DOI: https://doi.org/10.17816/OV678519 EDN: BEJFPI

Зависимость скорости кровотока в центральной артерии сетчатки от величины внутриглазного давления при факоэмульсификации с использованием функции принудительной ирригации

С.Ю. Тахтаев[1], С.Ю. Астахов[1], Ю.В. Тахтаев[1], Т.Н. Киселева[2]

[1] Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия;
[2] Московский научно-исследовательский институт глазных болезней им. Гельмгольца, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Подача ирригационного раствора во время факоэмульсификации сопровождается стремительным подъёмом внутриглазного давления (ВГД). Отличие системы принудительной ирригации от гравитационного аналога состоит в её способности поддерживать заданный уровень ВГД на протяжении всего времени операции. Вопрос о влиянии острого повышения ВГД на состояние гемодинамики сетчатки во время оперативных вмешательств остаётся недостаточно изученным.

Цель — исследование интраоперационных изменений показателей кровотока в центральной артерии сетчатки при факоэмульсификации под воздействием разных значений предустановленного ВГД в системе факоэмульсификатора.

Материалы и методы. Обследовано 11 пациентов с начальной катарактой (значение Pentacam Nucleus Staging 1–2) без сопутствующих заболеваний сердечно-сосудистой системы. Средний возраст пациентов составил 68±8,4 года. Всем пациентам выполнялась ультразвуковая факоэмульсификация на аппарате Centurion Vision System (Alcon, США) с системой принудительного поддержания ВГД. Уровень ВГД измеряли тонометром iCare Pro. Исследование кровотока в центральной артерии сетчатки проводили на многофункциональном ультразвуковом сканере GE Logiq S8. Артериальное давление (АД) на плечевой артерии измеряли на мониторе Draeger vista 120. Оценивали статистическую значимость и достоверность отличий (парный *t*-тест) ВГД в трёх контрольных точках: до операции, при 40 и при 60 мм рт. ст. в системе факоэмульсификатора, изменение показателей максимальной систолической (PSV) и конечной диастолической (EDV) скорости кровотока в начальной и контрольных точках 40 и 60 мм рт. ст., их зависимость от повышения ВГД, влияние значения среднего АД на показатели PSV и EDV в контрольных точках с помощью анализа линейной регрессии, корреляцию их изменений в каждой контрольной точке (коэффициент корреляции Спирмена).

Результаты. Средние значения $ВГД_{тонометрич}$ в трёх временных точках составили соответственно 20,82±3,8, 36,9±4,0, 62,8±3,3 мм рт. ст.. В контрольной точке 40 мм рт. ст. средняя PSV равнялась 12,0±3,9 см/с, средняя EDV составила 3,3±1,2 см/с. В контрольной точке 60 мм рт. ст. средняя PSV уменьшилась до 10,2±3,6 см/с. EDV при этом значительно снизилась до средних значений 1,1±1,1 см/с, а в 3 случаях кровоток в диастолу не регистрировался. В контрольной точке 60 мм рт. ст. наблюдалось статистически значимое снижение значения EDV по сравнению с измерением до операции (p <0,008), значение PSV также снижалось (p=0,05). Не было зафиксировано значимого влияния уровня среднего АД на динамику изменения скорости кровотока. Установлена отрицательная корреляция между изменением индекса периферического сопротивления и показателем среднего АД в контрольных точках 40 и 60 мм рт. ст. (p <0,05).

Заключение. Интраоперационное повышение ВГД может приводить к выраженному снижению показателей PSV и EDV в центральной артерии сетчатки и развитию дефицита ретинального кровотока. Для поддержания стабильной гемодинамики в сосудах сетчатки во время факоэмульсификации значения ВГД не должны превышать определённый пороговый уровень, который в нашем исследовании составил 40 мм рт. ст.

Ключевые слова: факоэмульсификация; внутриглазное давление; ВГД; офтальмогипертензия; перфузия сетчатки; EDV; PSV; центральная артерия сетчатки; ЦАС.

Как цитировать
Тахтаев С.Ю., Астахов С.Ю., Тахтаев Ю.В., Киселева Т.Н. Зависимость скорости кровотока в центральной артерии сетчатки от величины внутриглазного давления при факоэмульсификации с использованием функции принудительной ирригации // Офтальмологические ведомости. 2025. Т. 18. № 2. С. 51–59. DOI: 10.17816/OV678519 EDN: BEJFPI

Рукопись получена: 13.04.2025 **Рукопись одобрена:** 30.04.2025 **Опубликована online:** 30.06.2025

ЭКО • ВЕКТОР

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2025

DOI: https://doi.org/10.17816/OV678519 EDN: BEJFPI

Dependence of Blood Flow Velocity in the Central Retinal Artery on Intraocular Pressure During Phacoemulsification With Active Fluidics

Sergei Yu. Takhtaev[1], Sergey Yu. Astakhov[1], Yury V. Takhtaev[1], Tatiana N. Kiseleva[2]

[1] Academician I.P. Pavlov First St. Petersburg State Medical University, Saint Petersburg, Russia;
[2] Helmholtz National Medical Research Center of Eye Diseases, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Irrigation during phacoemulsification is associated by a rapid increase in intraocular pressure. The difference of the active fluidics system from the passive one is its ability to maintain the set intraocular pressure throughout the entire procedure. The effect of a rapid intraocular pressure increase on retinal hemodynamics during surgery remains poorly understood.

AIM: The work aimed to study intraoperative changes in blood flow parameters in the central retinal artery during phacoemulsification with different intraocular pressure preset in the phacoemulsification system.

