

УДК 617.7:616-073.173:62-982:66.078-073

Оценка вариации эффективности локальной вакуум-компрессии глазного яблока с помощью новой присоски для импедансной офтальмопневмо-плетизмографии в зависимости от анатомических параметров глаза

А. Г. Ковальчук¹, канд. мед. наук;И. В. Потапенко², ст. преподаватель кафедры дифф. уравнений, геометрии и топологии

¹ ГУ «Институт глазных болезней и тканевой терапии им. В.П.Филатова НАМН Украины»; Одесса (Украина)

² Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова; Одесса (Украина)

E-mail: alkov7@gmail.com

Ключевые слова:

импедансная офтальмопневмоплетизмография, математическое моделирование формы переднего сегмента глаза, внутриглазное давление, перфузионное давление глаза, локальная вакуум-компрессия глазного яблока, ультразвуковая биомикроскопия

Изучено влияние размера глазного яблока и выпуклости его переднего отдела на эффективность локальной вакуум-компрессии глазного яблока с помощью новой присоски для импедансной офтальмопневмоплетизмографии. На основе математического моделирования геометрической формы переднего отдела 75 глаз по данным ультразвуковой биомикроскопии установлено, что наилучшим приближением кривизны горизонтального меридиана переднего сегмента глаза с диаметром основания 16,00 мм во всех случаях оказалась гипербола. Площадь поверхности под новой присоской с внутренним диаметром около 16,5 мм, рассчитанная по формуле площади поверхности сегмента гиперболоида вращения, полностью определялась выпуклостью переднего отдела глаза и варьировала от 247,3 до 271,4 мм². Коэффициент конвертации степени приложенного вакуума в уровень повышения внутриглазного давления, рассчитанный на основе индивидуальных сочетаний площади локальной вакуум-компрессии и размера глазного яблока, составил в среднем 0,83 с размахом вариации от 0,44 до 1,33. Использование индивидуального коэффициента конвертации в зависимости от анатомических параметров глазного яблока обеспечит возможность измерения диастолического перфузионного давления глаза с высокой чувствительностью и точностью.

В 2017-2018 годах в работах А. Г. Ковальчука [1, 2, 3] была обоснована возможность диагностики микроциркуляторной ишемии цилиарного тела с помощью импедансной офтальмопневмоплетизмографии (ОППГ) путём определения сниженного ниже нормы (35 мм рт. ст.) уровня диастолического перфузионного давления (ПДГ) в метартериолах, входящих в регионарную систему микроциркуляции цилиарного тела. Диастолическое ПДГ определяется на основе рассчитываемого по степени локальной вакуум-компрессии глаза уровня повышения ВГД, при котором в цилиарном теле реографически регистрируется снижение амплитуды пульсовых колебаний кровенаполнения. Уровень диастолического ПДГ в метартериолах близок к величине перфузионного давления на артериальном конце капилляров (незначительно его превышает), уменьшение которого ниже 30-35 мм рт. ст. приводит к ишемии тканей. В предложенном методе исследования реализован оригинальный подход в диагностике наличия и степени выраженности микроциркуляторной ишемии тканей через количественное определение

уровня снижения перфузионного кровяного давления на артериальном конце капилляров.

Для осуществления нового способа исследования в 2016 году А. Г. Ковальчуком было предложено устройство для определения ПДГ в регионарной системе микроциркуляции цилиарного тела [4]. Оно имеет два существенных недостатка.

Во-первых, вакуум-компрессионное кольцо в этом устройстве имеет Г-образный профиль сечения с острыми углами соприкосновения краёв со склеральной оболочкой, что во время проведения вакуум-компрессии, сопровождающейся подъёмом подлежащего участка склеры, делает возможным контакт покрывающей склеру влажной конъюнктивы с внутренней поверхностью кольца у его краёв с уменьшением площади локальной вакуум-компрессии, снижением её эффективности и нарушением линейности конвертации степени приложенного вакуума в уровень повышения ВГД.

Во-вторых, при применении вакуум-компрессионного кольца с реографическими электродами, установленными на подложках напротив друг друга, технически невозможно достичь степени вакуума, способного вызвать повышение ВГД на 35 мм рт. ст., что является необходимым условием для измерения максимально возможного уровня диастолического перфузионного давления в метартериолах цилиарного тела, отмечающегося в норме.

В 2017 году была выведена формула зависимости уровня повышения ВГД от степени локальной вакуум-компрессии глаза [2]. Ниже приведена уточнённая формула, вывод которой дан в приложении №1 к статье:

$$P - P_0 = \beta \cdot \frac{S_{vac}^2 \cdot VAC}{R^4}, \quad (1)$$

где P – текущий уровень ВГД в процессе вакуум-компрессии глазного яблока (мм рт. ст.), P_0 – ВГД до применения локальной вакуум-компрессии (мм рт. ст.), β – коэффициент, учитывающий эффективность прогиба склеральной оболочки в зависимости от формы участка локальной вакуум-компрессии, S_{vac} – площадь участка локальной вакуум-компрессии (мм²), VAC – степень локальной вакуум-компрессии (мм рт. ст.), R – радиус глазного яблока (половина длины передне-задней оси глаза) (мм).

При проведении операции ламеллярной кератопластики для повышения ВГД на 50 мм рт. ст. от 15 до 65 мм. рт. ст. под вакуум-компрессионным кольцом необходимо создать вакуум не менее 500 мм рт. ст. Соответственно для повышения ВГД на 35 мм рт. ст. от 15 до 50 мм рт. ст., согласно приведенной формуле (1), необходим вакуум около 350 мм рт. ст. В вакуум-компрессионном кольце по патенту А. Г. Ковальчука [4] два сектора размером 80 градусов занимают расположенные на подложках напротив друг друга дугообразные реографические электроды, что существенно уменьшает площадь вакуум-компрессии. Соответственно общая площадь вакуум-компрессии по сравнению с полным вакуум-компрессионным кольцом уменьшена до $(100 \times 2) / 360 = 56\%$.

Согласно формуле (1), уровень повышения ВГД при локальной вакуум-компрессии обратно пропорционален её площади в квадрате. Следовательно, при уменьшении площади локальной вакуум-компрессии до 56%, что соответствует уменьшению множителя S_{vac}^2 в формуле (1) до 31%, для повышения уровня ВГД требуется поднятие степени вакуума под вакуум-компрессионным кольцом в три раза выше 350 мм рт. ст., что технически невозможно, так как превышает максимально возможное значение вакуума 760 мм рт. ст.

В ранее опубликованных работах [2, 3] было показано, что наибольшую эффективность подъёма ВГД имеют присоски с круглой формой участка локальной вакуум-компрессии. На основании этого А.Г. Ковальчуком предложено новое устройство для импедансной ОППГ [5]. Блок-схема устройства показана на рис. 1.

