

Роль и механизмы интраокулярной инфузии при микроинвазивной гильотинной и ультразвуковой витрэктомии

Б.М. Азнабаев^{1,2}, Т.Р. Мухамадеев^{1,2}, Т.И. Дибаяев^{1,2}, Т.Н. Исмагилов^{1,2}

¹ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России, Уфа, Россия

²ЗАО «Оптимедсервис», Уфа, Россия

РЕЗЮМЕ

Поддержание тонуса глазного яблока и стабильного внутриглазного давления (ВГД) во время витрэктомии — важное условие безопасности в отношении внутриглазных структур. По мере удаления стекловидного тела происходит его постепенное замещение на инфузионный раствор, что приводит к снижению вязкости содержимого витреальной полости и может способствовать изменению гидродинамических условий во время операции. Это требует строгой и согласованной работы между инфузионным и аспирационным модулями микрохирургической системы. Зачастую нарушение баланса между притоком и оттоком жидкости из глаза во время витрэктомии может приводить как к снижению, так и к повышению ВГД. Хирургические системы с гравитационным типом инфузии не способны компенсировать резкие изменения гидродинамических условий операции, что может приводить к выраженным колебаниям ВГД, поэтому актуальной является разработка алгоритмов принудительной инфузии, позволяющих более точно управлять инфузионным потоком. В обзоре описываются основные подходы к реализации и особенности различных механизмов принудительной инфузии, аспекты их эффективности и безопасности, изученные как в экспериментальных, так и в клинических исследованиях.

Ключевые слова: витрэктомия, внутриглазное давление, гидродинамический баланс, принудительная инфузия, микрохирургические системы, ультразвуковая витрэктомия.

Для цитирования: Азнабаев Б.М., Мухамадеев Т.Р., Дибаяев Т.И., Исмагилов Т.Н. Роль и механизмы интраокулярной инфузии при микроинвазивной гильотинной и ультразвуковой витрэктомии. Клиническая офтальмология. 2023;23(1):66–70. DOI: 10.32364/2311-7729-2023-23-1-66-70.

The role and mechanisms of intraocular infusion during microinvasive guillotine and ultrasonic vitrectomy

B.M. Aznabaev^{1,2}, T.R. Mukhamadeev^{1,2}, T.I. Dibaev^{1,2}, T.N. Ismagilov^{1,2}

¹Bashkir State Medical University, Ufa, Russian Federation

²CJSC Optimedservis, Ufa, Russian Federation

ABSTRACT

Maintaining tone of the eyeball and stable intraocular pressure (IOP) during vitrectomy is an important issue associated with the safety of intraocular structures. As the vitreous body is removed, it is gradually replaced with a balanced salt solution, which leads to a decrease in viscosity of the vitreous chamber content and may contribute to changes of the hydrodynamic parameters during surgical procedures. Thus, it is necessary to ensure controlled operation and coordination of the infusion and aspiration modules used in the microsurgical system. Commonly, the imbalance between the aqueous humor inflow and outflow during vitrectomy may cause either a decrease or increase in IOP. The gravity infusion surgical systems cannot compensate for sudden changes in the hydrodynamic parameters during eye surgery, and, as a result, significant fluctuations in IOP may occur. Thus, it is important to develop algorithms for forced infusion that will ensure a more precise control of the infusion flow. The review describes various forced infusion mechanisms and key approaches to their use, as well as their effectiveness and safety patterns, highlighted in the experimental and clinical studies.

Keywords: vitrectomy, intraocular pressure, hydrodynamic balance, forced infusion, microsurgical systems, ultrasonic vitrectomy.

For citation: Aznabaev B.M., Mukhamadeev T.R., Dibaev T.I., Ismagilov T.N. The role and mechanisms of intraocular infusion during microinvasive guillotine and ultrasonic vitrectomy. Russian Journal of Clinical Ophthalmology. 2023;23(1):66–70 (in Russ.). DOI: 10.32364/2311-7729-2023-23-1-66-70.

ВВЕДЕНИЕ

Важными условиями проведения витрэктомии — операции по фрагментации и аспирации стекловидного тела (СТ) — являются максимальное уменьшение хирургической травмы и безопасность в отношении анатомической и функциональной целостности сетчатки, сосудистой оболочки с сохранением адекватного кровоснабжения и иннервации [1]. Наш обзор посвящен рассмотрению основных подходов к реализации различных механизмов принудительной инфузии, аспектам их эффективности и безопасности.

