

**А.Е. СИНЕОК**

Самарский государственный медицинский университет  
Научно-исследовательский институт глазных болезней

## **ОТТОК И РИГИДНОСТЬ ГЛАЗА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ**

Научный консультант – профессор А.В. Золотарев

В эксперименте у 34 энуклеированных человеческих глазных яблок было исследовано влияние ригидности глаза на отток влаги передней камеры при снижении внутриглазного давления от 30 мм рт. ст. до 15 мм рт. ст.. В среднем ригидность глазных яблок составила  $R = 0,026 \pm 0,002$  мм рт. ст./мм<sup>3</sup>. Время снижения внутриглазного давления колебалось в пределах от 3,3 до 18,4 минуты, составив в среднем  $9,0 \pm 1,3$  минуты. Коэффициент легкости оттока для исследуемой группы глаз в среднем составил  $0,090 \pm 0,006$  мм<sup>3</sup>/мм рт. ст./мин. В группе с осью глазных яблок менее 24,0 мм  $R = 0,03 \pm 0,003$  мм рт. ст./ мм<sup>3</sup>, отток составил  $C = 0,10 \pm 0,08$  мм<sup>3</sup>/мм рт. ст./мин. В группе с осью более 24,0 мм  $R = 0,019 \pm 0,002$  мм рт. ст./ мм<sup>3</sup>, отток  $C = 0,067 \pm 0,07$  мм<sup>3</sup>/мм рт. ст./мин. Влияние возрастных изменений ригидности на отток в данном исследовании не выявлены. Показано, что при повышении ригидности глаза скорость выталкивания влаги из передней камеры увеличивается и, наоборот: при уменьшении ригидности скорость оттока влаги из передней камеры уменьшается.

*Ключевые слова: Внутриглазное давление, отток внутриглазной жидкости, ригидность глаза, переднезадняя ось глазного яблока.*

**A.E. SINEOK**

## **OUTFLOW AND OCULAR RIGIDITY IN HUMAN EYES: EXPERIMENTAL RESEARCH**

The experiment with 34 human enucleated eyeballs investigated the effect of the rigidity of the eye on the outflow of anterior chamber with the decrease of intraocular pressure from 30 mm Hg up to 15 mm Hg. The average stiffness of the eyeballs was  $R = 0.026 \pm 0.002$  mm Hg / mm<sup>3</sup>. The time of decrease of the intraocular pressure ranged from 3.3 to 18.4 minutes, at an average of  $9.0 \pm 1.3$  minutes. Coefficient of ease of the outflow in study group eyes averaged  $0,090 \pm 0,006$  mm<sup>3</sup> / mm Hg / min. In the group with the axis of the eyeballs less than 24.0 mm  $R = 0.03 \pm 0,003$  mm Hg/mm<sup>3</sup>, the outflow was  $C = 0.10 \pm 0.08$  mm<sup>3</sup> / mm Hg / min. In the group with the axis more than 24.0 mm  $R = 0.019 \pm 0.002$  mm Hg / mm<sup>3</sup>, the outflow was  $C = 0.067 \pm 0.07$  mm<sup>3</sup> / mm Hg /min. Influence of age-related changes on the rigidity of the outflow was not

identified in this study. It has been shown that with the increase in the rigidity of the eye the speed of fluid ejection from the anterior chamber increases, and vice versa - with decreasing rigidity the outflow rate of moisture from the anterior chamber decreases.

*Key words: ocular rigidity coefficient, outflow of intraocular fluid, intraocular pressure, anterior-posterior axis of eye ball.*

Механизм регуляции оттока внутриглазной жидкости является одной из фундаментальных проблем гидродинамики глаза<sup>1</sup>. Экспериментальное изучение легкости оттока внутриглазной жидкости проводилось в различных устройствах на энуклеированных глазных яблоках, где моделировался одновременно и приток и отток жидкости внутри передней камеры<sup>2</sup>. В такой модели давление в передней камере создавалось не физиологичным образом, что могло вызвать облегчение оттока через трабекулярный аппарат угла передней камеры. Для того чтобы изучить влияние эластических свойств глаза на отток необходимо использовать модель, в которой будет исключен активный приток жидкости в переднюю камеру. Для этого в эксперименте необходимо создать небольшое давление внутри глаза, в результате которого влага из передней камеры будет вытекать за счет действия упругих сил фиброзной капсулы глаза.