METHODS: A total of 11 patients with early stage cataract (Pentacam Nucleus Staging: 1–2) without cardiovascular comorbidities were examined. The mean age of the patients was 68 ± 8.4 years. All patients underwent ultrasound phacoemulsification using Centurion Vision System (Alcon, USA) with active fluidics. The intraocular pressure was measured using iCare Pro tonometer. Blood flow in the central retinal artery was assessed using a GE Logiq S8 multi-purpose ultrasound system. Blood pressure at the brachial artery was measured using Draeger Vista 120. The following parameters were assessed: statistical significance (the paired *t*-test) of the intraocular pressure differences at three time points (before surgery, at 40 and 60 mmHg as set in the phacoemulsification system); changes in peak systolic velocity and end-diastolic velocity at the initial and control time points of 40 and 60 mmHg; their dependence on the intraocular pressure increase; the effect of mean blood pressure on peak systolic velocity and end-diastolic velocity at control time points using linear regression analysis; and the correlation of their changes at each control time point (the Spearman correlation test).

RESULTS: Mean intraocular pressure values at three time points were 20.82±3.8, 36.9±4.0, and 62.8±3.3 mmHg, respectively. At 40 mmHg control point, mean peak systolic and end-diastolic velocities were 12.0±3.9 and 3.3±1.2 cm/s, respectively. At 60 mmHg control point, mean peak systolic velocity decreased to 10.2±3.6 cm/s. End-diastolic velocity significantly decreased to an average of 1.1±1.1 cm/s, and diastolic blood flow was not recorded in 3 cases. At 60 mmHg control point, a statistically significant decrease in end-diastolic velocity was noted vs. the pre-operative value (p <0.008), and peak systolic velocity also decreased (p=0.05). Significant effect of mean blood pressure on changes in blood flow velocity was not reported. A negative correlation was found between the change in resistive index and mean blood pressure at 40 and 60 mmHg control points (p <0.05).

CONCLUSION: An intraoperative intraocular pressure increase may significantly decrease peak systolic velocity and end-diastolic velocity in the central retinal artery and result in retinal blood flow deficiency. To maintain stable hemodynamics in retinal vessels during phacoemulsification, intraocular pressure should not exceed a specific threshold, which was 40 mmHg in our study.

Keywords: phacoemulsification; intraocular pressure; IOP; ocular hypertension; retinal perfusion; EDV; PSV; central retinal artery; CRA.

To cite this article
Takhtaev SYu, Astakhov SYu, Takhtaev YuV, Kiseleva TN. Dependence of Blood Flow Velocity in the Central Retinal Artery on Intraocular Pressure During Phacoemulsification With Active Fluidics. *Ophthalmology Reports*. 2025;18(2):51–59. DOI: 10.17816/OV678519 EDN: BEJFPI

Submitted: 13.04.2025 **Accepted:** 30.04.2025 **Published online:** 30.06.2025

ECO•VECTOR

The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 license
© Eco-Vector, 2025

ОБОСНОВАНИЕ

Остро развивающаяся офтальмогипертензия во время факоэмульсификации — актуальная проблема в клинической практике, поскольку катаракта в большинстве случаев является возрастной патологией, и пациенты, получающие лечение методом факоэмульсификации, часто имеют повышенный риск сердечно-сосудистых осложнений и длительный анамнез общесоматических заболеваний, в первую очередь гипертонической болезни, сахарного диабета, атеросклеротического поражения магистральных сосудов. Известно, что отрицательное влияние высокого внутриглазного давления (ВГД) на анатомические структуры глаза связано с двумя факторами: компрессионное повреждение и ишемия тканей, возникающие в результате сдавления сосудов, кровоснабжающих сетчатку и зрительный нерв. В клинической практике с помощью целого ряда инструментальных методов исследования глазного кровотока, включающих цветовое допплеровское картирование (ЦДК), оптическую когерентную томографию в ангиорежиме, лазерную спекл-флоуграфию, установлено ухудшение гемодинамики сетчатки и зрительного нерва у пациентов с глаукомой и офтальмогипертензией [1, 2].

Подача ирригационного раствора во время факоэмульсификации сопровождается скачкообразным подъёмом ВГД. Отличие системы принудительной ирригации от гравитационного аналога состоит в её способности поддерживать заданный уровень ВГД на протяжении всего времени операции. В отношении остро развившихся патологических эпизодов повышения ВГД универсальные компенсаторные механизмы отсутствуют, и функция зрения в таких состояниях наиболее уязвима [3]. Несмотря на значительное число публикаций, посвящённых изучению микроциркуляции при глаукоме, вопрос о влиянии острого повышения ВГД на состояние гемодинамики сетчатки на относительно герметичном глазу во время оперативных вмешательств остаёся недостаточно изученным.

Подача ирригационного раствора при факоэмульсификации осуществляется при нажатии хирургом ножной педали управления. Система принудительного нагнетания внутриглазного давления механически сдавливает пакет с объёмом раствора, выдавливая раствор по эластичным трубкам через ультразвуковую рукоятку в переднюю камеру глаза. Датчики давления в ультразвуковой рукоятке факоэмульсификатора обеспечивают обратную связь таким образом, что при снижении давления в системе сдавления пакета усиливается, и заданный в программе тонус восстанавливается. Ключевым отличием от гравитационных систем является отсутствие периодов «провала» уровня ВГД, что было продемонстрировано V. Vasavada и соавт. [4].

Цель исследования — изучение закономерностей интраоперационных изменений показателей кровотока в центральной артерии сетчатки (ЦАС) под воздействием разных значений предустановленного внутриглазного давления в системе факоэмульсификатора.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обследовано 11 пациентов с начальной катарактой (значение Pentacam Nucleus Staging (PNS) 1–2) без сопутствующих глазных заболеваний, которым была выполнена факоэмульсификация с имплантацией интраокулярной линзы (ИОЛ). В соответствии с положениями Хельсинкской декларации и после получения одобрения этического комитета ПСПбГМУ им. И.П. Павлова, все пациенты подписывали информированное добровольное согласие на участие в исследовании.

