

## Структура и метрологические особенности комбинированной патоспецифической измерительной установки для диагностики глаукомы

*А.В. Гуцин*

*Волгоградский государственный медицинский университет*

**Аннотация:** В статье представлена и обоснована структура оригинальной комбинированной патоспецифической измерительной установки для диагностики глаукомы, которая позволит проводить комплексный анализ гидро- и гемодинамики глаза и этим повысит качество диагностики глаукомы. На основании этой структуры в работе был дан развернутый метрологический анализ данной установки как средства биомедицинских измерений. Приведены краткие выводы по работе и определены перспективы дальнейшего развития проекта.

**Ключевые слова:** комбинированная патоспецифическая измерительная установка, тонометрия, реография, сфигмография.

**Актуальность.** Глаукома представляет собой довольно распространенную в мире и в России патологию внутриглазного давления (ВГД), вызывающую необратимые дегенеративные изменения в нейроструктурах сетчатки и зрительного нерва [1].

Установлено, что ВГД состоит из «быстрых» и «медленных» компонентов. «Медленные» компоненты ВГД связаны с балансом продукции и дренажа внутриглазной жидкости, временная динамика этих показателей относительно медленная, изменение этих компонентов занимает часы. «Быстрые» компоненты ВГД определяются объемными и скоростными характеристиками кровотока в сосудистой системе глаза, они могут меняться в течение минут [2].

Традиционно, наиболее широко используемым методом исследования ВГД является тонометрия, выполняемая в настоящее время с помощью целого ряда методов [3-5]. Этими способами, однако, возможно измерение только «медленных» компонентов ВГД, тогда как на динамику нейродегенеративных изменений, определяющих функциональный ущерб от глаукомы, в значительной степени влияют «быстрые» компоненты ВГД [6].

Т.о., значительное распространение заболевания и степень

инвалидизации вследствие него, связаны, в т.ч., и с неадекватностью диагностики на ранней, «предболезненной» стадии заболевания, отсутствием в арсенале практического врача доступного и достаточно точного автоматизированного метода оценки состояния компенсации гидро- и гемодинамических параметров глаза. Это ведет к несвоевременному и неадекватному назначению лечения и, как следствие, к прогрессированию заболевания [7].

По-прежнему недостаточно освещенными в научной литературе остаются вопросы различения понятий «здоровья» и «нормы» применительно к глаукоме [8]. Исследования на взрослых здоровых людях показали, что «норма» в одной возрастной популяции может быть гетерогенной и должна оцениваться с учетом индивидуально-типологических свойств и своеобразия закономерностей организации системной деятельности организма [9, 10].

Сказанное определяет **цель** настоящей работы, состоящую в разработке патоспецифической измерительной установки для диагностики глаукомы.

Достижение этой цели связано с решением следующих исследовательских **задач**:

1. Формализация фазового пространства разрабатываемой установки;
2. Определение структуры данных, с которыми будет работать эта установка;
3. Метрологический анализ общей структуры разрабатываемой установки.

**Материалы и методы.** Для точного определения патологического характера повышения ВГД необходим учет «быстрых», гемодинамических компонентов ВГД. Для этого возможно использование таких неинвазивных методов, как офтальморео- и сфигмография. Эти методы предназначены для

---

определения, соответственно, скоростных и объемных характеристик кровотока в сосудистой системе глаза, они в данной ситуации хорошо дополняют друг друга.

Сказанное определяет высокую практическую значимость метрологического анализа динамики характеристик гидро- и гемодинамики глаза, как единой системы, в фазовом пространстве.

Для описываемого фазового пространства характерна размерность, связанная с многомерным характером получаемых при конкретных исследованиях данных. Так, для интеграции в рамках патоспецифической диагностической установки для диагностики глаукомы пригодны измерения следующих показателей.

**Результаты.** Исходя из изложенного, фазовое пространство проектируемой измерительной установки обобщенно можно представить в следующем виде (рис. 1)



Рис. 1 Обобщенный состав фазового пространства функционирования патоспецифической измерительной установки.