Целью нашего исследования явилось изучить влияние ригидности глаза на отток внутриглазной жидкости в энуклеированных человеческих глазах.

Материалы и методы исследования. Всего исследовано 34 глаза. Средний возраст глаз составил  $39,73 \pm 2,0$  лет.

Среднее значение переднезадней оси глаза составило  $23,79 \pm 0,15$  мм. Исследование начиналось на гипотоничных глазах, и проводилось в специальном устройстве<sup>3</sup>. Энуклеированные человеческие глаза со сроком энуклеации от 3,5 ч до 12 ч помещались внутрь резервуара, заполненного физиологическим раствором. Через прокол в культе зрительного нерва в полость стекловидного тела вводилась инъекционная игла (для в/м инъекций). Инъекционная игла через систему стеклянных трубочек связана с электронным манометром низких давлений (Тритон ИиНД 500/75) и поршнем в виде шприца объемом 10 мл. С помощью поршня внутрь стекловидного тела нагнетался объем физиологического раствора достаточного, чтобы поднять внутриглазное давление (ВГД) до 30 мм рт. ст. Вмонтированный градуированный капилляр общим объемом 1,7 мл (1700 мм<sup>3</sup>) и минимальным делением 0,002 мл (2 мм<sup>3</sup>) указывал на вытекающий объем влаги из передней камеры. После завершения подачи физиологического раствора внутрь стекловидной полости, систему перекрывали. Наблюдалось снижение внутриглазного давления от 30 до 15 мм рт. ст., что регистрировали на микроманометре. В результате внутри системы снижение ВГД происходило через неравные про-

<sup>1</sup> Иомдина, Е.Н. Биомеханика склеральной оболочки глаза при миопии: Дис. ...д-ра биол. Наук. – М., 2000.

<sup>2</sup> Нестеров А.П., Бунин Ф.Я., Кацнельсон Л.А. Внутриглазное давление. Физиология и патология. – М.: Наука, 1974. – 381 с.

<sup>3</sup> Синеек А.Е., Золотарев А.В., Карлова Е.В., Шевченко М.В., Миллюдин Е.С. Ригидность глаза в эксперименте // Российский офтальмологический журнал. – 2011. Том 4. №3. С. 73-77.

межутки времени, которые отмечали при каждом падении ВГД на 1 мм рт ст. Построили график зависимости  $P(t)$ , где  $P$  – внутриглазное давление,  $t$  – время в минутах. Было отмечено, что объем вытолкнутой жидкости в капилляре во всех случаях был равен 10 мм<sup>3</sup>. Рассчитывали коэффициент легкости оттока по формуле  $C = V/(P \cdot t)$ . Рассчитана ригидность глаза формуле  $R = dP/dV$ .

