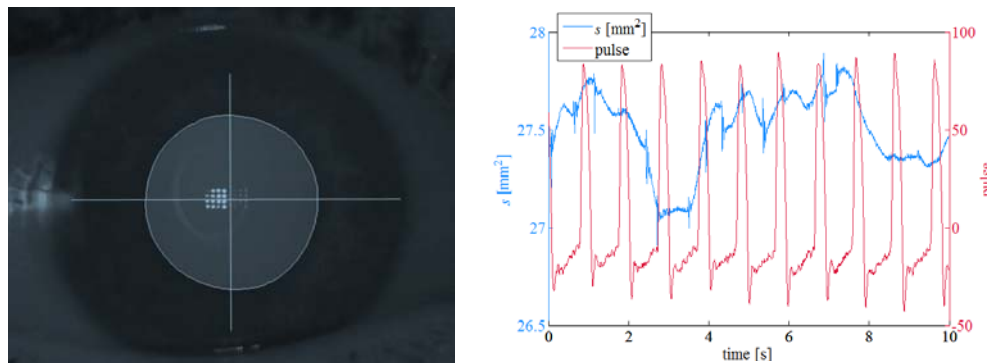


**Рис. 2.** Последовательные изображения удара в глаз тупым предметом

В докладе М. Szmigiel и Н. Kasprzak [4] представлен метод измерения кинетики зрачка с использованием высокоскоростной видеокамеры со скоростью записи 200 Гц, синхронизированной с оксиметром, фотоэлектрическим прибором, используемым для измерения насыщенности кислородом гемоглобина в крови — одного из важнейших функциональных показателей в кардиологии. Последовательные изображения зрачка, записанные в течение 10 секунд, были численно обработаны по кадрам. Сигнал пульсации крови регистрировался и анализировался совместно с данными о геометрии зрачка.

Анализ этих данных может позволить найти корреляцию в зависимости между геометрией зрачка и пульсацией крови, что может быть важным для офтальмологии, неврологии и психиатрии.

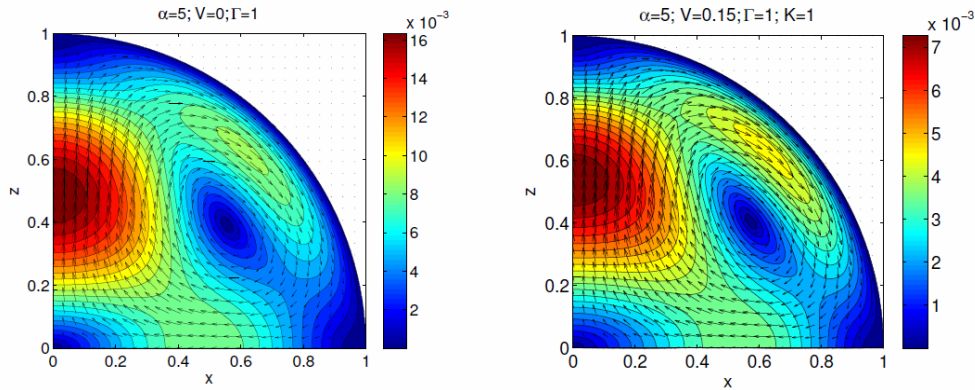
Слева на рисунке 3 показан зрачок с линией его границы и центром тяжести, обозначенным перекрестием. Справа дано изменение площади зрачка  $s$  и пульсация крови в зависимости от времени.



**Рис. 3.** Форма зрачка (левый рисунок) и пульсация крови в зависимости от времени

Работа J. Meskauskas и др. [5] посвящена изучению стационарных потоков вязкоупругого тела внутри сферы при ее периодических крутильных колебаниях. Целью работы является получение характеристик движения стекловидного тела, вызванного вращением глаза. Постоянная составляющая потока играет важную роль в явлениях массопереноса, и поэтому, изучая ее, можно лучше понять перемещение лекарственного препарата при проведении инъекций в стекловидное тело.

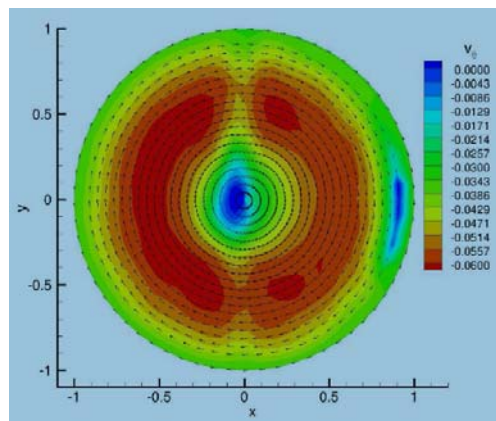
На рис. 4 показано поле стационарного потока. Ось  $Z$  совпадает с осью вращения; левый рисунок соответствует случаю  $V=0$ , правый –  $V=0.15$ . Параметр  $V$  является мерой соотношения между упругим и вязким вкладом в реологические свойства жидкости.