Устройство состоит из присоски с реографическими электродами (1), блока генерирования вакуума (3), реографа (6). Присоска выполнена из оптически прозрачного пластика в виде колпачка, центральная часть которого представляет собой сегмент сферической оболочки радиусом около 7,7 мм и диаметром 12,0 мм соответственно средней кривизне роговицы и её диаметру, его периферическая часть между диаметрами 12 и 19 мм представляет собой шаровую пояс сферической оболочки радиусом 12,7 мм, внутренний край которого соединён с центральной частью, а наружный свободный край изогнут к оси симметрии по радиусу 1,5-2,0 мм на протяжении четверти окружности. В центральную часть присоски у места её соединения с периферической частью вмонтирован патрубок (7), от которого идёт отводящая трубка (2) к блоку генерирования вакуума (3). По краю присоски заподлицо с ним расположены напротив друг друга две дугообразные подложки (8), контактная поверхность которых выгнута по радиусу 12,7 мм соответственно средней кривизне склеры в перилимбальной зоне, на подложках установлены электроды для реографии (4). Электроды гибкими проводами (5) соединены с реографом (6). Незанятый электродами край присоски скруглен по радиусу, равному половине его толщины.

Вариабельность формы переднего отдела глаза, обусловленная разной степенью его выпуклости, может приводить к существенным колебаниям площади локальной вакуум-компрессии S_{vac} под присоской новой конструкции, величина которой наряду с размером глазного яблока согласно формуле (1) может влиять на степень локальной вакуум-компрессии глазного яблока.

Цель работы – оценить вариацию эффективности локальной вакуум-компрессии глазного яблока с помощью новой присоски для импедансной ОППГ в зависимости от анатомических параметров глаза.

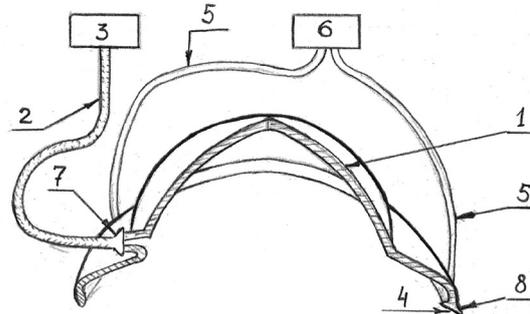


Рис. 1. Устройство для импедансной ОППГ. 1 – корпус присоски из прозрачного пластика, изображённый в прямоугольной изометрической проекции с вырезом передней четверти, 2 – отводящая трубка, 3 – блок генерирования вакуума, 4 – электрод для реографии, 5 – соединительные провода, 6 – реограф, 7 – отводящий патрубок, 8 – дугообразная подложка под электродом

Для достижения поставленной цели по патенту UA 131602 была разработана 3Д модель присоски новой конструкции. На рис. 2 изображена её прямоугольная изометрическая проекция с вырезом передней четверти.

Присоска имеет форму колпачка с наружным диаметром 19,0 мм и средним внутренним диаметром 16,5 мм (небольшая овальность обусловлена тем, что её диаметр между краями, на которых в секторах величиной 90 градусов расположены реографические электроды, равен 16,0 мм, а между свободными краями – 17,0 мм). Внутренний диаметр присоски меньше наружного за счёт толщины корпуса и наклона края присоски внутрь.

Присоска новой конструкции устанавливается на передний отдел глаза таким образом, чтобы реографические электроды были расположены по отношению к роговице в верхнем и нижнем квадрантах. Патрубок с отводной трубкой при этом всегда находится с височной стороны и не упирается в выступающие костные края глазницы и нос, а меньший внутренний диаметр присоски соответствует короткому вертикальному диаметру роговицы. В горизонтальном меридиане диаметр роговицы в среднем составляет около 11,7 мм, в вертикальном – около 10,6 мм [6]. Посчитаем овальность (a) внутреннего диаметра присоски новой конструкции и диаметра роговицы по формуле:

$$a = \frac{2 \cdot (D_{\max} - D_{\min})}{(D_{\max} + D_{\min})} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где D_{\max} и D_{\min} – максимальный и минимальный диаметр соответственно.

Согласно формуле (2), овальность внутреннего диаметра присоски равна около 6,1%, диаметра роговицы – около 9,9%. Близость величин овальности диаметра внутреннего диаметра присоски и диаметра роговицы обеспечивает конгруэнтность формы участка вакуум-

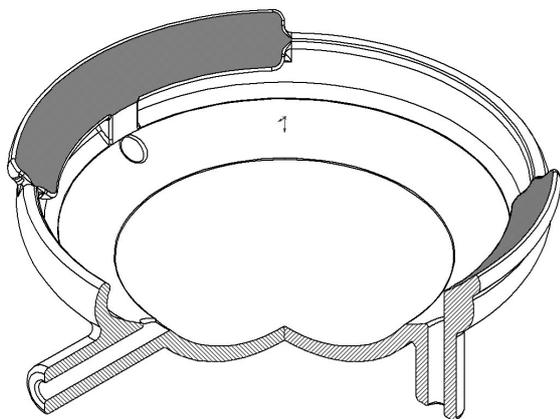


Рис. 2. Прямоугольная изометрическая проекция 3Д модели присоски новой конструкции с вырезом передней четверти (вид со стороны реографических электродов, выделенных серым цветом)

компрессии и роговицы с одинаковым удалением края присоски от края роговицы по всему периметру.

В формуле (1) выражение $\beta \cdot \frac{S_{vac}^2}{R^4}$

фактически является индивидуальным для каждого глаза коэффициентом конвертации K степени приложенного вакуума в уровень повышения ВГД:

$$K = \beta \cdot \frac{S_{vac}^2}{R^4} \quad (3)$$

Согласно формуле (3), на величину коэффициента конвертации величины приложенного вакуума в уровень повышения ВГД, кроме постоянного коэффициента β , влияют две переменные: площадь локальной вакуум-компрессии и радиус глазного яблока, равный половине длины передне-задней оси глаза. Поэтому для точного расчёта уровня повышения ВГД на конкретном глазу пациента нужны точные значения ПЗО глазного яблока и площади переднего сегмента глаза (ПСГ), расположенного под присоской и состоящего из роговицы с каймой перилимбальной зоны склеры. ПЗО глазного яблока может быть легко измерена с помощью ультразвуковой или оптической биометрии. Для вычисления площади ПСГ необходимо знать его геометрическую форму. В связи с этим была поставлена задача осуществить математическое моделирование формы переднего отдела глаза наиболее приближенной к ней поверхностью вращения второго порядка.

Материал и методы

Для решения поставленной задачи у 40 пациентов в возрасте от 15 до 76 лет (23 женщины и 17 мужчин) с эмметропией и аномалиями рефракции (близорукость, гиперметропия) были проведены исследования формы переднего сегмента 75 глаз на двух приборах: авторефкератометре Tomey RC-5000 и ультразвуковом приборе Avizo фирмы Quantel Medical.

Критерии включения пациентов в исследование были следующими: 1) отсутствие в анамнезе глазных хирургических операций и травм, которые могли бы повлиять на форму переднего сегмента глаза, 2) отсутствие изменений формы и размеров роговицы, связанных с врождённой глаукомой, мегалокорнея, кератоконусом, 3) астигматизм роговицы в пределах физиологического (до 0,75 дптр), 4) отсутствие изменений формы перилимбальной зоны склеры, связанных с наличием передних стафилом.