ПРИНЦИПЫ ВИТРЭКТОМИИ

Традиционно доступ при витрэктомии осуществляется путем трех склеротомий, выполненных через плоскую часть цилиарного тела, в которые устанавливаются порты для введения в витреальную полость различных инструментов. Для фрагментации СТ используется витреотом, который посредством силиконовой трубки связан с аспирационным насосом, предназначенным для удаления измельченных структур из глаза. Система интраокулярной инфузии обеспечивает непрерывный приток жидкости, ко-

торая постепенно заполняет витреальную полость в процессе удаления СТ. От инфузионной емкости со сбалансированным солевым раствором отходит силиконовая трубка, имеющая на конце канюлю, которая устанавливается в один из портов и, как правило, имеет тот же калибр, что и витреотом. Для эндовитреального освещения применяются эндоскопические осветители в комбинации с различными источниками света.

За счет большого содержания гиалуроновой кислоты и волокон коллагена СТ обладает вязкоэластическими свойствами и считается неньютоновской жидкостью. По мере удаления СТ происходит его постепенное замещение на инфузионный раствор, что приводит к снижению вязкости содержимого витреальной полости и может способствовать изменению гидродинамических условий операции [2].

Первая система для закрытой витрэктомии, разработанная R. Machemer et al. в 1971 г. [3], имела калибр 17G (диаметр инструментов 1,5 мм). При этом витрэктомия выполнялась через один порт, а инфузионная канюля была объединена с фрагментатором СТ [4].

С. O'Malley et al. [5] разработали концепцию трехпортовой витрэктомии с использованием инструментов калибра 20G (диаметр 0,9 мм), которая была реализована в хирургической системе Ocutome 800 Console (Berkley Bioengineering, 1972). Подача инфузионной жидкости в этой системе впервые осуществлялась через отдельную ирригационную магистраль, которая устанавливалась в дополнительный склеротомический разрез. Это открыло возможность для использования инструментов малого диаметра, применения дополнительных инструментов (пинцеты, ножницы, эндокоагулятор), а также позволило снизить турбулентность потоков жидкости [6]. Предложенный принцип трехпортовой витрэктомии является базовой основой микрохирургических систем и по сей день.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФУЗИИ ПРИ ВИТРЕКОМИИ

Диаметр инфузионной трубки, отходящей от емкости с физиологическим раствором, существенно отличается от диаметра канюли, которая устанавливается в порт. Ввиду разницы диаметров происходит неизбежное снижение давления инфузионного потока. Степень этого снижения напрямую зависит от калибра инфузионной канюли и, например, при использовании канюли калибра 20G составляет в среднем 1–2 мм рт. ст. на 1 мл потока в 1 мин, а при использовании канюли меньшего диаметра (25G) составляет в среднем 5 мм рт. ст. на 1 мл потока в 1 мин [7, 8].

При небольших объемах инфузионного потока снижение инфузионного давления во время витрэктомии не вызывает дисбаланса между притоком и оттоком. Несоответствие инфузии и аспирации может возникать во время удаления инструментов из портов (при использовании неклапанных портов), при активной аспирации содержимого витреальной полости витреотомом на высоких значениях вакуума (например, удаление перфторорганического соединения, красителя), а также в случае использования инфузионной канюли и витреотома разных калибров [9, 10].

Во многих хирургических системах (особенно в системах предыдущих поколений) используется гравитационный тип инфузии, при котором емкость со сбалансированным солевым раствором помещается на определенной высоте над уровнем глаза, при этом давление инфузионной жидкости пропорционально высоте инфузионной емкости [11, 12]. При данном типе инфузии давление измеряется в сантиме-

трах водного столба и может быть приближено к миллиметрам ртутного столба с помощью условного коэффициента пересчета — 3:2 (т. е. 60 см вод. ст. приблизительно соответствуют 40 мм рт. ст.) [10]. Чтобы добиться стабильного инфузионного потока в ходе витрэктомии с гравитационным типом инфузии, ирригационную бутылку устанавливают на определенной высоте над глазом. Эта высота выбирается в зависимости от калибра используемых инструментов. Так, при калибре инструментов 20G необходимый уровень давления инфузии составляет 25–30 мм рт. ст., это обеспечивается высотой емкости 35–45 см над уровнем глаза. При использовании калибра 23G необходимо давление инфузии в 30–35 мм рт. ст., что обеспечивается высотой емкости 45–50 см; в случае использования инструментов калибром 25G давление 40–50 мм рт. ст. достигается при высоте емкости 60–75 см над уровнем глаза [7].

Одним из существенных недостатков хирургических систем с гравитационным типом инфузии является их неспособность компенсировать резкие изменения гидродинамических условий, что зачастую приводит к выраженным колебаниям внутриглазного давления (ВГД). Другим недостатком этого типа инфузии можно считать необходимость преобразования сантиметров водного столба в миллиметры ртутного столба, что затрудняет контроль над уровнем инфузионного давления во время операции [2, 8].

ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЙ ВГД ПРИ ВИТРЕКОМИИ НА ВНУТРИГЛАЗНЫЕ СТРУКТУРЫ

Диапазон колебаний ВГД во время витрэктомии составляет от 0 до 120 мм рт. ст., что показано в исследованиях, посвященных оценке изменений ВГД во время витрэктомии на свежезнуклеированных свиных глазах, а также в условиях операционной [13, 14].

Н.А. Quigley et al. [15] экспериментально выявили, что резкое повышение ВГД блокирует ретроградный транспорт нейротрофического фактора головного мозга через аксоны сетчатки. Нарушение доставки основных нейротрофинов из головного мозга может усугубить потерю ганглиозных клеток при глаукоме.

Во избежание неблагоприятного воздействия высокого ВГД на диск зрительного нерва (ДЗН) во время витрэктомии важно учитывать уровень глазного перфузионного давления (ГПД), нормальный диапазон которого составляет от 45 до 60 мм рт. ст. [16, 17]. Необходимо отметить, что понятие ГПД относится только к системе сосудистой микроциркуляции (капилляры диаметром 5–30 мкм и артериолы и вены диаметром до 100 мкм), так как в рамках данного сосудистого звена происходит метаболизм между кровью и тканями, включающий диффузию кислорода, питательных веществ и продуктов метаболизма [18–20].

Повышение ВГД может привести к нарушению артериальной циркуляции глаза, главным образом за счет увеличения сопротивления току крови на уровне артериол, стенка которых состоит из плотного циркулярного слоя гладкомышечных клеток. При сокращении стенки артериол значительно уменьшается просвет сосуда и возрастает сопротивление току крови, что приводит к снижению ГПД, ишемии тканей с последующим развитием в них функциональных нарушений и дегенеративных изменений [21, 22]. Данную физиологическую особенность необходимо учитывать при витрэктомии у пациентов с диагнозом «глаукома» в анамнезе, так как высокое ВГД во время операции может способствовать про-

грессированию глаукоматозной атрофии зрительного нерва и ишемии сетчатки [7]. Кроме того, при снижении ГПД существует риск ишемического повреждения слоев сетчатки фовеальной аваскулярной зоны, единственным источником кровоснабжения которой является хориоидея [23].

Хирургическая травма сетчатки, обширная эндолазеркоагуляция, а также фототоксическое воздействие на сетчатку длительной эндоиллюминации во время витрэктомии могут стать факторами, при которых увеличивается метаболическая потребность сетчатки и усугубляются последствия гипоперфузии при высоком ВГД [24, 25].

Для поддержания хорошо переносящегося ГПД во время хирургического вмешательства уровень ВГД должен составлять не более 55 мм рт. ст. и не менее 35 мм рт. ст., так как снижение ГПД может привести к нарушению регуляторных процессов, повышающих восприимчивость зрительного нерва к ишемическому повреждению [26–28].

Низкий уровень ВГД во время витрэктомии может стать причиной нарушения сферичности глазного яблока с риском повреждения внутриглазных структур, а также вызвать кровотечение из хориоидальных сосудов, сетчатки и радужной оболочки глаза [29].

Таким образом, вышеперечисленные данные подчеркивают важность стабильного ВГД при витрэктомии как одного из ключевых факторов, определяющих успешное выполнение вмешательства и его клинко-функциональный результат. Гидродинамический баланс в ходе витрэктомии обеспечивается непрерывной подачей инфузионного раствора через один из портов и согласованной работой между инфузионной и аспирационной системами [30].

Способы компенсации колебаний ВГД при витрэктомии

Одним из вариантов компенсации колебаний ВГД во время витрэктомии стало применение принудительной инфузии под давлением газа. Этот метод заключается в том, что связанная с источником инфузии посредством трубки воздушная помпа создает в ирригационной емкости положительное давление, увеличивающее приток физиологического раствора в витреальную полость [31]. Одной из первых хирургических систем, в которой был использован данный механизм инфузии, стала разработанная на стыке XX и XXI вв. система Accurus (Alcon Inc.) [32].

По данным исследования L.C. Moorhead et al. [14], использование принудительной инфузии в системе Accurus привело к повышению интраоперационного ВГД в среднем на 10 мм рт. ст., что в свою очередь улучшило стабильность офтальмотонуса во время витрэктомии.

С 2010 г. на рынке представлена хирургическая система Stellaris PC (Bausch & Lomb inc.), в которой, подобно системе Accurus, используется как гравитационная, так и принудительная инфузия под давлением газа. Согласно рекомендации производителя инфузионное давление, используемое при витрэктомии, необходимо задавать на уровне 30–35 мм рт. ст. За счет использования механизма принудительной инфузии Stellaris PC позволяет хирургу при необходимости повышать инфузионное давление до 60 мм рт. ст. примерно за 0,5 с, что может использоваться с гемостатической целью [33, 34].