Из представленной иллюстрации видно, что на самом общем уровне

фазовое пространство может быть описано, как трехмерное, что соответствует трем основным измерительным каналам комплексной патоспецифической измерительной установки для диагностики глаукомы.

Каждое из представленных выше измерений фазового пространства сформировано рядом измеряемых величин. Детальный их состав приводится в табл. 1.

Таблица 1.

Состав измерений фазового пространства патоспецифической измерительной установки.

Канал офтальмотоноскографии	Канал реографии	Канал системной гемодинамики
$P_0$	РК	ЧСС
С	А	САД
F	К	ДАД
кБ	А/А	
АГПД	МСБН	
СППО	ССМН	
А/К	УБН	
$\alpha$	УМН	
$\beta$	ИТ	
$\alpha/\beta$	РСИ	
МПО	ИП	
ПЭСГ		

Показатели гидродинамики: « $P_0$ » - истинное внутриглазное давление, «С» – коэффициент оттока внутриглазной жидкости, «F» - минутный объем камерной влаги, «кБ» - коэффициент Беккера ( $P_0/C$ ).

Показатели офтальмосфигмографии: «АГПД» - амплитуда глазного пульса давления; «СППО» - систолический прирост пульсового объема глаза; «А/К» - отношение длительности анакроты к длительности катакроты; « $\alpha$ » - угол анакротического нарастания пульсовой волны; « $\beta$ » - угол спада пульсовой волны; « $\alpha/\beta$ » - отношение, характеризующее качество записи; «МПО» - минутный пульсовый объем (СППО \*10 \*ЧСС), «ПЭСГ» –

показатель эластичности сосудов глаза (СППО/АГПД).

Показатели реофтальмографии: «РК» - реографический коэффициент; «А» - длительность анакроты, «К» - длительность и катакроты; «А/А» - отношение «Амплитуда/Анакрота»; «МСБН» - максимальная скорость быстрого наполнения; «ССМН» - средняя скорость медленного наполнения; «УБН» - ускорение быстрого наполнения, «УМН» - ускорение медленного наполнения; «ИТ» - индекс толерантности; «РСИ» - реографический систолический индекс; «ИП» - индекс «плато».

Показатели системной гемодинамики: «ЧСС» – частота сердечных сокращений; «САД» – систолическое артериальное давление; «ДАД» – диастолическое артериальное давление.

Из изложенного легко получить общее формализованное представление фазового информационного пространства вида (1):

$$IP = \{I_{ts}, I_r, I_h\}, \quad (1)$$

где  $I_{ts}$  – информация канала тоносфигмографии;  $I_r$  – информация канала реографии;  $I_h$  – информация канала системной гемодинамики.

В развернутом виде, учитывая данные табл. 1, это же можно представить в следующем развернутом виде (2):

$$IP = \left\{ \begin{array}{l} I_{PO}, I_C, I_F, I_{KB}, I_{СППО}, I_{АГПД}, I_{\frac{A}{K}}, I_{\alpha}, I_{\beta}, I_{\frac{\alpha}{\beta}}, I_{МПО}, I_{ПЭСГ} \\ I_{РК}, I_A, I_K, I_{\frac{A}{A}}, I_{МСБН}, I_{ССМН}, I_{УБН}, I_{УМН}, I_{ИТ}, I_{РСИ}, I_{ИП} \\ I_{ЧСС}, I_{САД}, I_{ДАД} \end{array} \right\}, \quad (2)$$

где обозначения элементов информационного фазового пространства соответствуют таковым в табл. 1.

В целом, обзор фазового информационного пространства, в

соответствии с которым предполагается построение патоспецифической измерительной установки для диагностики глаукомы характеризует его многомерность и, как следствие, сложность. Поэтому при проектировании такой патоспецифической измерительной установки целесообразно сформировать алгоритм ее работы таким образом, чтобы при формировании итоговых обобщающих результатов происходил учет конкретной измерительной и диагностической ситуации, особенности которой представлены ниже.