Критерии невключения в исследование: курение, глаукома, стенозирующий атеросклероз сонных артерий, декомпенсированная артериальная гипертензия, перенесённый инфаркт миокарда, острое нарушение мозгового кровообращения и шунтирование коронарных сосудов в анамнезе.

Средний возраст пациентов составил 68,0±8,4 года. Все операции выполнялись одним хирургом. Хирургическое вмешательство проводилось в условиях местного обезболивания (инстилляцией глазных капель оксибупрокаина 0,4% трёхкратно в течение 30 мин перед вмешательством). Уровень ВГД в системе факоэмульсификатора был установлен с учётом регулировки высоты операционного стола в каждом случае. При каждой операции в шагах программы факоэмульсификатора последовательно были заданы различные уровни ВГД: 40 и 60 мм рт. ст. Всем пациентам проводили контроль показателей артериального давления (АД) на уровне плечевой артерии и оксигенации периферической крови с использованием монитора пациента Draeger vista120 (Draeger, Германия). Исследование кровотока в ЦАС с регистрацией максимальной систолической (PSV), конечной диастолической (EDV) скорости кровотока и индекса периферического сопротивления (RI) проводили с использованием режима цветового допплеровского картирования и импульсно-волновой допплерографии на многофункциональном ультразвуковом диагностическом сканере Logiq S8 (GE, США). Ультразвуковой датчик располагали транспальпебрально без компрессии глазного яблока с использованием стерильного акустического геля с получением изображения зрительного нерва в центральной части эхограммы на мониторе сканера. Далее в центре акустической тени ретробульбарной части нерва, на расстоянии от 1,0 до 3,0 мм от заднего полюса глазного яблока в режиме ЦДК идентифицировали ЦАС по её красному цветовому паттерну (поток к датчику) и центральную вену сетчатки по синему цветовому паттерну (поток от датчика) [5]. Поскольку ЦАС проходит вблизи одноимённой вены, допплеровские спектры этих сосудов регистрируются одновременно (артериальный — выше изолинии, венозный — ниже изолинии) (рис. 1).

DOI: https://doi.org/10.17816/OV678519

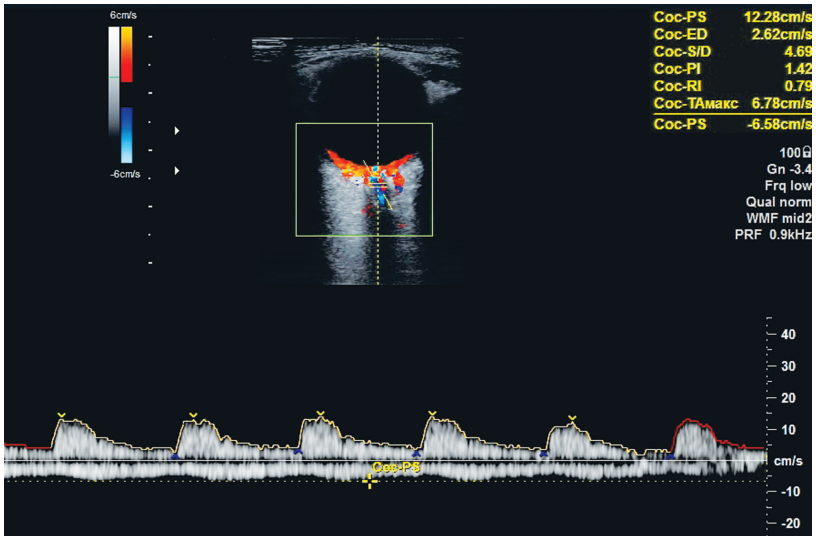

Рис. 1. Эхограмма глаза и орбиты в режиме цветового допплеровского картирования и импульсно-волновой допплерографии: кровоток в центре тени зрительного нерва вблизи заднего полюса — центральная артерия сетчатки (ЦАС) и центральная вена сетчатки (ЦВС). Допплеровский спектр кровотока в ЦАС (выше изолинии) и ЦВС (ниже изолинии). Показатели кровотока в ЦАС: PSV 12,28 см/с; EDV 2,62 см/с; RI 0,79.

Факоэмульсификацию катаракты выполняли одной из классических техник фрагментации ядра («крест» или «stop-and-chop»), с применением последовательных программных шагов для раскола ядра и аспирации фрагментов, предполагающих линейное возрастание вакуума на конце ультразвуковой иглы для удержания ядра хрусталика. Для компенсации аспирационного потока в факоэмульсификаторе Alcon Centurion Vision System (Alcon, США) применяли систему принудительного поддержания ВГД.

Уровень внутриглазного давления ($ВГД_{тонометрич}$) измеряли с помощью тонометра iCare Pro (iCare Finland Oy., Финляндия). Предоперационные измерения до вскрытия глазного яблока, результаты которых составили базовую линию, осуществляли на операционном столе непосредственно перед оперативным вмешательством в положении пациента лежа на спине.

Интраоперационные измерения ВГД проводились трёхкратно в каждой из двух контрольных точек при различном заданном уровне офтальмотонуса в системе ирригации факоэмульсификатора равном 40 и 60 мм рт. ст. Отмечалось соответствие и разница между значением в системе факоэмульсификатора и показателями тонометра iCare.