**Рис. 4.** Поле стационарного потока при вращении глаза

Аналогичная тема обсуждалась в докладе Andrea Bonfiglio и др. [6]. В стекловидном теле происходит непрерывное движение из-за вращений глаза. Возникает вопрос: играют ли эти движения роль в возникновении сжижения стекловидного тела и его отслойки. С этой целью были проведены измерения методом цифровой трассерной визуализации (PIV — Particle Image Velocimetry) в упрощенной модели стекловидной камеры. Камера заполнялась искусственным стекловидным телом, в которое добавлялись частицы малого размера (трассеры). Рассматривались периодические повороты камеры, и измерялись скорости движений трассеров в жидкости в экваториальной плоскости, перпендикулярной оси вращения.

По декартовым компонентам скорости вычислялось распределение угловых скоростей, которое показано на рис. 5.



**Рис. 5.** Распределение угловых скоростей в стекловидном теле

В докладе M.J.A. Girard and N.G. Strouthidis [7] рассматривались методы оценки биомеханических свойств зрительного нерва в живом организме.

Принято считать, что ВГД является главным фактором риска для глаукомы. Основным ее проявлением являются необратимые повреждения головки зрительного нерва, который передает визуальную информацию от сетчатки в мозг, что может вызвать потерю зрения.

Зрительный нерв по своему развитию и строению представляет собой не типичный черепномозговой нерв, а как бы мозговое белое вещество, вынесенное на периферию и связанное с ядрами промежуточного мозга, а через них и с корой больших полушарий. Зрительный нерв берёт начало из ганглиозных клеток (третьих нервных клеток) сетчатки. Отростки этих клеток собираются в диске (или соске) зрительного нерва, находящемся на 3 мм ближе к середине от заднего полюса глаза. Далее пучки нервных волокон пронизывают склеру в области решётчатой пластинки, окружаются менингеальными структурами, образуя компактный нервный ствол. Нервные волокна изолированы друг от друга слоем миелина.

Снижение ВГД, фармакологически либо хирургическим путем, позволяет замедлить прогрессирование заболевания. Но глаукома происходит почти так же часто у пациентов с нормальным ВГД, как и у пациентов с повышенным ВГД. И понижающая давление терапия дает ограниченный эффект для пациентов с глаукомой. Проведенные наблюдения показывают, что современное понимание патогенеза глаукомы является недостаточным: фактор ВГД важен, но кроме ВГД существуют и другие факторы, влияющие на развитие этой патологии. К сожалению, в настоящий момент не хватает аппаратных средств и методов для измерения и оценки таких факторов риска.

Для объяснения этих клинических наблюдений было высказано предположение, что пациенты с глаукомой и нормальным ВГД имеют «слабый» зрительный нерв, в то время как пациенты с высоким ВГД, но без глаукомы имеют «сильный» зрительный нерв. Другими словами, врожденные свойства индивидуума могут диктовать уровень ВГД. Существуют основания полагать, что это правильная гипотеза (в статье даются соответствующие ссылки), однако явных доказательств до сих пор не получено. В частности, не было прижизненных исследований биомеханики зрительного нерва у человека.

Авторы осуществили долгосрочную программу исследований, целью которой была оценка в естественных условиях биомеханических характеристик зрительного нерва путем визуализации его деформации с помощью оптической когерентной томографии (ОКТ).

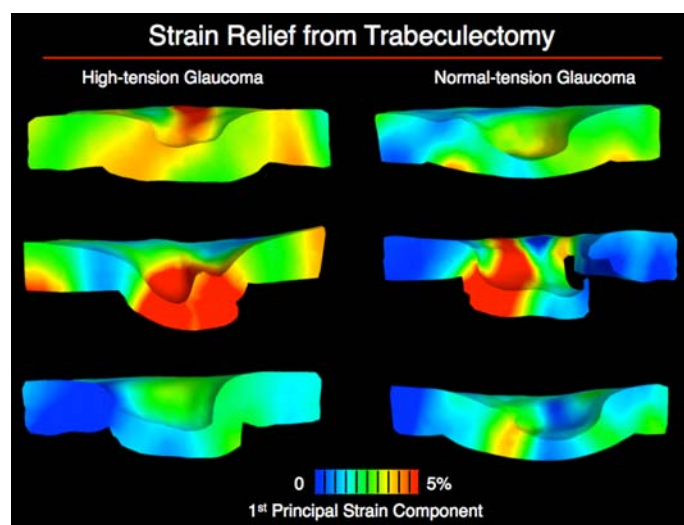
В основе действия ОКТ лежит измерение времени задержки светового луча, отраженного от исследуемой ткани. Источником излучения в современных приборах ОКТ является широкополосный суперлюминесцентный светодиод. В ходе исследования световой импульс делится надвое, при этом одна его часть отражается от исследуемого объекта, а другая (контрольная) – от специального отражающего зеркала. Затем прибор суммирует отраженные сигналы, что вызывает эффект интерференции. Полученная информация обрабатывается с помощью сложного математического алгоритма и формируется так называемый скан исследуемой области, который, по аналогии с ультразвуковым исследованием, получил название А-скана.