В последние годы разработаны хирургические системы с принудительным типом инфузии, в которых для достижения необходимого ВГД применяются специализированные алгоритмы, адаптирующие инфузионный поток

под меняющиеся гидродинамические условия операции. Например, порядка 10 лет назад компания Alcon представила хирургическую систему Constellation Vision System, алгоритм управления инфузией которой основан на интраоперационном мониторинге инфузионного потока [7, 35]. Constellation имеет одноразовую кассетную систему, состоящую из двух небольших отделов, один из которых предназначен для подачи инфузионной жидкости, а второй служит для нее дополнительным резервуаром. Благодаря положительному давлению в инфузионных отделах кассеты, которое создается с помощью специального воздушного клапана, а также применению неинвазивного датчика потока система способна регулировать инфузионное давление для поддержания целевого ВГД [10].

Эксперимент Y.J. Kim et al. [36], проведенный с использованием системы Constellation, показал, что при работе витреотома калибра 25G для поддержания ВГД на установленном уровне требуется большее давление инфузии, чем при использовании системы калибра 23G.

P. Falabella et al. [37] описали динамику ВГД при пневматической гильотинной витрэктомии на энуклеированных свиных глазах с использованием системы Constellation и при применении функции активного контроля ВГД. Во время эксперимента ВГД определяли с помощью микроинвазивного датчика давления, который устанавливали через расширенное склеротомическое отверстие. При гравитационном типе инфузии во время витрэктомии ВГД снижалось, доходя до своего минимального значения при достижении максимального уровня вакуума. При использовании функции активного контроля давления система Constellation реагировала на снижение значений ВГД увеличением скорости инфузионного потока, что способствовало восстановлению ВГД до базового уровня примерно за 1,5 с. Было выявлено, что при использовании функции активного контроля давления во время витрэктомии 23G и 25G наблюдалось меньшее снижение ВГД от предустановленного уровня (максимальное снижение ВГД на 12,79 и 21,17 мм рт. ст. соответственно), чем без функции активного контроля ВГД (цифры составили 16,31 и 29,26 мм рт. ст. соответственно). На основании полученных результатов авторы сделали вывод, что технология активного контроля давления позволяет хирургу стабильно поддерживать предустановленное значение ВГД в диапазоне от 20 до 70 мм рт. ст.

H.S. Yang et al. [38] провели исследование по оценке колебаний ВГД во время витрэктомии в двух группах пациентов, в одной из которых (n=33) использовалась система Accurus (принудительная инфузия под давлением газа), а в другой (n=33) — Constellation (активный контроль ВГД). Диапазон колебаний ВГД во время витрэктомии в обеих группах составил 50–70 мм рт. ст. Гипотония и частичный коллапс глазного яблока чаще наблюдались при витрэктомии на системе Accurus по сравнению с системой Constellation.

При сравнении результатов витрэктомии в двух группах пациентов с использованием системы Constellation (n=233) и Accurus (n=281) T. Murray et al. [39] сделали вывод, что средняя продолжительность витрэктомии сократилась с 35 мин при использовании Accurus до 31 мин при использовании Constellation, при этом среднее значение общей продолжительности операции по поводу витреоретинальной патологии уменьшилось с 56 мин при использовании Accurus до 52 мин при использовании Constellation.

Управление инфузионным и аспирационным потоками во время операции в хирургической системе EVA

(DORC Inc.) осуществляется посредством работы мембранного насоса. Насос включает основную и дополнительную камеры и клапанную систему открытия/закрытия, которая приводится в движение плунжерными элементами. Очередность открытия и закрытия насосных камер обеспечивает равномерность притока инфузионной жидкости в витреальную полость и ее оттока по аспирационной линии. При этом система управления потоками встроена в сменную кассету хирургической системы [40].

Итальянской компанией Optikon 2000 SPA была представлена система R-Evolution CR. Алгоритм управления инфузией в данной системе основывается на расчете и интраоперационном контроле как ВГД, так и среднего глазного перфузионного давления (СПГД) [41, 42], которое рассчитывается по следующей формуле:

$$\text{СПГД} = 2/3 \text{ СрАД} - \text{ВГД},$$

где СрАД (среднее артериальное давление) = $1/3 \text{ САД}$ (систолическое артериальное давление) + $2/3 \text{ ДАД}$ (диастолическое артериальное давление), ВГД — внутриглазное давление.