На авторефкератометре Tomey RC-5000 измерялись центральный радиус кривизны роговицы в сильном и слабом меридианах (в дальнейших расчётах использовалось его среднее значение) и клиническая рефракция глаза (в дальнейших расчётах использовался сферический эквивалент). На ультразвуковом приборе Avizo с помощью линейного зонда для ультразвуковой биомикроскопии (УБМ) частотой 50 МГц делалось аксиальное (соосно зрительной оси) сканирование переднего отдела глаза в горизонтальной плоскости.

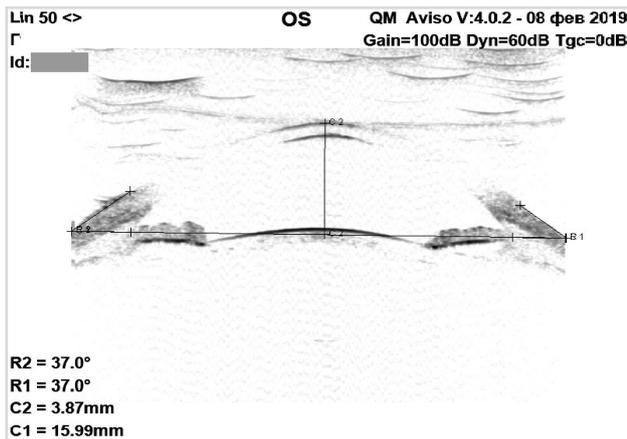


Рис. 3. Сканограмма переднего отдела глаза с расположением фокусной области ультразвукового луча на уровне перилимбальной зоны склеры

На сканограмме с расположением фокусной области ультразвукового луча на уровне перилимбальной зоны склеры у всех пациентов определялась высота Н16 от вершины роговицы до основания ПСГ16 диаметром 16,00 мм и углы $\angle 16$ между контуром сечения боковой поверхности сегмента и диаметром его основания в точке их пересечения (рис. 3). У 13 пациентов (24 глаза) на сканограмме с расположением фокусной области ультразвукового луча на уровне центральной зоны роговицы дополнительно определялась высота Н9 от вершины роговицы до основания ПСГ9 диаметром 9,00 мм и углы $\angle 9$ между контуром сечения боковой поверхности сегмента и диаметром его основания в точке их пересечения (рис. 4).

В расчётах использовалось среднее арифметическое между носовым и височным значением угла, т.к. они могли незначительно отличаться за счёт небольшого наклона ультразвукового зонда относительно зрительной оси глаза. На приборе Aviso также осуществлялась ультразвуковая биометрия с определением длины передне-задней оси глаза (ПЗО).

Форма поверхности переднего отдела глаза моделировалась при помощи поверхности вращения второго порядка, где в виде меридиана бралась кривая, заданная уравнением $y = \sqrt{Ax + Bx^2}$.

Результаты

В зависимости от значения параметра В возможны следующие варианты кривых: 1) $B=-1$ (окружность), 2) $B<0$ (эллипс), 3) $B=0\pm 0,2$ (парабола), 4) $B>0$ (гипербола).

Поскольку эксцентриситет меридиана зависит только от параметра В, то он полностью определяет асферичность горизонтального меридиана ПСГ с любым диаметром основания. Результаты измерений высоты Н и углов \angle на для ПСГ с диаметрами основания 9 мм и 16 мм, края которых топографически соответствуют периферии роговицы и наружной границе перилимбальной зоны склеры, и вычисленные на их

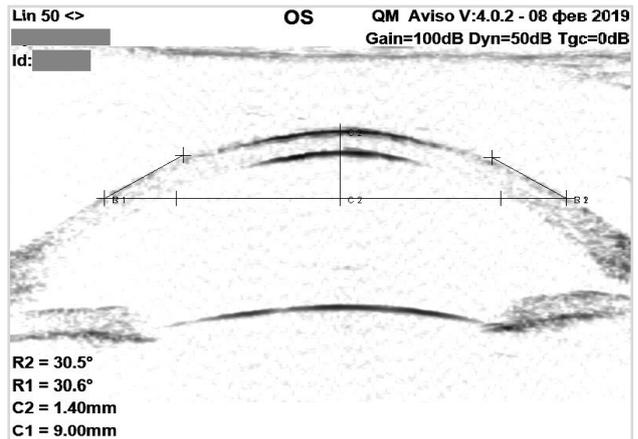


Рис. 4. Сканограмма переднего отдела глаза с расположением фокусной области ультразвукового луча на уровне центральной зоны роговицы

основании параметры B_9 и B_{16} для каждого из 24 глаз представлены в таблице 1.

На основании литературных данных о соответствии формы поверхности центральной зоны роговицы форме эллипсоида вращения [7] первоначальной гипотезой было предположение, что геометрическая форма периферической зоны роговицы, лимба и перилимбальной зоны склеры также лучше всего описывается им. Это предположение оказалось ошибочным.

Для ПСГ9 наилучшим приближением кривизны горизонтального меридиана в 6 случаях является эллипс, в 8 – парабола, в 10 – гипербола. Для ПСГ16 наилучшим приближением кривизны горизонтального меридиана во всех случаях является гипербола.

Следовательно, асферичность поверхности переднего отдела глаза в горизонтальном меридиане усиливается (эксцентриситет увеличивается) по мере удаления от вершины роговицы на периферию. Диаметр 9,00 мм фактически является зоной перехода кривизны горизонтального меридиана от эллипса в центре к гиперболе на периферии.

Полученная модель позволяет не только понять, какая модельная поверхность вращения лучше всего приближает реальную поверхность глаза, но и получить при этом приближенное значение площади поверхности глаза на любом измеряемом диаметре, что важно в различных приложениях, в частности для расчёта более точного значения уровня повышения ВГД при локальной вакуум-компрессии глазного яблока.

Площадь поверхности вращения (ось вращения Ох) легко посчитать по общей формуле [8, стр. 217]:

$$S = 2\pi \int_0^H y \sqrt{1+y'^2} dx$$

В нашем случае получим для $y = \sqrt{Ax + Bx^2}$:

$$S = \pi \int_0^H \sqrt{A^2 + 4A(1+B)x + 4B(1+B)x^2} dx,$$

где Н – измеряемая высота ПСГ.