За счет использования нового принципа преобразования полученных данных и ряда технических нововведений современные приборы ОКТ позволяют получить более 25 тысяч линейных сканов за 1 секунду. При этом разрешающая способность метода в аксиальном (передне-заднем) направлении достигает 3–8 мкм, а в поперечном лежит в диапазоне от 10 до 15 мкм, что значительно превышает возможности современных ультразвуковых методов

исследования. За счет высокой скорости сканирования и получения большого объема информации в ходе исследования современные ОКТ-сканеры способны формировать трехмерное изображение исследуемой области.

Столь высокое пространственное разрешение ОКТ дает возможность фактически проводить прижизненную микроскопию исследуемой ткани. ОКТ позволяет диагностировать такие тонкие изменения структуры сетчатки, которые лежат вне пределов разрешения других методов исследования и просто невидимы при осмотре глазного дна (офтальмоскопии).

В качестве первого шага в долгосрочной исследовательской программе авторы экспериментально измеряли и сравнивали деформации в склере и решетчатой пластинке (lamina cribrosa — LC) у больных глаукомой пациентов с высоким и нормальным ВГД.



**Рис. 6.** Снижение первого инварианта тензора напряжений в головке зрительного нерва у пациентов после трабекулэктомии для глаукомы с высоким и нормальным ВГД

На рис. 6 показано снижение первого инварианта тензора напряжений в головке зрительного нерва у живого пациента после трабекулэктомии (иссечения участка трабекулярной сетки глаза) для глаукомы с высоким и нормальным ВГД для трех пациентов в каждой группе. Для первой группы предоперационное ВГД:  $27.7 \pm 7.2$  mmHg; послеоперационное —  $13.3 \pm 3.2$  mmHg. Для второй —  $11.7 \pm 2.5$  mmHg и  $7.0 \pm 2.6$  mmHg соответственно.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *The pdf version* of the book of abstracts and the list of participants of the Euromech Colloquium 533 «Biomechanics of the Eye». [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.dicca.unige.it/rrepetto/data/book-of-abstracts.pdf>.
2. Yakushev V. Simulation of the corneoscleral rigidity in the measurement of intraocular pressure. EUROMECH Colloquium 533, «Biomechanics of the Eye», Genoa, Italy, 22–24 July 2013. Book of Abstracts. University of Genoa, Italy. P. 57–58.
3. Esposito L., Clemente C., Rossi T., Bonora N. The biomechanics of the eye under high speed impact. EUROMECH Colloquium 533, «Biomechanics of the Eye», Genoa, Italy, 22–24 July 2013. Book of Abstracts. University of Genoa, Italy. P. 27–28.

4. Szmigiel M., Kasprzak H. Investigation of dependences between dynamics of the pupil geometry and blood pulsation. EUROMECH Colloquium 533, «Biomechanics of the Eye», Genoa, Italy, 22-24 July 2013. Book of Abstracts. University of Genoa, Italy. P. 41-42.
5. Meskauskas J., Repetto R., Siggers J. H. A mathematical model of the steady streaming in the vitreous chamber. EUROMECH Colloquium 533, «Biomechanics of the Eye», Genoa, Italy, 22-24 July 2013. Book of Abstracts. University of Genoa, Italy. P. 19-20.
6. Bonfiglio A., Repetto R., Stocchino A. In-vitro experimental study on the motion of the vitreous body induced by rotations of the eyeball. EUROMECH Colloquium 533, «Biomechanics of the Eye», Genoa, Italy, 22-24 July 2013. Book of Abstracts. University of Genoa, Italy. P. 21-22.
7. Girard M.J.A., and Strouthidis N.G. Methods for characterizing optic nerve head biomechanics in vivo. EUROMECH Colloquium 533, «Biomechanics of the Eye», Genoa, Italy, 22-24 July 2013. Book of Abstracts. University of Genoa, Italy. P. 33-34.

Yakushev V.L., Tsibulsky V.R.

*Investigation of the biomechanics eye*

*The article discusses various aspects of biomechanics of the eye: the mechanics of the cornea and sclera, the circulation of aqueous humor; dynamics of vitreous; retinal detachment; mechanics of glaucoma; modeling of eye movements. The comparison of theoretical and experimental results.*

**Biomechanics, eye, observe, results, equipment.**