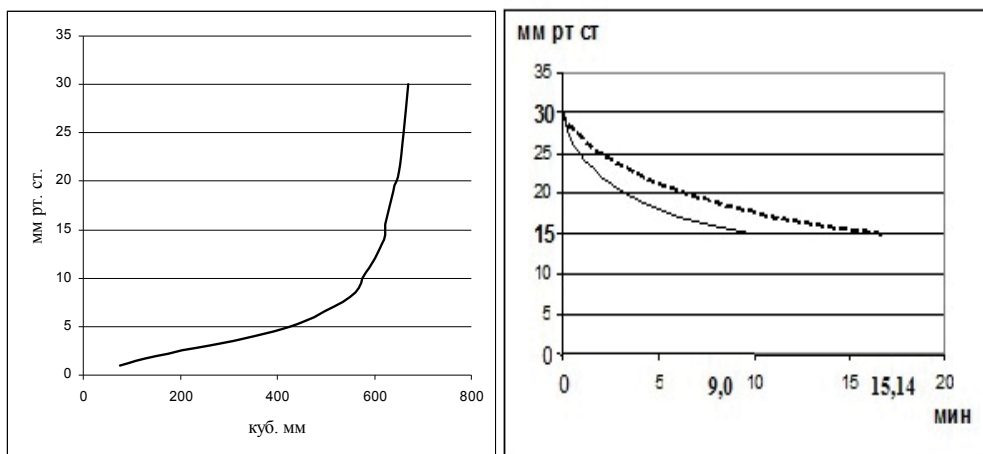
Эксперимент со снижением ВГД повторяли трехкратно, путем выдавливания введенного раствора из стекловидного тела наружу и повторному наполнению глазного яблока. Кроме того, для визуализации направления оттока пять глаз были подвергнуты исследованию с тушью. Мы не наблюдали ни в одном случае просачивания окрашенного тушью физиологического раствора натрия хлорида через элементы аппарата или наружу в резервуар через прокол в зрительном нерве. Тушь прокрашивала элементы переднего отрезка глазного яблока и просачивалась через дренажную си-

стему глаза частично наружу в резервуар с водой.

Во второй серии эксперимента для оценки и контроля влияния дренажной системы на отток и время снижения ВГД, всем глазам вводили в переднюю камеру раствор метилцеллюлозы 2% в объеме 0,5 мл через самогерметизирующийся парацентез роговицы и повторяли эксперимент по той же методике.

Полученные результаты обработаны статистически с помощью программы Microsoft Office Excel 2003, Statistica 6.0.

Результаты исследования и их обсуждение. Средний объем увеличения глазных яблок необходимый для достижения 30 мм рт. ст. составил  $635,59 \pm 35,28$  мм<sup>3</sup>. В среднем по расчетам ригидность составила  $R = 0,026 \pm 0,002$  мм рт. ст./мм<sup>3</sup>. В первой серии эксперимента без введения метилцеллюлозы 3% в переднюю камеру исследуемой группе глазных яблок время снижения ВГД колебалось в пределах от 3,3 до 18,4 минуты, составив в сред-



**Рис.1 и 2. Отток внутриглазной жидкости из передней камеры в энуклеированных глазах после введения физиологического раствора в стекловидное тело. Сплошная линия – средний график снижения ВГД без введения 0,5 мл метилцеллюлозы 3%. Пунктирная линия – средний график снижения ВГД с введением в переднюю камеру 0,5 мл метилцеллюлозы 3%.**

Таблица 1

Результаты сравнительных исследований оттока ВГЖ в энуклеированных человеческих глазах с ПЗО>24,0 мм и ПЗО<24,0 мм без введения в переднюю камеру 0,5 мл метилцеллюлозы 3%.

Показатель	Без введения метилцеллюлозы 3%			
	ПЗО>24,0 n=14	ПЗО<24,0 n=20	t	p
ПЗО, мм	24,61±0,18	23,21±0,12	6,46	<0,01
Объем введенного раствора в стекловидное тело ΔV, мм <sup>3</sup>	790,71±45,61	527,00±34,23	4,62	<0,01
Ригидность глаза R, мм рт. ст./мм <sup>3</sup>	0,019±0,002	0,03±0,003	5,18	<0,01
Время выталкивания 10 мм <sup>3</sup> Δ t, мин	11,57±1,24	7,21±0,66	3,08	<0,01
Коэффициент легкости оттока C, мм <sup>3</sup> /мм рт. ст./мин	0,067±0,07	0,10±0,08	3,47	<0,01

нем 9,0±1,3 минуты. Во второй серии эксперимента после введения метилцеллюлозы 3% в переднюю камеру время снижения ВГД менялось в пре-

Из анализа графика выявлено, что для выталкивания 10 мм<sup>3</sup> в 1,5 раза больше потребовалось времени в случае серии эксперимента с введением

Таблица 2

Результаты сравнительных исследований оттока ВГЖ в энуклеированных человеческих глазах с ПЗО>24,0 мм и ПЗО<24,0 мм с введением в переднюю камеру 0,5 мл метилцеллюлозы 3%.

