

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНУТРИГЛАЗНОГО ДАВЛЕНИЯ ПО ДАННЫМ КОРНЕОТОПОГРАФИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Ахметов Н.Р.*¹, Самойлов А.Н.^{1,2}, Усов В.А.²

DOI: 10.25881/20728255_2023_18_4_32

¹ ГАУЗ «РКОБ МЗ РТ им. проф. Е.В. Адамюка», Казань

² ФГБОУ ВО «Казанский государственный медицинский университет», Казань

Резюме. Обоснование. В большинстве стран мира остаются популярными аппланационные тонометры, такие как тонометры Маклакова и Гольдмана. При измерении офтальмотонуса такие тонометры получают значения ВГД опосредованно через роговицу, что безусловно вносит свои погрешности в результаты измерения. Создание методик измерения ВГД, отличных от ныне существующих, является актуальным.

Цель — создать новую методику определения ВГД без проведения тонометрии, опираясь на показатели индивидуального профиля роговицы с ее параметрами, индексами и данными авторефрактометрии.

Материалы и методы. Проведен статистический анализ показателей корнеотопографа (ALLEGRO Topolyzer Wavelight Topolyzer VARIO), данных авторефрактометра (аппарата TONOREF Nidek) и данных тонометрического внутриглазного давления с использованием тонометра Маклакова (НГМ2-«ОФТ-П») у 500 пациентов (1000 глаз). Среди выборочной совокупности были пациенты как с эмметропической рефракцией — 8 глаз (0,8%), так и пациенты с аномалиями рефракции 992 глаза (99,2%), среди них: 978 глаз (97,8%) имели миопическую рефракцию 14 (1,4%) глаз имели изолированно рефракцию с миопическим астигматизмом. 889 глаз (88,9%) сочетали миопическую рефракцию с миопическим астигматизмом.

Результаты. На основании проведенного анализа корнеотопографических показателей, значений авторефрактометрии и тонометрического ВГД 500 пациентов (1000 глаз), нами создана новая методика определения внутриглазного давления без проведения тонометрии, представленная в виде математической модели: $Pt\text{ corneotopographic} = 58,9 - 0,07 \times SPH - 0,19 \times CYL - 0,37 \times \log_2(IVA) - 30 \times CKI - 1,26 \times Rmin$.

Ключевые слова: корнеотопография, роговица, определение внутриглазного давления, тонометрия.

Введение

Определение внутриглазного давления (ВГД) является неотъемлемой составляющей диагностики патологии глаза в профессиональной деятельности врача-офтальмолога. В мировой практике для получения более достоверных значений ВГД, как правило, используют аппланационные тонометры Маклакова и Гольдмана [1].

Тонометрия — это стандартная процедура, используемая офтальмологами для измерения ВГД с помощью различных методов измерения [2]. Приборы для измерения ВГД предполагают, что глаз представляет собой закрытый шар с равномерным и равнонаправленным давлением, которое распределено по всей передней камере и полости стекловидного тела [2]. В действительности, глаз не изолированная сферическая структура, у глаза есть ткани, которые имеют свою плотность, у различных людей эти параметры могут отличаться, а сосудистая оболочка глаза ещё передает пульсацию от сердечно-сосудистой системы.

THE METHOD FOR DETERMINING INTRAOCULAR PRESSURE ACCORDING TO CORNEOTOPOGRAPHIC INDICATORS

Ahmetov N.R.*¹, Samoylov A.N.^{1,2}, Usov V.A.²

¹ The Republican Clinical Ophthalmological Hospital, Kazan

² The Kazan State Medical University, Kazan

Abstract. Rationale. In most countries of the world, applanation tonometers remain popular, such as the Maklakov tonometer and the Goldman tonometer. When measuring ophthalmotonus, such tonometers receive IOP values indirectly through the cornea, which certainly introduces its own errors into the measurement results. The creation of methods for measuring IOP different from the currently existing ones is relevant.

Purpose: to create a new method for determining intraocular pressure without tonometry, based on the indicators of the individual profile of the cornea with its parameters, indices and autorefractometry data.

Materials and methods. Statistical analysis of 16 parameters of a corneotopograph (ALLEGRO Topolyzer Wavelight Topolyzer VARIO), data of an autorefractometer (TONOREF Nidek device) and data of tonometric intraocular pressure was carried out using a Maklakov tonometer (НГМ2-«ОФТ-П») in 500 patients (1000 eyes). Among the sample population there were patients with both emmetropic refraction — 8 eyes (0.8%), and patients with refractive errors 992 eyes (99.2%), among them: 978 eyes (97.8%) had myopic refraction 14 (1.4%) eyes had isolated refraction with myopic astigmatism. 889 eyes (88.9%) combined myopic refraction with myopic astigmatism.