Статистическую обработку полученных значений проводили в программе IBM Statistics SPSS v27.0. Оценивали статистическую значимость отличий (парный *t*-тест) $ВГД_{тонометрич}$ в 3 контрольных точках: до операции, при 40 и при 60 мм рт. ст. в системе факоэмульсификатора, динамику изменений показателей PSV и EDV в начальной и контрольных точках 40 и 60 мм рт. ст., их зависимость от повышения $ВГД_{тонометрич}$, влияние значения $АД_{ср}$ на показатели PSV и EDV в контрольных точках с помощью анализа линейной регрессии, корреляцию их изменений в каждой контрольной точке — коэффициент корреляции Спирмена (*r*). Принятый уровень значимости p=0,05.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ данных тонометрии показал статистически значимые различия между значениями ВГД, измеренными до факоэмульсификации и в контрольных точках 40 и 60 мм рт. ст. (p <0,001) (рис. 2). Средние значения ВГД в трёх временных точках составили 20,82±3,8, 36,9±4,0, $62{,}8 \pm 3{,}3_{(SD)}$ мм рт. ст. соответственно (рис. 3). Таким образом, во время хирургии измеренные значения ВГД и динамика их изменения соответствовали установкам в программе факоэмульсификатора, при этом наблюдалась низкая вариативность значения ВГД, измеренного в контрольных точках 40 и 60 мм рт. ст. (рис. 4). Эти данные соответствуют ожидаемым и подтверждают возможность оценки риска гемодинамических нарушений на основании значений предустановленного глазного давления при факоэмульсификации.

Средняя PSV до оперативного вмешательства составляла 12,4±3,4 см/с, средняя EDV — 4,2±1,4 см/с. Снижение скорости кровотока наблюдалось у всех пациентов исследуемой группы в контрольных точках 40 и 60 мм рт. ст. (рис. 5). В контрольной точке ВГД 40 мм рт. ст. PSV равнялась в среднем 12,0±3,9 см/с, а средняя EDV составила 3,3±1,2 см/с. В контрольной точке ВГД 60 мм рт. ст. средняя PSV уменьшилась до 10,2±3,6 см/с, EDV при этом значительно снизилась до средних значений 1,1±1,1 см/с, а в 3 случаях вовсе не регистрировалась (рис. 6).

Согласно полученным клиническим данным, абсолютное снижение скорости кровотока в обе фазы наблюдалось в каждой из контрольных точек. Статистически значимое снижение скорости кровотока в наибольшей степени затрагивало EDV, при сравнении значений до операции и на отметке 60 мм рт. ст. (p=0,008), при этом PSV также снижалась, но менее значимо (p=0,05). Не было

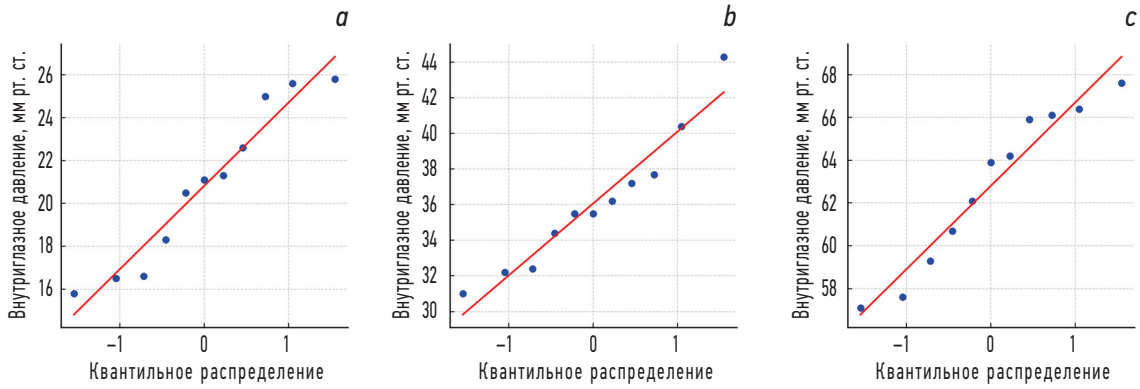

Рис. 2. Нормальное распределение (p <0,05) значений внутриглазного давления в каждой из контрольных точек: *a* — до операции; *b* — на отметке 40 мм рт. ст.; *c* — на отметке 60 мм рт. ст.

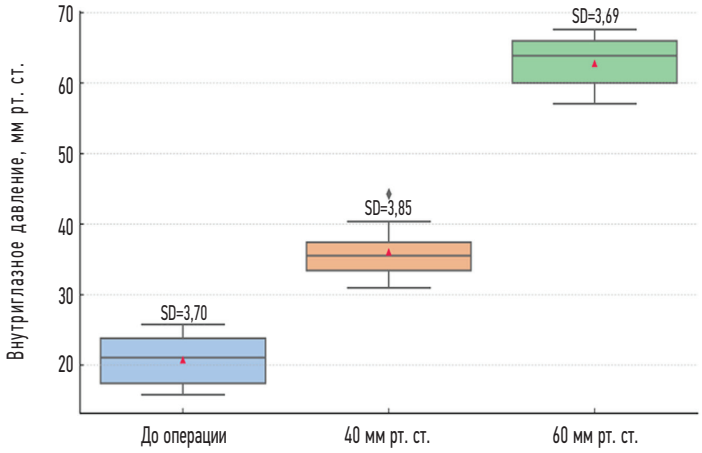

Рис. 3. Различия и стандартное отклонение полученных значений внутриглазного давления, измеренных тонометром iCarePro в контрольных точках 40 и 60 мм рт. ст.