Таблица 1. Типы кривой второго порядка, описывающие форму горизонтального меридиана передних сегментов 24 глаз с диаметрами основания 9,00 и 16,00 мм

№ п/п	H_9	$\angle 9$	H_{16}	$\angle 16$	B_9	Тип кривой для ПСГ ₉	B_{16}	Тип кривой для ПСГ ₁₆
1	1,4	31,5	3,9	35,2	0,159	близка к параб.	1,608	гипербола
2	1,5	35,5	4,1	36	-0,588	эллипс	1,564	гипербола
3	1,35	27	3,8	36	1,973	гипербола	1,363	гипербола
4	1,35	27	3,8	38	1,973	гипербола	0,957	гипербола
5	1,45	32,5	4,3	38	0,111	близка к параб.	1,301	гипербола
6	1,4	31	4,35	39	0,367	гипербола	1,160	гипербола
7	1,5	35	4,3	38,5	-0,431	эллипс	1,217	гипербола
8	1,5	34	4,2	40	-0,105	эллипс	0,912	гипербола
9	1,4	29	4,1	36,5	1,266	гипербола	1,467	гипербола
10	1,35	29	4,1	37	0,916	гипербола	1,371	гипербола
11	1,6	35	4,3	38,5	0,123	близка к параб.	1,217	гипербола
12	1,5	33,5	4,15	37	0,065	близка к параб.	1,400	гипербола
13	1,5	34,5	4,85	45,5	-0,270	эллипс	0,521	гипербола
14	1,55	34,5	4,8	43	0,020	близка к параб.	0,797	гипербола
15	1,45	30,5	4,25	40	0,906	гипербола	0,943	гипербола
16	1,45	31,5	4,2	38	0,497	гипербола	1,248	гипербола
17	1,5	34	4,45	40	-0,105	эллипс	1,053	гипербола
18	1,5	33,5	4,45	39,5	0,065	близка к параб.	1,130	гипербола
19	1,35	31,5	4,05	39	-0,232	эллипс	0,977	гипербола
20	1,4	31,5	4	38	0,159	близка к параб.	1,120	гипербола
21	1,5	33,5	4,45	42,5	0,065	близка к параб.	0,692	гипербола
22	1,5	33	4,4	42	0,239	гипербола	0,733	гипербола
23	1,35	30	3,9	37	0,436	гипербола	1,237	гипербола
24	1,4	30,5	3,85	37	0,582	гипербола	1,197	гипербола

Далее опишем вкратце методику нахождения параметров A и B , входящих в формулу площади поверхности.

Пусть H - высота переднего сегмента глаза, измеренного на данном диаметре d , α - измеряемый угол между касательной и перпендикуляром, опущенным из точки $(H, d/2)$ на ось Ox , β - угол между касательной и положительным направлением оси Ox , связанный с α соотношением $\beta = 90^\circ - \alpha$.

Тогда

$$y(H) = \sqrt{AH + BH^2} = \frac{d}{2}, \quad y'(H) = \operatorname{tg} \beta = \frac{A + 2BH}{2\sqrt{AH + BH^2}} = \frac{A + 2BH}{d}$$

В результате получим систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных параметров A и B :

$$\begin{cases} AH + BH^2 = \frac{d^2}{4}, \\ A + 2BH = d \cdot \operatorname{tg} \beta \end{cases}$$

Так как определитель этой системы

$$\Delta = \begin{vmatrix} H & H^2 \\ 1 & 2H \end{vmatrix} = H^2 \neq 0,$$

то система имеет единственное решение, которое находим по формулам Крамера:

$$\begin{cases} A = \frac{\Delta_A}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} \frac{d^2}{4} & H^2 \\ d \cdot \operatorname{tg} \beta & 2H \end{vmatrix}}{H^2} = \frac{d}{H} \left(\frac{d}{2} - H \cdot \operatorname{tg} \beta \right), \\ B = \frac{\Delta_B}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} H & \frac{d^2}{4} \\ 1 & d \cdot \operatorname{tg} \beta \end{vmatrix}}{H^2} = \frac{d}{H^2} \left(H \cdot \operatorname{tg} \beta - \frac{d}{4} \right) \end{cases}$$

Результаты измерений параметров 75 глаз (40 глаз) и рассчитанные на их основе показатели представлены в таблице 2.

Необходимо отметить, что величина площади локальной вакуум-компрессии S_{vac} под присоской полностью определяется высотой H_{16} сегмента переднего отдела глаза и углом $\angle 16$ между контуром сечения боковой поверхности сегмента и диаметром его основания в точке их пересечения, которые вместе характеризуют степень выпуклости переднего отдела глаза.

Коэффициенты корреляции между S_{vac} с одной стороны, и H_{16} и $\angle 16$, с другой стороны, равны соответственно 0,95 и 0,94 ($p < 0,05$). Корреляционная связь не обнаружена между длиной ПЗО и H_{16} ($r = -0,09$), дли-

Таблица 2. Измеренные параметры и рассчитанные показатели переднего отдела 75 глаз (40 пациентов)

Параметр	M±σ	Min	Max	V _R (%)
Сферический эквивалент клинической рефракции глаза (дптр)	-0,96± 3,10	-12,37	4,25	
Длина ПЗО (мм)	23,9±1,35	21,0	27,5	27,0
Радиус глазного яблока $R = ПЗО / 2$ (мм)	11,95±0,67	10,51	13,73	27,0
Радиус центральной кривизны роговицы (мм)	7,77±0,25	7,34	8,37	13,3
Высота сегмента переднего отдела глаза H от вершины роговицы до его основания диаметром 16,00 мм (мм)	4,21±0,18	3,80	4,85	24,9
∠16 (град.) на диаметре 16,00 мм	38,2±2,1	33,5	45,5	31,4
Площадь локальной вакуум-компрессии S_{vac} под вакуум-присоской с внутренним диаметром 16,5 мм (мм ²)	255,3±4,4	247,3	271,4	9,4
Площадь локальной вакуум-компрессии в квадрате S_{vac}^2 (мм ⁴)	65219±2246	61147	73641	19,2
Выражение $\frac{S_{vac}^2}{R^4}$	3,30±0,93	1,76	5,32	107,9

ной ПЗО и ∠16 ($r=-0,06$). Отмечается слабая отрицательная корреляционная связь ($r=-0,34$) между S_{vac} и радиусом центральной кривизны роговицы ($p<0,05$).

Опираясь на полученные данные, рассчитаем для присоски новой конструкции теоретическое значение коэффициента конвертации степени локальной вакуум-компрессии в уровень повышения ВГД применительно к глазу среднего размера с длиной ПЗО 23,9 мм и со средней площадью переднего сегмента глаза под вакуум-присоской 255,3 мм² и его крайние возможные значения (по результатам обследования 75 глаз).

В расчётах будем использовать коэффициент β , который можно вычислить по данным зависимости уровня повышения ВГД от степени локальной вакуум-компрессии, полученным Ernest J.T. с соавторами при использовании вакуум-присоски в виде колпачка с внутренним диаметром 13,0 мм, устанавливаемой на склере с височной стороны от роговицы [9]. Возможность использования этого коэффициента β для вакуум-присоски новой конструкции основана на допущении, что его величина определяется только формой участка локальной вакуум-компрессии, которая у обоих вакуум-присосок является круглой или близкой к ней.

При проведении ОППГ по Gee W. [10] на 40 глазах пациентов Ernest J.T. с соавторами установили, что величина градиентного спуска для линейной регрессии между степенью локальной вакуум-компрессии в пределах от 100 до 300 мм рт. ст. и уровнем повышения ВГД варьировала от 0,148 до 0,318 (SD=0,041) со средним значением 0,248, хотя во всех случаях коэффициент корреляции был очень высоким ($r>0,96$) с достоверностью $p<0,02$.

Градиентный спуск для линейной регрессии между степенью локальной вакуум-компрессии и уровнем повышения ВГД фактически является индивидуальным для каждого глаза коэффициентом конвертации K. При допущении, что среднее значение градиентного спуска 0,248 соответствует среднему размеру глаза с длиной ПЗО 24,0 мм (соответственно радиусом $R=12,0$ мм), рассчитаем по формуле (2) величину постоянного коэффициента β для присоски с внутренним диаметром 13,0 мм.