Results. Based on the analysis of corneotopographic parameters, autorefractometry values and tonometric IOP of 500 patients (1000 eyes), we have created a new method for determining intraocular pressure without tonometry, presented in the form of a mathematical model: $Pt\text{ corneotopographic} = 58,9 - 0,07 \times SPH - 0,19 \times CYL - 0,37 \times \log_2(IVA) - 30 \times CKI - 1,26 \times Rmin$

Keywords: corneotopography, cornea, determination of intraocular pressure, tonometry.

ВГД — это давление жидкости внутри глаза, являющееся результатом баланса между продукцией камерной влаги, трабекулярным и увеосклеральным оттоком и давлением в эписклеральных венах, поддерживающее его форму и обеспечивающее постоянство циркулирующих питательных веществ, и нормальную трофику внутриглазных тканей [3].

На территории РФ и стран СНГ, самым наиболее используемым методом измерения ВГД является тонометрия по Маклакову, на территории США и большинства стран северной Европы, как правило, используют тонометр Гольдмана, оба тонометра являются аппланационными [1].

Роговица при проведении тонометрии является посредником между тонометром и тем давлением, которое формируется внутри глаза. Точное определение значений офтальмотонуса практически всегда требует учета биомеханических и биометрических свойств роговицы, данных

* e-mail: ahmetovn17@gmail.com

анамнеза о перенесенных заболеваниях роговицы или кераторефракционных операциях, редко у кого роговица имеет абсолютно стандартные параметры, например, среднюю толщину равную 545 микронам. Бубнова И.А. отмечает, что при ослаблении биомеханических свойств роговицы происходит снижение значений ВГД [4].

Г. Йоханнессон с соавт. показывают, что при увеличении кривизны роговицы показатели ВГД снижаются, особенно при измерениях контактными тонометрами [5]. Ш. Маккафферти с соавт. при измерении офтальмотонуса аппланационным тонометром Гольдмана, выявил, что неоднородность слезной пленки роговицы у пациентов может привести к ошибкам при измерении ВГД аппланационными тонометрами [6]. Доказано что, радиус роговицы имеет отрицательную корреляцию с показателями ВГД [7].

На показатели ВГД достоверно определено влияние вязкоупругих и эластических свойства роговицы, таких как, гистерезис и фактора резистентности роговицы. Значения этих показателей имеют прямую положительную связь [8].

Из представленных выше примеров, становится очевидным, что как правило, выделяют отдельные параметры роговой оболочки, которые способны повлиять на точность измерения ВГД, и на основании которых планируется проведение корректировки уже определенного давления. Однако не разработаны подходы определения офтальмотонуса без использования тонометра.

Как правило, для измерения офтальмотонуса используются тонометры, которые механически взаимодействуют с различными частями глазного яблока. Исключением среди контактных тонометров, являются бесконтактные тонометры, или тонометры воздушной затяжки, которые для исследования ВГД выдают струю воздуха, при взаимодействии с роговицей поток воздуха отражается обратно, на основании чего проводится анализ отраженного воздуха. К таким тонометрам относят такие аппараты как: Keeler Pulsair EasyEye, анализаторы глазной реакции (ORA), Corvis ST [1].

Анализаторы глазной реакции (ORA) выдаёт три вида параметра: IOPg — значение ВГД, коррелированное с Гольдманом; CH — параметр гистерезиса роговицы; IOPsc — ВГД с компенсацией роговицы, основанное на учете биомеханических свойств роговицы, таких как параметры эластичности и вязкости [9; 10]. Несмотря на то, что аппарат учитывает гистерезис, эластичность и вязкость роговой оболочки, он не учитывает множество других параметров, например, радиус и индекс вертикальной асимметрии роговицы.

Существует бесконтактный тонометр Corvis ST, в котором реализован замер ВГД с учётом биомеханических показателей роговицы (bIOP). Такие показатели более достоверны при измерении ВГД у пациентов, перенёвших рефракционную хирургию, при которой изменяется толщина роговицы [11]. В данном аппарате создатели попытались реализовать идею использования Шемфлюг-камеры

для учета влияния биомеханических показателей до и после подачи воздушной затяжки. Но при деформации роговицы оценка ее биомеханических и топографических особенностей будет представлять ряд трудностей. Так или иначе, при бесконтактных методах измерения ВГД, происходит аппланация роговицы воздушным потоком. Из-за особенностей строения роговицы трудно описать, как различные участки роговой оболочки проходят свое уплощение, и как внутри сложной, многослойной, анизотропной структуры распространяется чрезвычайно быстрое искривление. Кроме того, аппланация роговицы не протекает на идеально ровной области центральной части роговицы. На этой поверхности всегда есть небольшие неровности [12]. Поэтому вопрос «качества аппланаций роговицы» что для аппарата ORA, что для аппарата Corvis ST остается открытым [13].