Система R-Evolution, анализируя перечисленные показатели, способна рассчитывать и поддерживать персонализированное ВГД, регулируя инфузионное давление как гравитационным методом, так и с помощью принудительной инфузии под давлением газа.

T. Rossi et al. [42] синхронизировали изменения артериального давления (АД) и ВГД во время витрэктомии на офтальмохирургической системе R-Evolution CR для расчета динамики СПГД, ВГД и АД. Устойчивые подъемы ВГД до 40–50 мм рт. ст., как правило, были обусловлены преднамеренным повышением инфузионного давления хирургом. Спорадические пики, превышающие 70 мм рт. ст. в течение нескольких секунд, в основном являлись результатом манипуляций с глазным яблоком, захватом, вращением и/или введением небольшого количества жидкостей. Такие пики могут быть потенциально опасными, так как острое повышение ВГД приводит к снижению кровотока между юкстапапиллярными капиллярами и капиллярами диска зрительного нерва на 7–8% при увеличении ВГД на каждые 10 мм рт. ст., а внезапное или длительное повышение ВГД во время витрэктомии может вызвать повреждение ганглиозных клеток сетчатки [43–45].

В новой хирургической системе Sophi (This AG, Швейцария) для обеспечения принудительной инфузии используется отдельный роликовый перистальтический насос, встроенный в одноразовую хирургическую кассету. Управление инфузией происходит в зависимости от уровня инфузионного давления, определяемого датчиком, и от уровня вакуума в аспирационной линии. Кассета системы позволяет выполнять активную и пассивную компенсацию пульсаций потока. Пассивная компенсация реализуется за счет инерционного сжатия и растяжения гибкого участка инфузионной трубки, а при активной компенсации колебания потока смягчаются благодаря деформации гибкого участка исполнительным механизмом [46].

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ВИТРЕКТОМИЯ

В плане совершенствования процесса витрэктомии наиболее актуально применение альтернативных высокоэнергетических методов фрагментации СТ, например с помощью ультразвука. Особенность удаления СТ при ультразвуковой витрэктомии заключается в преобразовании СТ в легко-

удаляемую эмульсию, в отличие от традиционной гильотинной работы витреотома, основанной на чередовании циклов «аспирация — рез», которые могут сопровождаться нестабильностью аспирационного потока, повышающей риск ятрогенных повреждений сетчатки [47–49].

По сравнению с витреотомом гильотинного типа у ультразвукового витреотома иной механизм фрагментации СТ, меньший размер рабочего отверстия и больший внутренний диаметр иглы, что способствует снижению сопротивления аспирационному потоку и уменьшению объема используемой инфузионной жидкости [48].

С учетом нового механизма фрагментации СТ и гидродинамических особенностей ультразвуковая витрэктомия является драйвером создания новых алгоритмов и технических решений по части принудительной инфузии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Знание и понимание особенностей гидродинамики инфузионного потока, характера изменений ВГД на различных этапах витрэктомии, а также технического прогресса в области создания офтальмохирургических систем и механизмов инфузии важны для эффективного выполнения оперативных вмешательств в витреальной полости и высокого уровня безопасности для внутриглазных структур. Совершенствование технических и медицинских решений для управления инфузионным потоком во время витрэктомии, а также разработка новых путей реализации принудительной инфузии являются актуальными и перспективными направлениями развития витреоретинальной хирургии.