Показатель	С введением метилцеллюлозы 3%			
	ПЗО>24,0 n=14	ПЗО<24,0 n=20	t	P
ПЗО, мм	24,61±0,18	23,21±0,12	6,46	<0,01
Объем введенного раствора в стекловидное тело ΔV, мм <sup>3</sup>	751,17±43,34	500,65±32,52	5,7	<0,01
Ригидность глаза R, мм рт. ст./мм <sup>3</sup>	0,021±0,002	0,032±0,003	8,5	<0,01
Время выталкивания 10 мм <sup>3</sup> Δ t, мин	18,91±2,05	12,50±0,88	2,86	<0,05
Коэффициент легкости оттока C, мм <sup>3</sup> /мм рт. ст./мин	0,041±0,01	0,058±0,01	2,6	<0,05

делах от 7,2 до 29,1 минуты, составив в среднем 15,1±1,1 минуты (разница достоверна t=4,58; p<0,01). Необходимо отметить, что уровень ВГД, измеряемый на микроманометре во всех сериях эксперимента снижался от 30 до 15 мм рт. ст. (рис.1 и 2).

метилцеллюлозы 3%. Коэффициент легкости оттока для исследуемой группы глаз без введения метилцеллюлозы 3% составил 0,09±0,006 мм<sup>3</sup>/мм рт. ст./мин, с введением метилцеллюлозы 3% - 0,05±0,003 мм<sup>3</sup>/мм рт. ст./мин (t=5,12; p<0,01).

Таблица 3

Результаты сравнительных исследований оттока ВГЖ в энуклеированных человеческих глазах с разным возрастом умерших

Показатель	Без введения метилцеллюлозы 3%			
	До 40 лет n=16	После 40 лет n=18	t	p
Возраст, лет	28,33±1,09	49,33±1,62	10,8	<0,01
Объем введенного раствора в стекловидное тело ΔV, мм <sup>3</sup>	629,33±49,7	646,6±53,0	0,23	>0,05
Ригидность глаза R, мм рт. ст./мм <sup>3</sup>	0,026±0,002	0,026±0,002	0,05	>0,05
ПЗО, мм	23,7±0,24	23,82±0,21	0,39	<0,01
Время выталкивания 10 мм <sup>3</sup> Δ t, мин	10,51±1,22	7,58±0,83	2,02	<=0,05
Коэффициент легкости оттока C, мм <sup>3</sup> /мм рт. ст./мин	0,10±0,01	0,07±0,01	2,21	<=0,05

Таблица 4

Результаты сравнительных исследований оттока ВГЖ в энуклеированных человеческих глазах с разным возрастом умерших

Показатель	С введением метилцеллюлозы 3%			
	До 40 лет n=16	После 40 лет n=18	t	p
Возраст, лет	28,33±1,09	49,33±1,62	10,8	<0,01
Объем введенного раствора в стекловидное тело ΔV, мм <sup>3</sup>	597,86±47,2	614,3±50,4	0,2	>0,05
Ригидность глаза R, мм рт. ст./мм <sup>3</sup>	0,027±0,002	0,027±0,002	0,05	>0,05
ПЗО, мм	23,7±0,24	23,82±0,21	0,39	<0,01
Время выталкивания 10 мм <sup>3</sup> Δ t, мин	17,37±1,87	13,15±1,29	1,85	>0,05
Коэффициент легкости оттока C, мм <sup>3</sup> /мм рт. ст./мин	0,044±0,01	0,057±0,01	2,03	<=0,05