В ответ на интолерантный уровень ВГД происходит включение механизмов ауторегуляции тонуса сосудов глаза, что приводит к повышению сосудистого тонуса и снижению эластичности сосудов глаза. Это отражается в наблюдаемых по данным сфигмографии изменениям (снижение СППО и ПЭСГ, увеличение АГПД). Изменения тонуса сосудистой стенки, в свою очередь, приводят к компенсаторному повышению давления в артериях глаза и к повышению перфузионного давления.

Приведенная выше информация о характеристиках гидро- и гемодинамики глаза требует формализации диагностической ситуации при использовании комбинированной патоспецифической диагностической установки. В обобщенном виде, такая ситуация может быть описана следующим образом:

$$M_{\text{дсит}} = \{M_{\text{Фпду}}, M_{\text{Успду}}, M_{\text{Кд}}, G(X, G_c)\} \quad (3)$$

где  $M_{\text{Фпду}}$  - множество моделей функции патоспецифической диагностической установки;  $M_{\text{Успду}}$  - множество условий существования патоспецифической диагностической установки;  $M_{\text{Кд}}$  - множество моделей диагностических критериев;  $G(X, G_c)$  - графовая модель структуры патоспецифической диагностической установки.

---

Согласно отношению (3), на структурной схеме патоспецифической диагностической установки, сводимой к графу со множеством узлов ( $X$ ) и множества ребер-связей ( $\Gamma_C$ ) ключевым является вес ребер, определяемый функцией  $M_{\text{ФПДУ}}$ , который реализуется элементами системы. Весовые члены отношения (3)  $m_{j\text{ФПДУ}} \in M_{\text{ФПДУ}}$  характеризуются подмножеством  $M_{j\text{УСПДУ}}$  реализации функции  $m_{j\text{ФПДУ}}$  и подмножеством критериев их реализации  $M_{j\text{КД}}$ .

Отсюда следует, что функционирование практической реализации патоспецифической диагностической установки будет целиком зависеть от эффективности реализации каждой  $m_{j\text{ФПДУ}}$  при соответствующих  $M_{j\text{УСПДУ}}$  и  $M_{j\text{КД}}$ . Такой подход позволит предельно снизить размерность описанного выше пространства  $P$  (2) при сохранении системности решения задачи мониторинга комплекса характеристик глазной гидро- и гемодинамики. Весь структурированный таким образом информационный поток патоспецифической измерительной установки используется как основа системы поддержки принятия медицинских диагностических решений.

Разработанная патоспецифическая диагностическая установка позволяет производить оценку амплитудных и объемных параметров кровотока глаза и на этом основании судить о состоянии адекватности внутриглазного кровотока и состоятельности механизмов ауторегуляции тонуса сосудов глаза.

В целом следует отметить, что, несмотря на появление в последние годы в нашей стране и за рубежом работ сходной тематической направленности, недостаточно исследованным остаётся вопрос о взаимосвязи между уровнем толерантного внутриглазного давления, показателями общей гемодинамики и состоянием регионарной гемодинамики глаза у больных глаукомой. Это относится как к исследованиям, базировавшимся на методе сфигмографии, так и к случаям применения различных вариантов доплерографии и ФАГ. Кроме того, в известных нам работах, выполненных

---

с применением метода сфигмографии, не производился достаточно жёсткий контроль качества получаемых записей, что, наряду с игнорированием влияния на результаты сфигмографии изменений системной гемодинамики, в ряде случаев могло приводить к снижению достоверности результатов исследований.

Вышеизложенные данные можно преобразовать в форму графа, характеризующего информационные потоки в патоспецифической измерительной диагностической установке. Такой граф представлен на рис. 2.