Проводя литературный поиск, мы не обнаружили методик, которые бы позволяли без какой-либо механической деформации глаза проводить тонометрию, до разработанной нами математической модели.

Разработка и внедрение методов определения ВГД, отличных от ныне существующих, является безусловно актуальной проблемой на сегодняшний день.

Цель исследования создать новую методику определения ВГД без проведения тонометрии, опираясь на показатели индивидуального профиля роговицы с ее параметрами, индексами и данными авторефрактометрии.

Материал и методы

Исследование проводилось с 01.09.2020 по 01.12.2022 гг. на кафедре офтальмологии в ФГБОУ ВО Казанский ГМУ Минздрава России, на клинической базе ГАУЗ РКОБ МЗ РТ имени профессора Е.В. Адамюка, город Казань. Для исследования использовались данные карт 500 пациентов (1000 глаз), показатели корнеотопографа, данные авторефрактометрии и соответствующие им значения измерения ВГД при тонометрии по Маклакову.

Исследование поверхности роговицы проводилось с использованием аппарата ALLEGRO Topolyzer Wavelight Topolyzer VARIO, Alcon (США), анализировались следующие параметры и индексы, представленные в таблице 1.

Из параметров проведенного авторефрактометрического исследования (аппарата TONOREF Nidek, Япония), анализировались такие показатели как: сферический компонент (SPH) и цилиндрический компонент (CYL) рефракции глаза. При анализе авторефрактометрических

Табл. 1. Анализируемые параметры и индексы роговицы

Название параметра/индекса	описание
Rmin	наименьший радиус кривизны
ISV	индекс вертикальной асимметрии
IVA	индекс вертикальной асимметрии
KI	индекс кератоконуса
CKI	центральный индекс кератоконуса
IHA	индекс высоты (роста) асимметрии
IHD	индекс высоты (роста) децентрации

показателей наибольшее значение для прогнозирования ВГД оказал сферический и цилиндрический компонент рефрактометрии.

Для измерения ВГД использовался тонометр Маклакова, измерение проводилось с предварительной инстилляцией оксидпрокаина 0,4%.

Все данные были систематизированы в программе Microsoft Excel 2016. В исследование были включены лица, достигшие 18 лет. Лица женского пола составили 58% (290 человек), лица мужского пола — 42% (210 человек).

Среди выборочной совокупности, эметропическую рефракцию имели 8 глаз (0,8%), аномалии рефракции были у 992 глаза (99,2%), среди них: 978 глаз (97,8%) имели миопическую рефракцию, 14 (1,4%) глаз имели изолированно рефракцию с миопическим астигматизмом. 889 глаз (88,9%) сочетали миопическую рефракцию с миопическим астигматизмом. Критерием исключения из выборки были любые заболевания глаз, помимо аномалий рефракции.

По данным медицинских карт, также были исключены пациенты, имеющие в анамнезе: травмы органа зрения, рубцы роговицы, любые оперативные вмешательства на органе зрения, наличие подтвержденной глаукомы, наличие других заболеваний глаз, которые могут оказывать влияние на изменение архитектоники роговицы. В частности, были исключены пациенты с эктатическими заболеваниями фиброзной оболочки глаза (кератоконус, кератоглобус и другие) и дистрофическими болезнями роговой оболочки.

Пациенты с хроническими заболеваниями, такие как: сахарный диабет I и II типа, другие заболевания эндокринной системы и лица, имеющие хронические аутоиммунные, а также системные заболеваниями, были исключены из выборки.

В течение недели, перед прохождением комплексного исследования всем пациентам рекомендовалось не использовать контактные линзы, в том числе ортокератологические.

Деления пациентов на какие-либо отдельные группы не проводилось. Полученные данные были структурированы в таблице Microsoft Excel 2016. Для статистических вычислений нами была использована среда R 4.2.2 (R Foundation for Statistical Computing, Вена, Австрия). Для корреляционного анализа использовался коэффициент ранговой корреляции ρ Спирмена с соответствующим 95% доверительным интервалом. Для проведения регрессионного анализа использовались линейные регрессионные модели, регрессоры с правосторонней асимметрией выборочного распределения включались в модели после \log_2 -трансформации (в качестве порогового значения использовалось значение коэффициента асимметрии равное 1,96). Ассоциация считали статистически значимой при $p < 0,05$.