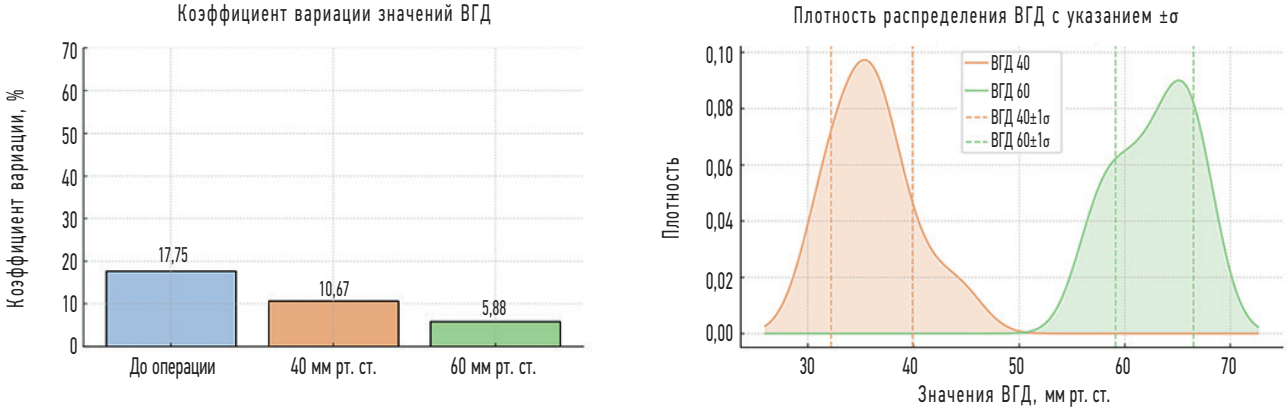

Рис. 4. Вариативность и распределение значений внутриглазного давления (ВГД) в начальной точке (до операции), при 40 и 60 мм рт. ст: большинство значений находятся в пределах одного стандартного отклонения и наблюдается сдвиг в сторону больших значений на отметке 60 мм рт. ст.

зафиксировано значимого влияния уровня среднего АД ($АД_{ср}$) на динамику изменения скорости кровотока. Анализ корреляции изменений логарифмированных значений PSV и EDV показал сохранение высокой корреляционной связи между ними (коэффициент корреляции Спирмена r=0,83, p <0,01) на точке 40 мм рт. ст., и нарушение корреляции на отметке 60 мм рт. ст., когда влияние ВГД на EDV ожидаемо выше.

Значение RI, рассчитываемого как RI = PSV – EDV/PSV, зависело от значения ВГД и изменялось в наибольшей степени между измерением до операции и на отметке 60 мм рт. ст. (анализ ANOVA p <0,001, F 34,182; рис. 7). Установлена сильная корреляционная связь между изменением RI и показателем $АД_{ср}$ в контрольных точках 40 и 60 мм рт. ст., но не до начала операции (связь между изменением RI и $АД_{ср}$; p >0,05). Таким

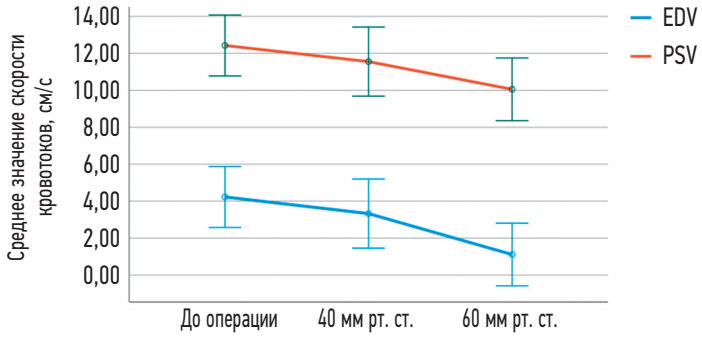

Рис. 5. График динамики и стандартные отклонения значений максимальной систолической скорости кровотока (PSV) и конечной диастолической скорости кровотока (EDV) (регрессионный анализ ANOVA с поправкой на несферичность Грингауза–Гайсера *p*=0,001).

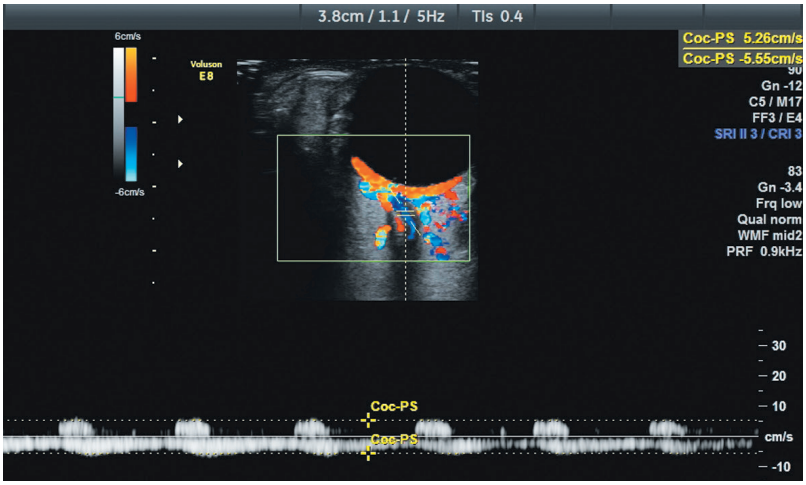

Рис. 6. Допплеровский спектр кровотока в центральной артерии сетчатки и центральной вене сетчатки при внутриглазном давлении 60 мм рт. ст., снижение максимальной систолической скорости (PSV 5,26 см/с), отсутствует диастолический компонент спектра (EDV 0).