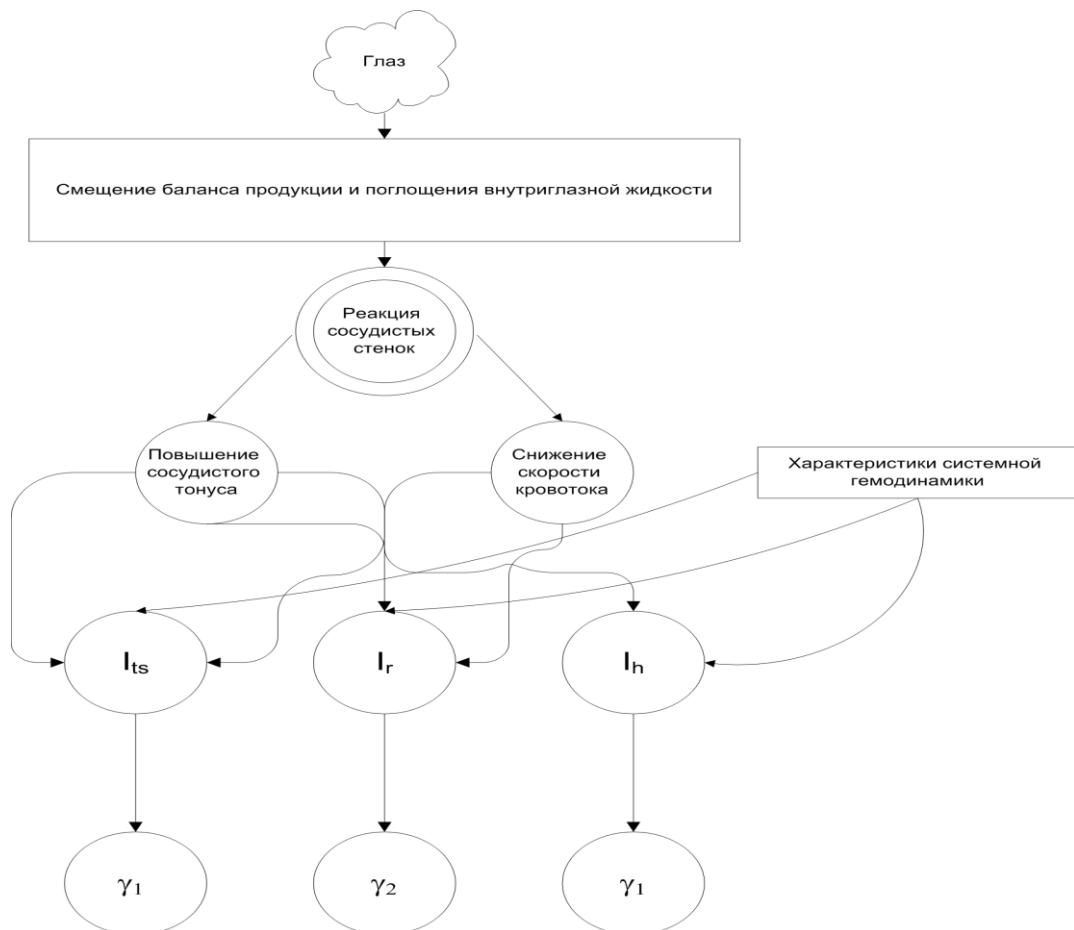


Рис. 2. Графическая характеристика информационных потоков на входе патоспецифической измерительной установки

Рис. 2 графически иллюстрирует связь патофизиологических



процессов, происходящих в глазу и входных характеристик патоспецифической измерительной установки ( $\gamma_{1..3}$ ).

В состав патоспецифической диагностической установки входят модули реографии, офтальмотоноскофигмографии и измерения параметров системной гемодинамики.

Представленные данные дают возможность осуществить синтез общей структуры, рассматриваемой патоспецифической диагностической установки как многоканальной информационной измерительной системы. Такая структура представлена на рис. 3.