Для глаза с длиной ПЗО 24,0 мм величина площади локальной вакуум-компрессии S_{vac} под присоской с внутренним диаметром 13,0 мм, устанавливаемой на склере глазного яблока с височной стороны от роговицы (рис. 5, а), будет равна площади поверхности шарового сегмента радиусом $R=12,0$ мм с радиусом основания $r=13,0/2=6,5$ мм:

$$S_{vac} = 2\pi R \cdot (R - \sqrt{R^2 - r^2}) = 2 \cdot 3,14 \cdot (12 - \sqrt{12^2 - 6,5^2}) = 143,94 \text{ (мм}^2\text{)}$$

Искомое значение коэффициента β для присоски с внутренним диаметром 13,0 мм согласно формуле (3) будет равняться:

$$\beta = \frac{K \cdot R^4}{S_{vac}^2} = \frac{0,248 \cdot 12^4}{143,94^2} = \frac{0,248 \cdot 20736}{20718} = 0,248 \approx 0,25$$

В свою очередь, зная коэффициент β для круглой формы участка локальной вакуум-компрессии, по формуле (3) легко вычислить индивидуальный коэффициент конвертации K степени локальной вакуум-компрессии в уровень повышения ВГД для каждого из 75 глаз в случае применения вакуум-присоски новой конструкции (рис. 5, б).

Из таблицы 1 видно, что для выборки из 75 глаз среднее значение выражения

$$\frac{S_{vac}^2}{R^4}$$

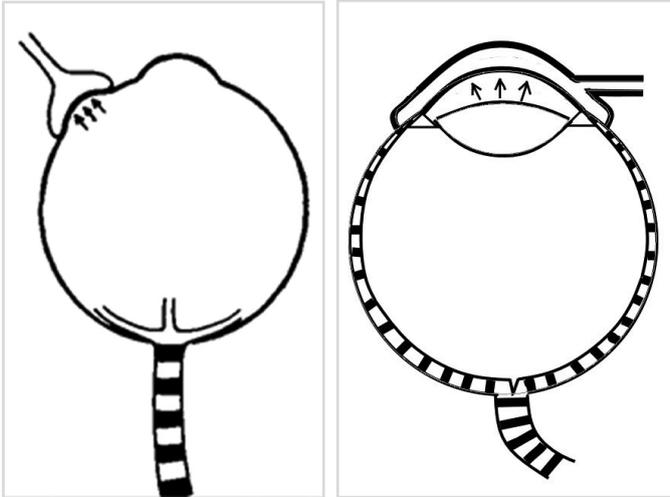


Рис. 5. Положение присоски на глазном яблоке при ОППГ по Gee W. (а) и импедансной ОППГ по Ковальчуку А.Г. (б). Пульсирующий кровоток в артериальных сосудах до уровня, на котором определяется ПДГ, отмечен поперечной штриховкой

составляет 3,3 с максимальным значением 5,32 и минимальным - 1,76. Подставив в формулу (3) вычисленное значение коэффициента β , получим среднюю величину коэффициента конвертации K , равную 0,83, с размахом вариации от 0,44 до 1,33 (коэффициент осцилляции 107%). При использовании в вычислении уровня повышения ВГД усреднённого коэффициента конвертации 0,83 без учёта вариабельности анатомических параметров глазного яблока максимальная возможная ошибка может составить от -47 % до +60 %. Отсутствие корреляционной связи ($r=-0,09$) между радиусом глазного яблока R и площадью локальной вакуум-компрессии S_{vac} указывает на необходимость учёта в расчётах уровня подъёма ВГД значений обеих независимых переменных.

По расчётам Любимова Г.А., при введении внутрь тонкостенной сферической оболочки радиусом 12 мм, имеющей характерные для глаза человека модуль упругости Юнга и толщину, дополнительного объёма жидкости ΔV от 10 до 100 мм³ избыточное давление внутри неё линейно повышается от 10 до 100 мм рт. ст. [11]. Оценим усреднённую по площади величину прогиба склеральной оболочки в области локальной вакуум-компрессии \bar{f} при максимальном повышении ВГД на 35 мм рт. ст. Это повышение ВГД необходимо для измерения диастолического ПДГ в метартериолах, которое наблюдается в норме. Согласно вышеприведённым расчётам для этого нужно дополнительно ввести внутрь глаза (в нашем случае переместить) 35 мм³ жидкости.

В предыдущих работах было показано [1, 2, 3], что объём перемещённой жидкости ΔV при локальной вакуум-компрессии равен произведению площади участка локальной вакуум-компрессии S_{vac} на усреднённую по всей площади воздействия высоту прогиба склеральной оболочки глаза \bar{f} :

$$\Delta V = S_{vac} \cdot \bar{f}$$

Следовательно, усреднённая по всей площади воздействия высота прогиба склеральной оболочки глаза \bar{f} для глаза диаметром 24,0 мм со средней площадью переднего сегмента глаза составит:

$$\bar{f} = \frac{\Delta V}{S_{vac}} = \frac{35}{255,3} = 0,14 \text{ (мм)}$$

Расчёты показывают, что деформация корнео-склеральной оболочки глаза \bar{f} в месте локальной вакуум-компрессии относится к малым, поскольку её величина на два порядка меньше диаметра глазного яблока и в процентном отношении составляет.

$$\frac{0,14}{24,0} \cdot 100\% = 0,6\%$$

В работе Elsheikh A. с соавторами на основе кератотопографических исследований формы роговицы в процессе двукратного повышения ВГД с помощью аппланационного офтальмометра, было установлено, что наибольший по высоте прогиб роговицы кпереди отмечается на периферии у лимба в кольцевой зоне шириной 2,5 мм, в то время как форма центральной зоны роговицы диаметром 8 мм сохраняется практически неизменной [12]. По мнению авторов сохранение стабильности формы центральной зоны роговицы диаметром 8 мм обусловлено более высокой жёсткостью, связанной с радиальным расположением коллагеновых волокон, в то время как на периферии роговицы жёсткость снижена из-за циркулярного расположения коллагеновых волокон. По нашему мнению, не меньшее значение в более высоком прогибе корнео-склеральной оболочки в области лимба и перилимбальной зоне склеры может играть её уплощённость (большой радиус кривизны) по сравнению с более выпуклой центральной зоной роговицы. Согласно закону Лапласа, при прочих равных условиях в уплощённом участке оболочки возникает более высокая локальная напряжённость, вследствие чего он испытывает большую деформацию и прогиб [13].

За счёт сохранения кривизны центральной зоны роговицы неизменной прогиб всего участка вакуум-компрессии относительно исходной формы будет относительно равномерным по высоте по всей площади. Малый по величине и равномерный по площади вакуум-компрессии локальный прогиб корнео-склеральной оболочки в соответствии с законом Гука обеспечивает высокую линейность конвертации степени приложенного вакуума VAC в уровень повышения ВГД.