Литература / References

- Mohamed S., Claes C., Tsang C.W. Review of Small Gauge Vitrectomy: Progress and Innovations. *J Ophthalmol.* 2017;2017:6285869. DOI: 10.1155/2017/6285869.
- Charles S. Fluidics and cutter dynamics. *Dev Ophthalmol.* 2014;54:31–37. DOI: 10.1159/000360446.
- Machemer R., Norton E.W.D. A new concept for vitreous surgery: 3. Indications and results. *Am J Ophthalmol.* 1972;74(6):1034–1056. DOI: 10.1016/0002-9394(72)90720-9.
- Saxena S., Meyer C.H., Ohji L.A. *Vitreoretinal Surgery.* New Delhi: Jaypee Brothers Medical Publishers; 2012.
- O'Malley C., Heintz R.M. Sr. Vitrectomy with an alternative instrument system. *Ann Ophthalmol.* 1975;7(4):585–588, 591–594. PMID: 1147502.
- De Oliveira P.R., Berger A.R., Chow D.R. Vitreoretinal instruments: vitrectomy cutters, endoillumination and wide-angle viewing systems. *Int J Retina Vitreous.* 2016;2:28. DOI: 10.1186/s40942-016-0052-9.
- Steel D.H., Charles S. Vitrectomy fluidics. *Ophthalmologica.* 2011;226 Suppl 1:27–35. DOI: 10.1159/000328207.
- Magalhães O.Jr., Maia M., Maia A. et al. Fluid dynamics in three 25-gauge vitrectomy systems: principles for use in vitreoretinal surgery. *Acta Ophthalmol.* 2008;86(2):156–159. DOI: 10.1111/j.1600-0420.2007.00988.x.
- Abulon D.J., Charles M., Charles D.E. Globe stability during simulated vitrectomy with valved and non-valved trocar cannulas. *Clin Ophthalmol.* 2015;9:1745–1752. DOI: 10.2147/OPTH.S86326.
- Charles S., Calzada J., Wood B. *Vitreous microsurgery.* 5th ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2012.
- Азнабаев Б.М. Ультразвуковая хирургия катаракты — фактоэмульсификация. М.: Парето-Print; 2016.
- Азнабаев Б.М. *Ultrasound cataract surgery — phacoemulsification.* М.: Pareto-Print; 2016 (in Russ.).
- Канюков В.Н., Канюков В.И. Техническое применение офтальмологической операционной системы DORC Associate в офтальмологической практике: методическое указание. Оренбург; 2009.
- [Kanyukov V.N., Kanyukov V.I. Technical application of the DORC Associate ophthalmic operating system in ophthalmic practice: guidelines. Orenburg; 2009 (in Russ.).]
- Sugiura Y., Okamoto F., Okamoto Y. et al. Intraocular pressure fluctuation during microincision vitrectomy with constellation vision system. *Am J Ophthalmol.* 2013;156(5):941–947.e1. DOI: 10.1016/j.ajo.2013.06.016.
- Moorhead L.C., Gardner T.W., Lambert H.M. et al. Dynamic intraocular pressure measurements during vitrectomy. *Arch Ophthalmol.* 2005;123(11):1514–1523. DOI: 10.1001/archophth.123.11.1514.
- Quigley H.A., McKinnon S.J., Zack D.J. et al. Retrograde axonal transport of BDNF in retinal ganglion cells is blocked by acute IOP elevation in rats. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2000;41(11):3460–3466. PMID: 11006239.
- Kim M., Kim S., Kwon H. et al. Association between choroidal thickness and ocular perfusion pressure in young, healthy subjects: Enhanced depth imaging optical coherence tomography study. *Investig Ophthalmol Vis Sci.* 2012;53(7):7710–7717. DOI: 10.1167/iovs.12-10464.
- Khng C., Packer M., Fine I. et al. Intraocular pressure during phacoemulsification. *J Cataract Refract Surg.* 2006;32(2):301–308. DOI: 10.1016/j.jcrs.2005.08.062.
- Alder V.A., Cringle S.J. Vitreal and retinal oxygenation. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol.* 1990;28(2):151–157. DOI: 10.1007/BF00935725.