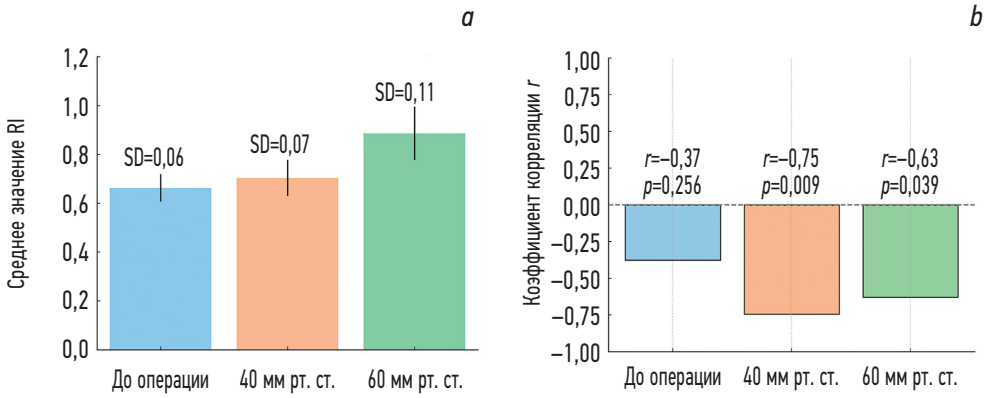

Рис. 7. Динамика индекса сосудистого сопротивления (RI, среднее±стандартное отклонение) в начальной и контрольных точках 40 и 60 мм рт. ст (*a*) и результат оценки корреляции между значением среднего артериального давления и RI в начальной и контрольных точках 40 и 60 мм рт. ст (*b*). Результаты указывают на статистически значимое изменение RI в контрольных точках 40 и 60 мм рт. ст по сравнению с предоперационными значениями (тест ANOVA *p* <0,001, *F*=34,182, проверка сферичности Моучли *p*=0,221) (объяснение в тексте).

образом, до начала операции значение $АД_{ср}$ не связано со значением RI.

В контрольной точке 40 мм рт. ст. обнаружена статистически значимая сильная отрицательная корреляция значений RI и параметра $АД_{ср}$, рассчитываемого как: $АД_{ср}$ = ДАД + 1/3(САД – ДАД), где ДАД — диастолическое артериальное давление, САД — систолическое артериальное давление. Таким образом, сосудистое сопротивление уменьшается прямо пропорционально значению $АД_{ср}$ в плечевой артерии. В контрольной точке 60 мм рт. ст. также наблюдается умеренная отрицательная корреляция RI с $АД_{ср}$ (*p*=0,05). Воздействие повышенного до 40 и 60 мм рт. ст. ВГД приводит к усилению обратной связи между $АД_{ср}$ и RI, что может свидетельствовать

об изменении периферического сосудистого тонуса. Однако между изменением RI и значением глазного перфузионного давления отсутствует корреляция. Поскольку перфузионное давление учитывает влияние ВГД, по всей видимости, именно повышение ВГД с отметки 40 до 60 мм рт. ст. приводит к ослаблению влияния АД на показатели скорости кровотока в ЦАС, что может свидетельствовать о достижении пределов сосудистой ауторегуляции в глазу во время факоэмульсификации с повышенным ВГД.

ОБСУЖДЕНИЕ

Офтальмогипертензия как повреждающий фактор и угроза утраты зрения сопровождает множество различных клинических состояний. Адаптационные механизмы сосудистой регуляции способны до определённых пределов компенсировать хронические нарушения перфузии глаза, что объясняет различия в прогрессии глаукомной оптиконейропатии с высокой вариабельностью среднесуточных значений ВГД [6, 7]. При глаукоме наблюдаются значительные гемодинамические изменения у пациентов с некомпенсированным офтальмотонусом и нормализация этих параметров при снижении ВГД [8, 9]. Некоторые авторы описывают стойкое повышение EDV кровотока после глубокой склерэктомии у пациентов с первичной открытоугольной глаукомой [10, 11].

В отношении остро развившихся патологических эпизодов повышения ВГД компенсаторные механизмы практически не изучены. Патогенез ишемической нейрооптикопатии по современным представлениям имеет два основных механизма: гемодинамический, в основе которого лежит функциональная гипоксия вследствие вазоспазма или окклюзии сосудов, и механический, включающий компрессию нервных волокон, проходящих через отверстия в решётчатой пластине диска зрительного нерва с последующим развитием их необратимых атрофических повреждений с нарушением функции зрительного пути [12].

Концепция показателя глазного перфузионного давления (ГПД), или в англоязычной литературе OPP (Ocular Perfusion Pressure), для глазного яблока имеет ряд допущений. Применяемая формула, по аналогии с расчётом перфузионного давления головного мозга, представленная как $ГПД_{ср} = АД_{ср} – ВГД$, где $АД_{ср} = ДАД + 1/3(САД – ДАД)$, не вполне учитывает соотношение площади просвета приносящих сосудов к площади самого глазного яблока, а также двойственное кровоснабжение сетчатки с преобладающим суммарным объёмом крови в сосудах хориоидеи [13, 14].

Кровоток в любом отрезке сосуда определяется через соотношение разницы давлений на концах изучаемого отрезка к сопротивлению *R*, а последнее зависит от показателей вязкости крови, эластичности стенки и диаметра просвета сосуда, но прямые измерения этих значений на уровне мелких артерий практически невозможны. Для косвенной оценки сопротивления дистальнее точки наблюдения применяется показатель RI, рассчитываемый по данным ультразвуковой допплерографии с цветным картированием как соотношение пиковой систолической и конечной диастолической скорости по формуле PSV – EDV/PSV, средние значения которого (0,6–0,75) для глазного яблока взрослого человека являются одними из самых высоких в организме.

В работе E. Polska и соавт. [15] зафиксировали, что значение RI также не вполне точно описывает состояние кровотока именно в глазном яблоке, и особенно отметили, что наблюдаемое снижение скорости кровотока в приносящих сосудах по данным ультразвуковой допплерографии с цветным картированием не соотносится с изменением объёма протекающей через глаз крови. В отличие от внутричерепного давления, являющегося силой сопротивления давлению в сосудах головного мозга, ВГД не имеет возможности к выравниванию и перераспределению, особенно при остро развившемся его повышении [14, 16].