При допущении, что величина коэффициента β определяется только формой участка локальной вакуум-компрессии, формула (1) зависимости уровня повышения ВГД от степени приложенного вакуума VAC при круглой форме участка локальной вакуум-компрессии примет следующий вид:

$$P - P_0 = 0,25 \cdot \frac{S_{vac}^2}{R^4} \cdot VAC \quad (4)$$

Согласно этой формуле при использовании вакуум-присоски новой конструкции со средним внутренним диаметром 16,5 мм для повышения ВГД на 35 мм рт. ст. до характерного для нормы уровня диастолического ПДГ на глазу любых размеров (если считать выборку из 75 глаз репрезентативной) при расчётном коэффициенте конвертации от 0,44 до 1,33 (в среднем 0,83) требуется создать под присоской вакуумное разрежение от 26 до 79,5 мм рт. ст. (в среднем около 42 мм рт. ст.), что не представляет технических трудностей.

По сканограммам переднего отдела глаза было установлено, что основание ПСГ16 на 61 глазах (81%) располагалось на уровне иридоцилиарной борозды, являющейся передним краем цилиарного тела. У этих пациентов новая присоска с внутренним диаметром 16,0 мм в секторах с реографическими электродами обеспечивает расположение этих электродов точно над цилиарным телом. На 14 глазах (19%) основание ПСГ16 пересекало отростчатую часть цилиарного тела на уровне от её передней трети до заднего края. Это обусловлено меньшим диаметром роговицы и соответствующим ему уменьшенным внутренним диаметром кольца цилиарного тела, в этом случае необходимо использовать присоску меньшего диаметра.

Обсуждение результатов

Предложенная математическая модель формы поверхности переднего отдела глаза может быть существенно усовершенствована, если будут проведены измерения и вычисления асферичности глаза по нескольким меридианам на разных диаметрах. Тогда и рассчитываемые значения площади поверхности переднего отдела глаза будут намного точнее. Такие измерения с высокой точностью можно осуществить при помощи бесконтактных методов исследования топографии переднего отдела глаза на приборах Pentacam и ОСТ.

Если в результате расчётов по формуле (4) средняя величина ПДГ при проведении импедансной ОППГ на здоровых глазах будет существенно отличаться от 35 мм рт. ст., необходимо соответствующим образом откорректировать значение коэффициента β . Необходимость коррекции будет свидетельствовать о том, что расчётное значение коэффициента β имеет погрешность, связанную с неточным предположением о среднем размере глаза у 40 пациентов в исследовании Ernest J. T. с соавторами [8], или существуют ещё какие-то факторы, кроме формы участка локальной вакуум-компрессии, оказывающие влияние на эффективность конвертации степени приложенного вакуума VAC в уровень повышения ВГД.

Уверенность в том, что зависимость между степенью локальной вакуум-компрессии и уровнем повышения ВГД при его значениях выше 30 мм рт. ст. носит линейный характер, основана на двух

экспериментальных фактах. Во-первых, Downs J.C. с соавторами в эксперименте показали, что величина деформация склеры при уровне ВГД выше физиологических значений (≥ 30 мм рт. ст.) становится пропорциональной уровню повышения ВГД и объяснили это эффектом выпрямления скрученных коллагеновых волокон склеры [14]. Во-вторых, Ernest J. T. с соавторами при осуществлении локальной вакуум-компрессии 40 глаз пациентов с одновременным измерением уровня ВГД тонометром Гольдмана установили, что у каждого пациента коэффициент конвертации степени локальной вакуум-компрессии в пределах от 100 до 300 мм рт. ст. в уровень повышения ВГД характеризовался очень высокой стабильностью [8]. Индивидуальное для каждого пациента значение коэффициента конвертации во всех случаях сохранялось прежним при повторном исследовании пациентов через 15 минут.

Учёт анатомических размеров глаза позволит существенно повысить точность вычисления уровня повышения ВГД от степени локальной вакуум-компрессии глазного яблока, что в свою очередь обеспечит возможность измерения диастолического ПДГ при импедансной ОППГ с высокой чувствительностью и точностью.

Выводы

1. На основании математического моделирования геометрической формы поверхности роговицы с окружающей её перилимбальной зоной склеры, выполненного по данным УБМ переднего отдела, установлено, что асферичность поверхности переднего отдела глаза в горизонтальном меридиане усиливается (его эксцентриситет увеличивается) по мере удаления от центральной зоны роговицы на периферию с последовательным переходом кривизны горизонтального меридиана из эллипса через параболу в гиперболу. Во всех случаях наилучшим приближением кривизны горизонтального меридиана переднего сегмента глаза с диаметром основания 16,00 мм является гипербола.

2. Площадь локальной вакуум-компрессии под новой присоской для импедансной ОППГ полностью определяется высотой сегмента переднего отдела глаза с диаметром основания 16,5 мм и величиной угла между контуром сечения боковой поверхности сегмента и диаметром его основания в точке их пересечения, которые совместно характеризуют степень выпуклости переднего отдела глаза.

3. Среднее значение площади локальной вакуум-компрессии под новой присоской, рассчитанное по формуле площади поверхности сегмента гиперболоида вращения, составило $255,3 \pm 4,4$ мм² с размахом вариации от 247,3 до 271,4 мм². Коэффициент осцилляции квадрата площади локальной вакуум-компрессии под новой присоской, входящего в качестве члена в формулу расчёта уровня повышения ВГД от степени приложенного вакуума, составил 19,2%. Большой размах вариации обуславливает необходимость учёта

этого параметра для повышения точности расчёта уровня подъёма ВГД.

4. Отсутствие корреляционной связи ($r=-0,09$) между длиной ПЗО и площадью локальной вакуум-компрессии обуславливает необходимость учёта обеих переменных при расчёте уровня повышения ВГД от степени приложенного вакуума.

5. Значение коэффициента β для склеральной присоски с внутренним диаметром 13,0 мм, рассчитанное по данным Ernest J.T. с соавторами, оказалось равным 0,248. Расчёт сделан на основе предположения, что вычисленное авторами среднее значение градиентного спуска для линейной регрессии между степенью приложенного вакуума и уровнем подъёма ВГД соответствует среднему диаметру глазного яблока 24,0 мм. При допущении, что значение коэффициента β является константой и определяется только формой участка локальной вакуум-компрессии, оно может быть использовано в расчётах уровня повышения ВГД для новой присоски.

6. Рассчитанное на основе индивидуальных сочетаний площади локальной вакуум-компрессии и размера глазного яблока среднее значение коэффициента конвертации степени приложенного вакуума в уровень повышения ВГД для присоски новой конструкции (при использовании в его вычислении коэффициента $\beta=0,25$) составило 0,83 с размахом вариации от 0,44 до 1,33. Соответственно для повышения ВГД на 35 мм рт. ст. до характерного для нормы уровня диастолического ПДГ требуется создать под присоской вакуумное разрежение в среднем около 42 мм рт. ст. (от 26 до 79,5 мм рт. ст.).

7. Относительно малый прогиб корнео-склеральной оболочки глаза в месте локальной вакуум-компрессии (0,6% от длины ПЗО), рассчитанный для глаза диаметром 24,0 мм при максимальном повышении ВГД на 35 мм рт. ст., в соответствии с законом Гука, обеспечивает высокую линейность конвертации степени приложенного вакуума в уровень повышения ВГД.