Для того чтобы выявить характер влияния ригидности оболочек на отток, мы решили сравнить время снижения ВГД у глазных яблок с разной переднезадней осью. Известно, что глаза с короткой осью (гиперметропические) характеризуются более высокой ригидностью по сравнению с миопической

формой глаза<sup>4</sup>. Для этого мы выделили из общей группы глазные яблоки с ПЗО менее 24,0 мм и глаза ПЗО равной или более 24,0 мм и провели расчеты времени снижения ВГД и оттока без введения метилцеллюлозы 2% и с введением метилцеллюлозы 2% в переднюю камеру (таблицы 1 и 2).

<sup>4</sup> Нестеров А.П., Бунин Ф.Я., Кацнельсон Л.А. Внутриглазное давление. Физиология и патология. – М.: Наука, 1974. – 381 с.

В результате у глаз с короткой осью выталкивание 10 мм<sup>3</sup> происходило более быстро по сравнению с миопическими глазами. Внутриглазное давление за счет более ригидных свойств гиперметропических глаз снижалось достоверно быстрее, чем у миопических глаз.

В контрольной серии экспериментов с введением метилцеллюлозы 2% в переднюю камеру было показано, что время выталкивания внутриглазной жидкости увеличилось почти в два раза.

При этом объем введенного раствора в стекловидное тело для достижения 30 мм рт. ст. потребовалось несколько меньше, чем в первой серии эксперимента, что не вызвало существенной разницы между величиной ригидности глаза в первой и второй серии эксперимента, но в то же время выявило достоверную разницу между ригидностью миопического и гиперметропического глаза (критерий  $t$  возрос до  $t=8,5$ ). Скорость оттока внутриглазной жидкости снизилась ( $0,058 \pm 0,01$  мм<sup>3</sup>/мм рт. ст./мин, для миопических  $0,041 \pm 0,01$  мм<sup>3</sup>/мм рт. ст./мин). Таким образом, миопические глаза находятся в наименее выгодном положении по состоянию гидродинамики, внутриглазная жидкость задерживается внутри глаза, что может приводить к дальнейшим пластическим деформациям фиброзной капсулы.

Затем выделены две группы глаз умерших, возраст которых составил соответственно меньше 40 лет и больше 40 лет, где также проведены расчеты времени снижения ВГД для 10 мм<sup>3</sup> и оттока (таблицы 3 и 4).

Из данных таблицы видно, что возраст умерших практически не влияет на скорость оттока внутриглазной

жидкости (достоверной связи с ригидностью глаза не выявлено). Этот вопрос требует дальнейшего изучения.

После введения метилцеллюлозы 3% в переднюю камеру влияние возрастных изменений явно стирается.

О том, что ригидность глаза может влиять на отток внутриглазной жидкости высказываются противоречивые мнения<sup>5,6</sup>. Ряд авторов указывают, что фиброзная капсула настолько ригидная, что выполняет в большей степени опорную функцию для оболочек глазного яблока, чем какую либо функциональную<sup>7</sup>. В тоже время фиброзная капсула не является абсолютно ригидной и обладает свойством увеличивать и уменьшать свой объем<sup>8</sup>. В проведенном эксперименте под воздействием определенного объема физиологического раствора внутри стекловидной полости глазного яблока, создавалось внутриглазное давление достаточное, чтобы осуществить отток из передней камеры. При этом давление внутри глаза было одинаковое во всех случаях эксперимента независимо от объема введенного раствора в полость стекловидного тела глазного яблока и снижалось с 30 до 15 мм рт. ст. В этом момент из передней камеры наружу выталкивался один и тот же объем влаги (10 мм<sup>3</sup>), что регистрировалось на градуированном капилляре вмонтированного в крышку резервуара. Таким образом, менялся только один па-

<sup>5</sup> Котляр К. Е., Кошиц И. Н. Ригидность глаза. Биомеханические и клинические аспекты // Биомеханика глаза: Сб. ст. - М., 2009. С. 121-126.