19. Bill A., Sperber G.O. Control of retinal and choroidal blood flow. *Eye (Lond)*. 1990;4(2):319–325. DOI: 10.1038/eye.1990.43.
20. Ковальчук А.Г. Теоретическое обоснование нового способа диагностики микроциркуляторной ишемии цилиарного тела. *Глаукома*. 2017;16(4):69–78.
21. Kovalchouk A.G. Theoretical justification of a new method in ciliary body microcirculatory ischemia diagnostics. *National Journal glaucoma*. 2017;16(4):69–78 (in Russ.).
22. Кунин В.Д., Редид А.А. Перфузионное давление глаза и его значение в течении первичной открытоугольной глаукомы. Точка зрения Восток-Запад. 2016;3:60–63.
23. Kunin V.D., Redid A.A. Perfusion pressure of the eye and its value in the course of primary open-angle glaucoma. *Tochka zreniya Vostok-Zapad*. 2016;3:60–63 (in Russ.).
24. Cioffi G.A., Granstam E., Alm A. Ocular circulation. In: *Adler's physiology of the eye*. 10th ed. Kaufmann P.L., Alm A., eds. St. Louis, London: Mosby; 2003.
25. Levin L.A., Kaufman P.L. Adler's Physiology of the Eye: Clinical Application. 11th ed. New York: Saunders/Elsevier; 2011.
26. Rossi T., Querzoli G., Angelini G. et al. Ocular perfusion pressure during pars plana vitrectomy: a pilot study. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2014;55(12):8497–8505. DOI: 10.1167/iov.14-14493.
27. Казиев С.Н., Борзенко С.А., Сабурова И.Н. и др. Эндоиллюминация в ходе витреальной хирургии — эволюция вопроса и особенности применения на современном этапе. *Практическая медицина*. 2013;70(9):10–12.
28. [Kaziev S.N., Borzenok S.A., Saburina I.N. et al. Endoillumination in the course of vitreal surgery — history of the issue and administration details in the modern period. *Prakticheskaya medicina*. 2013;70(9):10–12 (in Russ.).]
29. Hayreh S.S. Blood flow in the optic nerve head and factors that may influence it. *Prog Retin Eye Res*. 2001;20(5):595–624. DOI: 10.1016/S1350-9462(01)00005-2.
30. Pillunat L.E., Anderson D.R., Knighton R.W. et al. Autoregulation of human optic nerve head circulation in response to increased intraocular pressure. *Exp Eye Res*. 1997;5(64):737–744. DOI: 10.1006/exer.1996.0263.
31. Sehi M., Flanagan J., Zeng L. et al. Anterior optic nerve capillary blood flow response to diurnal variation of mean ocular perfusion pressure in early untreated primary open-angle glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2005;46(12):4581–4587. DOI: 10.1167/iov.05-0209.
32. Charles S. An engineering approach to vitreoretinal surgery. *Retina*. 2004;24(3):436–444. DOI: 10.1097/00006982-200406000-00015.
33. Williamson T.H. Vitreoretinal surgery. 2nd ed. Heidelberg: Springer; 2013.
34. Agarwal A., Apple D.J., Agarwal S. et al. Air pump to prevent surge. In: Agarwal A., Agarwal S., Sachdev M.S. et al., eds. *Phacoemulsification, Laser Cataract Surgery and Foldable IOLs*. 2nd ed. New Delhi, India: Jaypee Brothers; 2000:624–626.
35. Nazari N.S. Surgical cassette and consumables for combined ophthalmic surgical procedure. U.S. Patent No. 6,561,999 B1. 2003:1–14.
36. Awh C.C. Stellaris PC: Next-generation. (Electronic resource.) URL: <https://retinatoday.com/articles/2011-mar-supplement/stellaris-pc-next-generation-technology> (access date: 14.06.2021).
37. Lai T.Y. Machines and cutters: Stellaris PC. *Dev Ophthalmol*. 2014;54:8–16. DOI: 10.1159/000360443.
38. Huculak J., Martin M., Zica M. Retinal surgery. U.S. Patent No. 6,561,999 B1. 2016:1–14.
39. Kim Y.J., Park S.H., Choi K.S. Fluctuation of infusion pressure during microincision vitrectomy using the constellation vision system. *Retina*. 2015;35(12):2529–2536. DOI: 10.1097/IAE.00000000000000625.
40. Falabella P., Stefanini F.R., Lue J.L. et al. Intraocular pressure changes during vitrectomy using Constellation Vision System's intraocular pressure control feature. *Retina*. 2016;36(7):1275–1280. DOI: 10.1097/IAE.00000000000000911.
41. Yang H.S., Yun Y., Park J. et al. In vivo intraocular pressure monitoring during microincision vitrectomy with and without active control of infusion pressure. *Eur J Ophthalmol*. 2017;27(5):601–606. DOI: 10.5301/ejo.5000956.
42. Murray T., Layton A., Tong K. et al. Transition to a novel advanced integrated vitrectomy platform: Comparison of the surgical impact of moving from the Accurus vitrectomy platform to the Constellation Vision System for microincisional vitrectomy surgery. *Clin Ophthalmol*. 2013;7:367–377. DOI: 10.2147/ophth.s35603.
43. Kuntz J., Vijfinkel G. Irrigation/aspiration system, cartridge, pump unit, surgical machine, method for controlling. U.S. Patent No. 10,238,789 B2. 2019:1–16.
44. Rossi T., Querzoli G., Gelso A. et al. Ocular perfusion pressure control during pars plana vitrectomy: testing a novel device. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. 2017;255(12):2325–2330. DOI: 10.1007/s00417-017-3799-2.
45. Rossi T., Querzoli G., Gelina G.B. Infusion pressure control system. World Intellectual Property Organization. Patent No. WO 2019/012494 A1. 2019:1–26.
46. Minami M., Oku H., Okuno T. et al. High infusion pressure in conjunction with vitreous surgery alters the morphology and function of the retina of rabbits. *Acta Ophthalmol Scand*. 2007;85(6):633–639. DOI: 10.1111/j.1600-0420.2007.00919.x.
47. Michelson G., Groh M., Langhans M. Perfusion of the juxtapapillary retina and optic nerve head in acute ocular hypertension. *Ger J Ophthalmol*. 1996;5(6):215–321. PMID: 9479511.
48. Uchida A., Shinoda H., Matsumoto C. et al. Acute visual field defect following vitrectomy determined to originate from optic nerve by electrophysiological tests. *Cas Rep Ophthalmol*. 2012;3(3):396–405. DOI: 10.1159/000345507.
49. Koppel T. Liquid management in an ophthalmological device. World Intellectual Property Organization. Patent No. WO 2018/083179 A1. 2019:1–70.
50. Pastor-Idoate S., Bonshok R., Irion L. et al. Ultrastructural and histopathologic findings after pars plana vitrectomy with a new hypersonic vitrector system. Qualitative preliminary assessment. *PLoS One*. 2017;12(4):e0173883. DOI: 10.1371/journal.pone.0173883.
51. Stanga P.E., Pastor-Idoate S., Zambrano I. et al. Performance analysis of a new hypersonic vitrector system. *PLoS One*. 2017;12(6):e0178462. DOI: 10.1371/journal.pone.0178462.
52. Aznabae B., Dibaev T., Mukhamadeev T. et al. Twenty-five gauge ultrasonic vitrectomy. *Retina*. 2020;40(7):1443–1450. DOI: 10.1097/iae.00000000000002863.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Азнабаев Булат Маратович — д.м.н., профессор, профессор кафедры офтальмологии с курсом ИДПО ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России; 450008, Россия, г. Уфа, ул. Ленина, д. 3; генеральный директор ЗАО «Оптимедсервис»; 450059, Россия, г. Уфа, ул. 50 лет СССР, д. 8; ORCID iD 0000-0003-1796-8248.