8. Новая присоска, имеющая в секторах с реографическими электродами внутренний диаметр 16,0 мм, в 81% случаев (у пациентов со средним диаметром роговицы) обеспечивает расположение этих электродов точно над цилиарным телом. Для глаз с большим или меньшим диаметром роговицы соответственно потребуется присоска большего или меньшего размера.

9. При расчёте уровня повышения ВГД от степени приложенного вакуума с применением усреднённого коэффициента конвертации 0,83 без учёта анатомических параметров глазного яблока максимальная возможная ошибка может составить от -47 % до +60 %. Использование индивидуального коэффициента конвертации в зависимости от анатомических параметров глазного яблока обеспечит возможность измерения диастолического ПДГ при импедансной ОППГ с высокой чувствительностью и точностью.

Список используемых сокращений

ВГД – внутриглазное давление,
ПДГ – перфузионное давление глаза,
ПЗО – передне-задняя ось глаза,
ПСТх – передний сегмент глаза с диаметром основания «х»,
РОГ – реоофтальмограмма,
ОППГ – офтальмопневмоплетизмография,
УБМ – ультразвуковая биомикроскопия.

Литература

1. Ковальчук А. Г. Теоретическое обоснование нового способа диагностики микроциркуляторной ишемии цилиарного тела // Глаукома. – 2017. – Т.16(4). – С. 69-78.
2. Ковальчук А. Г. Обоснование возможности диагностики микроциркуляторной ишемии цилиарного тела с помощью нового метода импедансной офтальмопневмоплетизмографии // Офтальмол. журн. – 2018. – №3. – С.85-97.
3. Ковальчук А. Г. Обоснование нового способа диагностики микроциркуляторной ишемии цилиарного тела путём определения пониженного уровня диастолического перфузионного давления в его метартериолах // Биофизика. – 2018. – Т.63(3) – С. 812-824.
4. Пат. 112192 Україна. МПК А61В 5/1477. Пристрій для вимірювання величини перфузійного тиску в регіональній системі мікроциркуляції цилиарного тіла неінвазивним методом / Ковальчук О. Г.; патентовласник: Держ. установа "Інститут ОХ і ТТ ім. В. П. Філатова НАМН України". – u201605264; заявл. 16.05.2016; опубл. 12.12.2016, Бюл. №23.
5. Пат. 131602 Україна МПК А61В 5/1477. Пристрій для імпедансної офтальмопневмоплетизмографії / Ковальчук О. Г.; патентовласник: Ковальчук О. Г. - u201807455; заявл. 03.07.2018; опубл. 25.01.2019, Бюл. №2.
6. Вит В. В. Строение зрительной системы человека. – Одесса : Астропринт, 2003. – 664 с.
7. Mandell R. B. Mathematical model of the corneal contour // R.B. Mandell, St R. Helen // Br. J. Physiol. Opt. – 1971 – V.26. – P. 183-197.
8. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. – Москва: Наука, 1966. – 608 с.
9. Ernest J. Terry. Ocular hypertension induced by scleral suction cup // J. Terry Ernest, Desmond Archer, Alex E. Krill // Investigative Ophthalmology. – 1972. – V.11(1). – P. 29-34.
10. Gee W. Noninvasive diagnosis of carotid occlusion by ocular pneumoplethysmography //William Gee, Dale W. Oller, Edwin J. Wyllie. // Stroke. – 1976. – V.7. – P. 18-21.
11. Любимов Г. А. О роли ригидности оболочки глазного яблока в процессе формирования внутриглазного давления // Глаукома. – 2006. – № 2. – С. 64-67.
12. Elsheikh A. In vivo study of corneal responses to increased intraocular pressure loading // A. Elsheikh, C. W. McMonnies, C. Whitford, G. C. Boneham // Eye and Vision. – 2015. – V.2(20).
13. Chung C. W. Use and Misuse of Laplace's Law in Ophthalmology // C. W. Chung, J. A. Michael, M. J. Girard, N. J. Jan, I. A. Sigal // Invest Ophthalmol Vis Sci. – 2016. – V.57(1). – P. 236-45.
14. Downs J. C. Mechanical environment of the optic nerve head in glaucoma //J. C. Downs, M. D. Roberts, C. F. Burgoyne // Optom Vis Sci. – 2008. – V.85(6). – P. 425-35.

Приложение №1

Вывод уточнённой формулы локальной вакуум-компрессии глазного яблока

Г. А. Любимов в 2006 году [11] применительно к математической модели глазного яблока в виде тонкостенной сферической оболочки с биомеханическими параметрами человеческого глаза приводит формулу, связывающую уровень повышения давления внутри сферы с объёмом дополнительно введенной внутрь жидкости:

$$\Delta P = \frac{0.73 \cdot 10^4 \cdot E \cdot t}{\pi \cdot R^4} \cdot \Delta V, \quad (1)$$

где ΔP – избыточное над атмосферным давление внутри сферы (мм рт. ст.), E – модуль Юнга для материала оболочки в мегапаскалях (10-15 МПа), $0,73 \cdot 10^4$ – коэффициент конвертации МПа в мм рт. ст., t – толщина сферической оболочки в мм (0,5-1,0 мм), ΔV – увеличение объёма жидкости внутри сферы в мм³ (10-100 мм³), R – радиус сферической оболочки в мм.

Механизмы повышения ВГД при введении дополнительного объёма жидкости внутрь глазного яблока и при локальной вакуум-компрессии склеральной оболочки различны. В первом случае повышение ВГД обусловлено увеличением объёма внутриглазной жидкости внутри сферической склеральной оболочки с незначительным увеличением её радиуса при неизменной её форме. Во втором случае повышение ВГД обусловлено незначительным локальным изменением формы сферической оболочки при неизменном объёме внутриглазной жидкости.

При условии, что повышение ВГД не приводит к изменению формы глазного яблока вне участка локальной вакуум-компрессии, можно рассматривать перемещение небольшого объёма жидкости под деформированный воздействием вакуума участок склеры, как добавление перемещённого объёма жидкости к общему объёму глаза с равномерным очень небольшим увеличением радиуса глазного яблока по всем направлениям, и использовать формулу (1) для вывода формулы зависимости уровня повышения ВГД от степени локальной вакуум-компрессии глаза. Точно так же, как при введении внутрь сферической оболочки дополнительного объёма жидкости, воздействие вакуумного разрежения на локальный участок склеры будет распределяться по всей площади склеральной оболочки глаза, благодаря скольжению гладких краёв вакуум-компрессионного кольца по конъюнктиве глаза со свободным перемещением подлежащей склеры, которая в направлении её толщины является в первом приближении мягкой оболочкой, под кольцо.