Результаты

Среди всех анализируемых параметров роговицы при статистической обработке и последующем математи-

ческом моделировании по средствам программы R 4.2.2, нами были выделены параметры и индексы коррелирующие с ВГД, которые возможно использовать при создании математической модели для определения ВГД без использования тонометра, таковыми оказались: IVA — индекс вертикальной асимметрии, ρ [95% ДИ: -0,25; -0,13], корреляция по Спирмену $p < 0,001$; Rmin — наименьший радиус кривизны ρ [95% -0,22; -0,10], корреляция по Спирмену $p < 0,001$; SKI — центральный индекс кератоконуса, ρ [95% ДИ: -0,18; -0,06], корреляция по Спирмену $p < 0,001$. При анализе параметров авторефрактометра весомое значение для создания математической модели имел сферический компонент (SPH), несмотря на то, что корреляция с ВГД этого параметра была не самая значительная, ρ [95% ДИ: -0,06; 0,06], корреляция по Спирмену $p < 0,954$ и цилиндрический компонент (CYL), так же, как и корреляция сферического компонента с ВГД, корреляция (CYL) с ВГД, ρ [95% ДИ: -0,12; 0,01], корреляция по Спирмену $p < 0,087$ не самая значительная, но данные параметры имели значение для нашей математической модели.

На основе анализа полученных данных нами создана новая методика определения ВГД без проведения тонометрии, представленная в виде математической модели:

$$P_t \text{ corneotopographic} = 58,9 - 0,07 \times \text{SPH} - 0,19 \times \text{CYL} - 0,37 \times \log_2(\text{IVA}) - 30 \times \text{SKI} - 1,26 \times \text{Rmin}.$$

P_t — это тонометрическое ВГД, а слово «keratotopographic», подразумевает что данное ВГД рассчитывалось на основании параметров кератотопографа, SPH — сферический компонент рефрактометрии, CYL — цилиндрический компонент рефрактометрии, IVA — индекс вертикальной асимметрии, SKI — центральный индекс кератоконуса, Rmin — минимальная сагитальная кривизна (искривление). В данную модель были включены именно те параметры и индексы роговицы, которые имели большую значимость при создании математической модели.

Сферический компонент (SPH) и цилиндрический компонент (CYL), следует подставлять в математическую модель без знака «-», так как при создании модели, в программу вносились данные без знака «-».

Разработанную математическую модель, возможно использовать для предотвращения любых механических воздействий на орган зрения, при исследовании офтальмотонуса. К примеру, модель применима перед эксимерлазерной коррекцией зрения, когда ее проведение необходимо в день предоперационной диагностики и любое механическое воздействие на роговицу, будет недопустимым и приведет к неточностям в исходе операции.

В качестве примера для использования математической модели в практике, можно привести клинические случаи.

Пример №1. У пациента Н. при диагностике были получены следующие показатели: SPH равный -5,5; CYL равный -0,5; IVA равный 0,19; SKI равный 1,01; Rmin равный 7,94.

При подстановке параметров в математическую модель получается следующее:

$$P_t \text{ corneotopographic} = 58,9 - 0,07 \times SPH - 0,19 \times CYL - 0,37 \times \log_2(IVA) - 30 \times SKI - 1,26 \times Rmin = 58,9 - 0,07 \times 5,5 - 0,19 \times 0,5 - 0,37 \times \log_2(0,19) - 30 \times 1,01 - 1,26 \times 7,94 = 19,00212 \text{ мм рт. ст.}$$

Пример №2. У пациента Г. при диагностике были получены следующие показатели: SPH равный -4,5; CYL равный -0,25; IVA равный 0,1; SKI равный 1,01; Rmin равный 7,31.

При подстановке параметров в математическую модель получается следующее:

$$P_t \text{ corneotopographic} = 58,9 - 0,07 \times SPH - 0,19 \times CYL - 0,37 \times \log_2(IVA) - 30 \times SKI - 1,26 \times Rmin = 58,9 - 0,07 \times 4,5 - 0,19 \times 0,25 - 0,37 \times \log_2(0,1) - 30 \times 1,01 - 1,26 \times 7,31 = 20,2560 \text{ мм рт. ст.}$$

Выводы

На основании проведенных корнеотопографических исследований роговицы нами впервые была создана математическая модель: $P_t \text{ corneotopographic} = 58,9 - 0,07 \times SPH - 0,19 \times CYL - 0,37 \times \log_2(IVA) - 30 \times SKI - 1,26 \times Rmin$, которая позволяет определять ВГД без применения тонометрии.