Отсутствие полноценного слоя гладкомышечных волокон и внутренней эластичной пластинки в стенке артериол собственной сосудистой сети сетчатки делает их наиболее уязвимыми к компрессии ВГД с последующим возрастанием сопротивления в ветвях и собственно центральной артерии сетчатки [17]. Хориоидея, которая содержит до 85% объёма поступающей к глазному яблоку крови, в условиях повышенного ВГД также испытывает перегрузку с развитием картины венозного стаза в зависимости от величины повреждающего ВГД [18].

В работе 2019 г. Ю.В. Тахтаев и соавт. [19] впервые показали, что повышение уровня ВГД во время факоэмульсификации может приводить к выраженному снижению скорости кровотока в ЦАС по сравнению с группой контроля независимо от исходного АД. Трёхкратное ступенчатое повышение ВГД в работе A. Harris и соавт. [8] привело к нарушению кровотока в центральной артерии сетчатки с возрастанием RI практически до 1,0, что говорит о полной остановке кровотока и демонстрирует высокую зависимость показателей гемодинамики в бассейне ЦАС от колебаний офтальмотонуса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменение ВГД в ходе факоэмульсификации оказывает непосредственное влияние на состояние кровотока в ЦАС.

При оценке динамики изменений показателей скорости кровотока между двумя контрольными точками было выявлено, что изменения значимы и отличаются от исходного измерения. Проведённые контрольные измерения ВГД характеризуются низкой вариативностью,

а наблюдаемая разница в значениях ВГД в системе факоэмульсификатора от $ВГД_{тонометрич}$ в обеих контрольных точках не является статистически значимой, таким образом, значение ВГД в системе факоэмульсификатора в целом соответствует значению, полученному при контрольной тонометрии при описанных в данной работе условиях.

Конечная диастолическая скорость кровотока в ЦАС в большей степени зависит от уровня повышения ВГД и значимо снижается относительно исходного значения при уровне предустановленного давления в факоэмульсификаторе 60 мм рт. ст. Дальнейшее повышение ВГД может приводить к полной остановке кровотока в диастолическую фазу и прямому риску развития ишемии сетчатки и зрительного нерва. Воздействие повышенного до 40 и 60 мм рт. ст. ВГД способствует усилению обратной связи между $АД_{ср}$ и RI, что может свидетельствовать об изменении периферического сосудистого тонуса.

По наблюдаемым нами изменениям кровотока в ЦАС можно утверждать, что величина ВГД, приводящая к нарушению перфузии в ЦАС, в большей степени является самостоятельным определяющим фактором риска ишемии, по сравнению с глазным перфузионным давлением, зависящим от соотношения ВГД и $АД_{ср}$. Другими словами, нельзя утверждать, что пациенты с повышенным системным АД в меньшей степени подвержены риску ишемических нарушений при воздействии повышенного ВГД, чем пациенты с нормальным или пониженным АД.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. С.Ю. Тахтаев — существенный вклад в подготовку публикации, сбор, статистическая обработка данных, написание текста статьи, подготовка рисунков, графиков, работа с литературой; С.Ю. Астахов — существенный вклад в концепцию и дизайн работы, научное редактирование, окончательное утверждение версии, подлежащей публикации, Ю.В. Тахтаев — существенный вклад в концепцию и дизайн работы, научное редактирование, окончательное утверждение версии, подлежащей публикации, сбор клинических данных, научное консультирование работы; Т.Н. Киселева — существенный вклад в концепцию и дизайн работы, сбор и интерпретация клинических данных, научное редактирование, окончательное утверждение версии, подлежащей публикации, написание текста. Авторы одобрили версию для публикации, а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова» (протокол № 280 от 20.11.2023). Все участники исследования добровольно подписали форму информированного согласия до включения в исследование.

Согласие на публикацию. Авторы получили письменное информированное добровольное согласие пациентов на публикацию персональных данных в научном журнале, включая его электронную версию.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFO

Author contributions: S.Yu. Takhtaev: substantial contribution to manuscript preparation, investigation, formal analysis, writing—original draft, visualization; S.Yu. Astakhov: substantial contribution to conceptualization, writing—review & editing, final approval of the manuscript; Yu.V. Takhtaev: substantial contribution to conceptualization, writing—review & editing, final approval of the manuscript, investigation, supervision; T.N. Kiseleva: substantial contribution to conceptualization, investigation, formal analysis, writing—review & editing, final approval of the manuscript, writing—original draft. All the authors approved the final version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: The study was approved by the local Ethics Committee of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Pavlov First Saint Petersburg State Medical University (Protocol No. 280 dated November 20, 2023). All participants provided written informed consent prior to inclusion in the study.

Consent for publication: Written informed consent was obtained from patients for the publication of personal data in a scientific journal and its online version.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this article.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer-review. This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Malishevskaya TN, Kiseleva TN, Renzyak EV. Evaluation of ocular blood flow by Doppler Ultrasound in patients with glaucoma. *Regional blood circulation and microcirculation*. 2024;23(4):22–29. doi: 10.24884/1682-6655-2024-23-4-22-29 EDN: CIOUOD

2. Kiseleva TN, Petrov SYu, Okhotsimskaya TD, Markelova OI. State-of-the-art methods of qualitative and quantitative assessment of eye microcirculation. *Russian Ophthalmological Journal*. 2023;16(3):152–158. doi: 10.21516/2072-0076-2023-16-3-152-158 EDN: ORBVWL

3. Kiseleva TN, Chudin AV, Khoroshilova-Maslova IP, et al. Morphological changes in the retina under conditions of experimental *in vivo* regional ischemia/reperfusion. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2019;167(2):250–256. EDN: CKXURX

4. Vasavada V, Agrawal D, Vasavada SA, et al. Intraoperative performance and early postoperative outcomes following phacoemulsification with three fluidic systems: A randomized trial. *J Refract Surg*. 2024;40(5):e304–e312. doi: 10.3928/1081597X-20240314-02

5. Neroev VV, Kiseleva TN, editors. *Ultrasound studies in ophthalmology: a guide for doctors*. 1st ed. Moscow: ICAR; 2019. (In Russ.)