Очевидно, что объём перемещённой жидкости ΔV в этом случае будет равен произведению площади участка локальной вакуум-компрессии S_{vac} на осреднённую по всей площади воздействия высоту прогиба склеральной оболочки глаза \bar{f} :

$$\Delta V = S_{vac} \cdot \bar{f} \quad (2)$$

Осреднённая по площади воздействия высота прогиба склеральной оболочки глаза \bar{f} будет прямо пропорциональна площади участка локальной вакуум-компрессии S_{vac} и уровню приложенного вакуума VAC , взятыми с дополнительным коэффициентом β , и обратно пропорциональна величине модуля Юнга E и толщине склеры t (при их увеличении вакуумное разрежение в меньшей степени деформирует более жёсткую склеральную оболочку). Коэффициент β учитывает разную эффективность прогиба склеральной оболочки в зависимости от формы участка локальной вакуум-компрессии.

$$\bar{f} = \frac{\beta \cdot S_{vac} \cdot 0.73 \cdot 10^4 \cdot VAC}{E \cdot t} \quad (3)$$

где \bar{f} – прогиб склеральной оболочки (мм), β – коэффициент, учитывающий эффективность прогиба склеральной оболочки в зависимости от формы участка локальной вакуум-компрессии, S_{vac} – площадь участка локальной вакуум-компрессии (мм²), VAC – степень локальной вакуум-компрессии (мм рт. ст.), E – модуль Юнга для материала оболочки в мегапаскалях (10-15 МПа), $0,73 \cdot 10^4$ – коэффициент конвертации МПа в мм рт. ст. t – толщина сферической оболочки (мм),

Формула (3) является частным случаем применения закона Гука – основного закона теории упругости, выражающего линейную зависимость между напряжениями и малыми деформациями в упругой среде.

Деформация оболочки глаза в месте локальной вакуум-компрессии относится к малым, поскольку максимальный объём перемещаемой жидкости (100 мм³) в глазу средних размеров диаметром 24 мм составляет менее 1,4% его объёма. Согласно закону Гука в простейшем случае формула деформации упругого стержня в зависимости от приложенной силы имеет вид:

$$\Delta l = F/k, \quad (4)$$

где Δl – абсолютное удлинение (укорочение) стержня, F – сила, с которой растягивают (сжимают) стержень, k – коэффициент упругости (жёсткости).

Сопоставим формулы (3) и (4). Высота прогиба оболочки глаза \bar{f} в области локальной вакуум-компрессии в формуле (3) соответствует величине линейной деформации Δl , выражение $S_{vac} \cdot VAC$ в числителе – силе F , с которой вакуум действует на участок локальной вакуум-компрессии, выражение $E \cdot t$ в знаменателе – коэффициенту упругости (жёсткости) тонкостенной сферической оболочки, заполненной жидкостью.

Дополнительный коэффициент β в формуле (3) учитывает то, что деформируемое упругое тело является наполненной жидкостью упругой тонкостенной сферической оболочкой, высота прогиба которой на

участке локальной вакуум-компрессии при прочих равных условиях определяется формой этого участка. Круглая форма участка вакуум-компрессии является наиболее эффективной, поскольку обеспечивает по краю максимально возможное для данной площади одинаковое по величине натяжение сферической оболочки. Например, под круглой присоской диаметром 13 мм градиент повышения уровня ВГД от степени приложенного вакуума равен в среднем 0,248 [9]. Для вакуум-компрессионного кольца с внутренним диаметром 12 мм и наружным диаметром 20 мм, используемого при проведении операции лазерного кератомилеза (LASIK), для подъёма уровня ВГД на 50 мм рт. ст. от 15 до 65 мм рт. ст. требуется вакуум величиной не менее 500 мм рт. ст. В этом случае градиент повышения уровня ВГД от степени приложенного вакуума составляет около 0,1. При этом на глазу диаметром 24 мм площадь вакуум-компрессии под вакуум-компрессионным кольцом (218,5 мм²) в 1,5 раза больше, чем под круглой присоской (143,3 мм²).

Подставив высоту прогиба склеральной оболочки глаза \bar{r} в формулу (2), объём перемещённой жидкости ΔV можно представить в виде следующей формулы:

$$\Delta V = \frac{\beta \cdot S_{vac}^2 \cdot 0.73 \cdot 10^4 \cdot VAC}{E \cdot t} \quad (5)$$

Подставив в формулу (1) вместо ΔV полученное выражение и сделав сокращения одинаковых чисел и переменных в числителе и знаменателе, получим:

$$\Delta P = \beta \cdot \frac{S_{vac}^2 \cdot VAC}{\pi \cdot R^4} \quad (6)$$

Заменив ΔP в формуле (6) на разность текущего и исходного внутриглазного давления $P - P_0$, получим формулу зависимости уровня повышения ВГД от степени локальной вакуум-компрессии глаза VAC:

$$P - P_0 = \beta \cdot \frac{S_{vac}^2 \cdot VAC}{R^4}, \quad (7)$$

где P – текущий уровень ВГД в процессе локальной вакуум-компрессии глазного яблока (мм рт. ст.), P_0 – ВГД до применения локальной вакуум-компрессии (мм рт. ст.), β – коэффициент, учитывающий изменение эффективности прогиба склеральной оболочки в зависимости от формы участка локальной вакуум-компрессии, S_{vac} – площадь участка локальной вакуум-компрессии (мм²), VAC – степень приложенного вакуума (мм рт. ст.), R – радиус глазного яблока (половина длины передне-задней оси глаза) (мм).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, которые могли бы повлиять на их мнение относительно предмета или материалов, описанных и обсуждаемых в данной рукописи.

Поступила 19.11.2019

Оцінка варіації ефективності локальної вакуум-компресії очного яблука за допомогою нової присоски для імпедансної офтальмопневмоплетізографії в залежності від анатомічних параметрів ока

Ковальчук О. Г., Потапенко І. В.

ДУ «Інститут очних хвороб і тканинної терапії ім. В.П. Філатова НАМН України; Одеса (Україна)

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова; Одеса (Україна)

Вивчено вплив розміру очного яблука і опуклості його переднього відділу на ефективність локальної вакуум-компресії очного яблука за допомогою нового присоска для імпедансної офтальмопневмоплетізографії. На основі математичного моделювання геометричної форми переднього відділу 75 очей за даними ультразвукової біомікроскопії встановлено, що найкращим наближенням кривизни горизонтального меридіана переднього сегмента ока з діаметром основи 16,00 мм в усіх випадках виявилася гіпербола. Площа поверхні під новою присоскою з внутрішнім діаметром близько 16,5 мм була розрахована за формулою площі

поверхні сегмента гіперboloїда обертання, повністю визначалась опуклістю переднього відділу ока і варіювала від 247,3 до 271,4 мм². Коефіцієнт конвертації ступеня прикладеного вакууму в рівень підвищення внутрішньоочного тиску, розрахований на основі індивідуальних поєднань площі локальної вакуум-компресії і розміру очного яблука, склав в середньому 0,83 з розмахом варіації від 0,44 до 1,33. Використання індивідуального коефіцієнта конвертації в залежності від анатомічних параметрів очного яблука забезпечить можливість вимірювання діастолічного перфузійного тиску ока з високою чутливістю і точністю.

Ключові слова: імпедансна офтальмопневмоплетізографія (ОППГ), математичне моделювання форми переднього сегмента ока, внутрішньоочний тиск (ВОТ), перфузійний тиск ока (ПТО), локальна вакуум-компресія очного яблука, ультразвукова біомікроскопія (УБМ).