Мухаммадеев Тимур Рафаэлевич — д.м.н., заведующий кафедрой офтальмологии с курсом ИДПО ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России; 450008, Россия, г. Уфа, ул. Ленина, д. 3; заместитель генерального директора по научно-клинической работе ЗАО «Оптимедсервис»; 450059, Россия, г. Уфа, ул. 50 лет СССР, д. 8; ORCID iD 0000-0003-3078-2464.

Дибеев Тагир Ильдарович — к.м.н., доцент кафедры офтальмологии с курсом ИДПО ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России; 450008, Россия, г. Уфа, ул. Ленина, д. 3; заведующий отделом координации научных исследований ЗАО «Оптимедсервис»; 450059, Россия, г. Уфа, ул. 50 лет СССР, д. 8; ORCID iD 0000-0002-7448-6037.

Исмагилов Тимур Наилевич — аспирант кафедры офтальмологии с курсом ИДПО ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России; 450008, Россия, г. Уфа, ул. Ленина, д. 3; м.н.с. отдела координации научных исследований ЗАО «Оптимедсервис»; 450059, Россия, г. Уфа, ул. 50 лет СССР, д. 8; ORCID iD 0000-0003-4132-4979.

Контактная информация: Дибеев Тагир Ильдарович, e-mail: dibaev@yandex.ru.

Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 15.06.2021.

Поступила после рецензирования 08.07.2021.

Принята в печать 02.08.2021.

ABOUT THE AUTHORS:

Bulat M. Aznabae — Dr. Sc. (Med.), Professor, Professor of the Ophthalmology Department with IAPC Course, Bashkir State Medical University; 3, Lenin str., Ufa, 450008, Russian Federation; Director General, CJSC Optimedservis; 8, 50 let SSSR str., Ufa, 450059, Russian Federation; ORCID iD 0000-0003-1796-8248.

Timur R. Mukhamadeev — Dr. Sc. (Med.), Head of the Ophthalmology Department with IAPC Course, Bashkir State Medical University; 3, Lenin str., Ufa, 450008, Russian Federation; Deputy Director General for Research and Clinical Activities, CJSC Optimedservis; 8, 50 let SSSR str., Ufa, 450059, Russian Federation; ORCID iD 0000-0003-3078-2464.

Tagir I. Dibaev — C. Sc. (Med.), Head of the Ophthalmology Department with IAPC Course, Bashkir State Medical University; 3, Lenin str., Ufa, 450008, Russian Federation; Deputy Director General for Research and Clinical Activities, CJSC Optimedservis; 8, 50 let SSSR str., Ufa, 450059, Russian Federation; ORCID iD 0000-0002-7448-6037.

Timur N. Ismagilov — postgraduate student of the Ophthalmology Department with IAPC Course, Bashkir State Medical University; 3, Lenin str., Ufa, 450008, Russian Federation; junior researcher of the Department for Research Coordination, CJSC Optimedservis; 8, 50 let SSSR str., Ufa, 450059, Russian Federation; ORCID iD 0000-0003-4132-4979.

Contact information: Tagir I. Dibaev, e-mail: dibaev@yandex.ru.

Financial Disclosure: no authors have a financial or property interest in any material or method mentioned.

There is no conflict of interests.

Received 15.06.2021.

Revised 08.07.2021.

Accepted 02.08.2021.