6. Astakhov YuS, Akopov EL, Potyomkin VV. Applanation and dynamic contour tonometry: a comparative analysis. *Ophthalmology Reports*. 2008;1(1):4–10. EDN: IKIDXR

7. Pershin BS, Kozlova IV, Ermolaev AP. Experimental evaluation of correlation between intraocular pressure fluctuation and hemodynamic indices of the eye after intravitreous injection. *National Journal glaucoma*. 2012;(1):16–19. EDN: RTCCUJ

8. Harris A, Joos K, Kay M, et al. Acute IOP elevation with scleral suction: effects on retrobulbar haemodynamics. *Br J Ophthalmol*. 1996;80(12): 1055–1059. doi: 10.1136/bjo.80.12.1055

9. Astakhov YuS, Sokolov VO, Morozova NV, et al. IOP-lowering therapy evaluation using 24-hour IOP monitoring. *Ophthalmology Reports*. 2015;8(3):51–55. doi: 10.17816/OV2015351-55 EDN: UXQLFJ

10. Galassi F, Giambene B, Corvi A, et al. Retrobulbar hemodynamics and corneal surface temperature in glaucoma surgery. *Int Ophthalmol*. 2008;28(6):399–405. doi: 10.1007/s10792-007-9160-8

11. Özsoy A, Sarıcaoğlu MS, Çavuşoğlu M. The effect of deep sclerectomy on ocular blood flow: a 6-month clinical trial. *Turk J Med Sci*. 2016;46(6):1773–1778. doi: 10.3906/sag-1506-122

12. Hayreh SS. Blood supply of the optic nerve head in health and disease. In: Lambrou GN, Greve EL, eds. *Ocular blood flow in glaucoma: means, methods and measurements*. Amsterdam: Kugler and Ghedini; 1989. P. 3–54.

13. Hayreh SS. Management of ischemic optic neuropathies. *Indian J Ophthalmol*. 2011;59(2):123–136. doi: 10.4103/0301-4738.77024

14. Krejcy K, Wolzt M, Kreuzer C, et al. Characterization of angiotensin-II effects on cerebral and ocular circulation by noninvasive methods. *Br J Clin Pharmacol*. 1997;43(5):501–508. doi: 10.1046/j.1365-2125.1997.00585.x

15. Polska E, Kircher K, Ehrlich P, et al. RI in central retinal artery as assessed by CDI does not correspond to retinal vascular resistance. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*. 2001;280(4):H1442–H1447. doi: 10.1152/ajpheart.2001.280.4.H1442

16. Canac N, Jalaleddini K, Thorpe SG, et al. Review: pathophysiology of intracranial hypertension and noninvasive intracranial pressure monitoring. *Fluids Barriers CNS*. 2020;17(1):40. doi: 10.1186/s12987-020-00201-8

17. Yang Q, Shen J, Guo W, et al. Effect of acute intraocular pressure elevation on blood flow velocity and resistance in the rabbit ophthalmic artery. *Vet Ophthalmol*. 2011;14(6):353–357. doi: 10.1111/j.1463-5224.2011.00881.x

18. Reiner A, Fitzgerald MEC, Del Mar N, Li C. Neural control of choroidal blood flow. *Prog Retin Eye Res*. 2018;64:96–130. doi: 10.1016/j.preteyeres.2017.12.001

19. Takhtaev YuV, Kiseleva TN, Shliakman RB. The effect of preset intraoperative intraocular pressure during phacoemulsification on the blood flow velocity in the central retinal artery. *Ophthalmology Reports*. 2019;12(4):5–12. doi: 10.17816/OV17802 EDN: QSQOUM

ОБ АВТОРАХ

***Тахтаев Сергей Юрьевич;** адрес: Россия, 191024, Санкт-Петербург, ул. Мытнинская д. 1/20; ORCID: 0009-0003-3545-5136; e-mail: stakhtaev@gmail.com

Астахов Сергей Юрьевич, д-р мед. наук, профессор; ORCID: 0000-0003-0777-4861; eLibrary SPIN: 7732-1150; e-mail: astakhov73@mail.ru

Тахтаев Юрий Викторович, д-р мед. наук; ORCID: 0000-0003-2770-7674; eLibrary SPIN: 9173-3831; e-mail: ytakhtaev@gmail.com

Киселева Татьяна Николаевна, д-р мед. наук, профессор; ORCID: 0000-0002-9185-6407; eLibrary SPIN: 5824-5991; e-mail: tkiseleva05@gmail.com

AUTHORS' INFO

***Sergei Yu. Takhtaev,** MD; address: 1/20, Mytninskaya st., Saint Petersburg, 191024, Russia; ORCID: 0009-0003-3545-5136; e-mail: stakhtaev@gmail.com

Sergey Yu. Astakhov, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor; ORCID: 0000-0003-0777-4861; eLibrary SPIN: 7732-1150; e-mail: astakhov73@mail.ru

Yury V. Takhtaev, MD, Dr, Sci, (Medicine); ORCID: 0000-0003-2770-7674; eLibrary SPIN: 9173-3831; e-mail: ytakhtaev@gmail.com

Tatiana N. Kiseleva, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor; ORCID: 0000-0002-9185-6407; eLibrary SPIN: 5824-5991; e-mail: tkiseleva05@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author