<sup>6</sup> Любимов Г.А. История развития и биомеханическое содержание измерения внутриглазного давления по методу Маклакова // Глаукома. - 2006. №1. С. 43-49.

<sup>7</sup> Любимов Г.А. О роли ригидности оболочки глазного яблока в процессе формирования внутриглазного давления // Глаукома. - 2006. № 2. С. 47-54.

<sup>8</sup> Козлов В.И. Новый метод изучения растяжимости и эластичности оболочек глаза при изменении офтальмотонуса // Вестник офтальмологии. - 1967. № 2. С. 5-9.

раметр - время выталкивания 10 мм<sup>3</sup> влаги передней камеры, которое зависело от эластических свойств глазного яблока. Из представленных результатов, показано, что ригидность глаза в достаточной степени может повлиять на отток, составляя в среднем от 7% до 30% общего оттока  $0,09 \pm 0,006$  мм<sup>3</sup>/мм рт. ст./мин (по сравнению с активной перфузией через переднюю камеру (0,15-0,55 мм<sup>3</sup>/мм рт. ст./мин.). Это влияние, прежде всего, выражается в уменьшении времени выталкивания влаги из передней камеры при высокой ригидности фиброзной капсулы, то есть повышение доли легкости оттока внутриглазной жидкости, как это показано в гиперметропических глазах (ось менее 24,0 мм). И, наоборот, при более низкой ригидности, где время выталкивание влаги из передней камеры увеличивается, доля легкости оттока внутриглазной жидкости уменьшается (как это происходит в миопических глазах).

Очевидно, что необходимо учитывать влияние ригидности фиброзной капсулы на регуляцию тока влаги передней камеры в физиологических условиях. Так, при первичной глаукоме повышение ригидности фиброзной оболочки может ускорять процесс выталкивания внутриглазной жидкости, что при высокой резистентности дренажной системы может вызвать резкие колебания внутриглазного давления. В результате происходит значительный скачок офтальмотонуса, что часто наблюдается в глазах с короткой осью. При миопической форме глаза, время выталкивания влаги передней камеры более медленное, что несколько компенсирует скачки ВГД, но при значительном сопротивлении оттоку может вызвать пластические деформации

фиброзной капсулы с явлениями удлинения оси глаза<sup>9</sup>.

Таким образом, снижение внутриглазного давления, можно понять как сложный двунаправленный процесс, состоящий с одной стороны - из упругой деформации фиброзной капсулы, попытки вернуть свое исходное состояние, с другой стороны - фильтрации внутриглазной жидкости по естественным путям оттока. Эти два механизма работают параллельно для того, чтобы поддержать гомеостаз офтальмотонуса и свести колебания давления внутри системы к минимуму.

### Выводы.

1. Отток внутриглазной жидкости в энуклеированных глазных яблоках обусловлен состоянием дренажной системы угла передней камеры и ригидными свойствами глазного яблока его фиброзной оболочкой.

2. В эксперименте на энуклеированных человеческих глазах рассчитан коэффициент легкости оттока  $C=0,09 \pm 0,01$  мм<sup>3</sup>/мм.рт.ст./мин, который обусловлен ригидными свойствами фиброзной оболочки, способствующей выталкиванию влаги передней камеры через угол передней камеры, что составляет 7-30% от физиологического оттока.

3. Глазные яблоки с осью менее 24,0 мм, обладают более высокой ригидностью фиброзной капсулы и с большей скоростью выталкивает влагу передней камеры, по сравнению с осью более 24,0 мм.

4. Влияния возрастных изменений ригидности на отток внутриглазной жидкости в данном исследовании не выявлено.

<sup>9</sup> Ku D.N., Greene P.R. Scleral creep in vitro resulting from cyclic pressure pulses: applications to myopia. // Am. J. Optom. Physiol. Opt. - 1981. Vol. 58. №7. P. 528-35.