Данная модель предоставляет возможность применения в клинической практике, в тех случаях, когда использование тонометра невозможно или не рекомендовано.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов (The authors declare no conflict of interest).

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Самойлов АН, Самойлова ПА, Ахметов НР, Усов ВА, Гайнутдинова РФ, Закирова ГЗ. Методы измерения внутриглазного давления: недостатки и преимущества // Офтальмологические ведомости. — 2022. — №1-5(3). — С.63-78. [Samoylov AN, Samoylova PA, Ahmetov NR, Usov VA, Gainutdinova RF, Zakirova GZ. Methods for measuring intraocular pressure: disadvantages and advantages. *Ophthalmology Reports*. 2022; 15(3): 63-78. (In Russ.)] doi: 10.17816/OV106140.
- National Center for Biotechnology Information. Tonometry. Bader J., Zeppieri M., Havens S.J. StatPearls Publishing, 2023. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK493225>. Accessed 26.06.2023.
- Антонов А.А., Астахов Ю.С., Бессмертный А.М. Клинические рекомендации. Глаукома первичная открытоугольная. Министерство здравоохранения Российской Федерации. 2020. Доступно по: https://cr.minzdrav.gov.ru/schema/96_1. Ссылка действительна на 26.06.2023. [Antonov AA, Astahov YS, Bessmertny AM. Clinical guidelines. *Glaucoma primary open-angle* 2020. Available at: https://cr.minzdrav.gov.ru/schema/96_1. Accessed 26.06.2023. (In Russ.)]
- Бубнова И.А., Асатрянб С.В. Биомеханические свойства роговицы и показатели тонометрии // Вестник офтальмологии. — 2019. — №3-5(4):. — С.27-32. [Bubnova IA, Asatryan SV. Biomechanical properties of the cornea and tonometry measurements. *Vestnik Oftal'mologii*. 2019; 135(4): 27-32. (In Russ.)] doi: 10.17116/oftalma201913504127.
- Jóhannesson G, Hallberg P, Eklund A, Lindén C. Pascal, iCare and Goldmann applanation tonometry--a comparative study. *Acta Ophthalmol*. 2008; 86(6): 614-21. doi: 10.1111/j.1600-0420.2007.01112.x.
- McCafferty S, Tetrault K, McColgin A, Chue W, Levine J, Muller M. Intraocular Pressure Measurement Accuracy and Repeatability of a Modified Goldmann Prism: Multicenter Randomized Clinical Trial. *Am J Ophthalmol*. 2018; 196: 145-153. doi: 10.1016/j.ajo.2018.08.051.
- Fukuoka S, Aihara M, Iwase A, Araie M. Intraocular pressure in an ophthalmologically normal Japanese population. *Acta Ophthalmol*. 2008; 86(4): 434-9. doi: 10.1111/j.1600-0420.2007.01068.x.
- Shah S, Laiquzzaman M, Mantry S, Cunliffe I. Ocular response analyser to assess hysteresis and corneal resistance factor in low tension, open angle glaucoma and ocular hypertension. *Clin Exp Ophthalmol*. 2008; 36(6): 508-13. doi: 10.1111/j.1442-9071.2008.01828.x.
- Luce DA. Determining in vivo biomechanical properties of the cornea with an ocular response analyser. *J Cataract Refract Surg*. 2005; 31(1): 156-162. doi: 10.1016/j.jcrs.2004.10.044.
- Kynigopoulos M, Schlote T, Kotecha A, et al. Repeatability of intraocular pressure and corneal biomechanical properties measurements by the ocular response analyser. *Klin Monbl Augenheilkd*. 2008; 225(5): 357-360. doi: 10.1055/s-2008-1027256.
- Bao F, Huang W, Zhu R, et al. Effectiveness of the Goldmann applanation tonometer, the dynamic contour tonometer, the ocular response analyzer and the Corvis ST in measuring intraocular pressure following FS-LASIK. *Curr Eye Res*. 2020; 45(2): 144-152. doi: 10.1080/02713683.2019.1660794.
- Boszczyk A, Kasprzak H, Przędziecka-Dołyk J. Novel Method of Measuring Corneal Viscoelasticity Using the Corvis ST Tonometer. *J Clin Med*. 2022; 11(1): 61. doi: 10.3390/jcm11010261.
- Jóźwik A, Kasprzak H, Kozakiewicz A. Corneal Buckling during Applanation and Its Effect on the Air Pressure Curve in Ocular Response Analyser. *Int J Environ Res Public Health*. 2019; 16(15): 2742. doi: 10.3390/ijerph16152742.