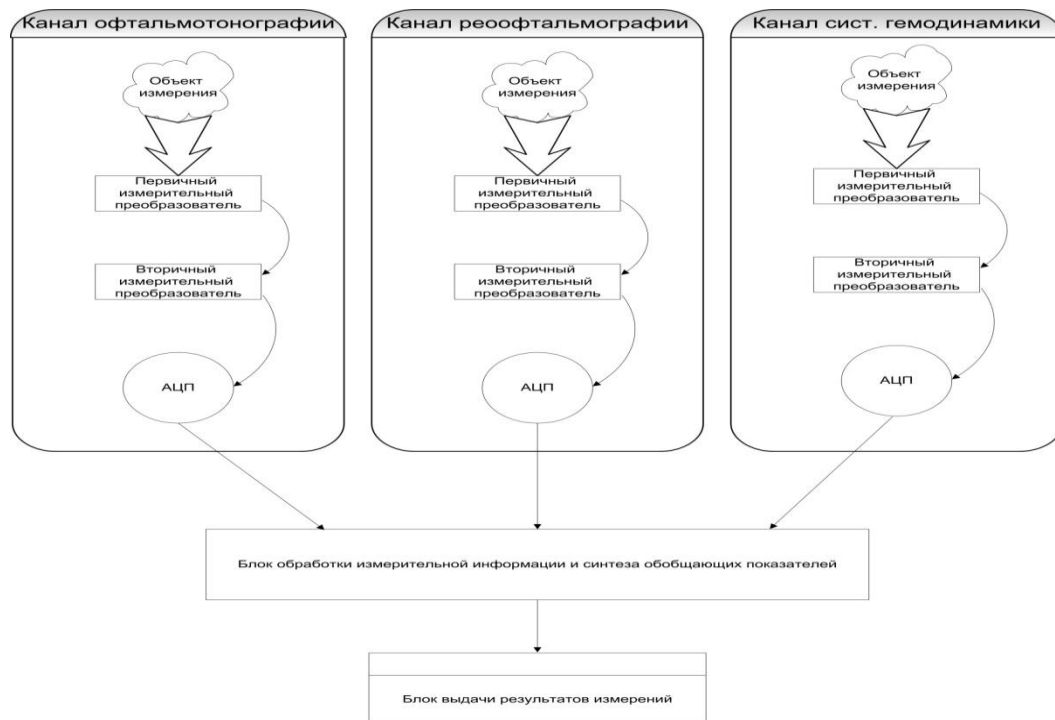


Рис. 3. Общая структура патоспецифической измерительной установки для диагностики глаукомы.

Структура патоспецифической измерительной установки для диагностики глаукомы, представленная на рис. 3, состоит из 3 структурно идентичных измерительных каналов, предназначенных, соответственно, для измерения характеристик офтальмотоноскофигмограмм, офтальмореограмм и характеристик системной гемодинамики.

Для данной информационной измерительной системы целесообразно

исследование ее метрологических характеристик. Перечислим общие положения определяющие свойства патоспецифической диагностической установки как средства биомедицинских измерений:

- обеспечение единства измерений и сравнимости результатов работы патоспецифической диагностической установки с другими средствами измерения глазной гидро- и гемодинамики;
- возможность определения неопределенности измеряемых с помощью разрабатываемой системы характеристик глаза практически реализуемыми методами и динамического мониторинга этой неопределенности.

В качестве исходной структуры, на основании которой возможно формирование измерительного уравнения, пригодного для описания патоспецифической измерительной установки для комплексного исследования глазной гидро- и гемодинамики, целесообразно использование структуры информационных потоков, которую иллюстрирует граф (рис. 4).

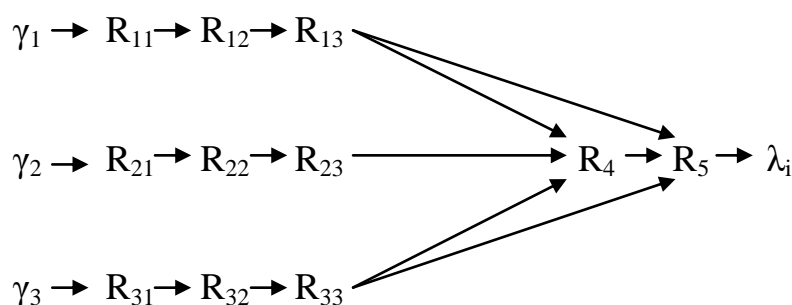


Рис. 4. Граф структуры информационных потоков.

Функциональное значение вершин и ребер графа (рис. 4):

$\gamma_i$  – информационные потоки, подающиеся на входы:

$\gamma_1$  – офтальмотоноскофограф;

$\gamma_2$  – офтальмореограф;

$\gamma_3$  – измерителя АД и ЧСС.

Эти потоки представляют собой источники информации в виде органа зрения и сердечнососудистой системы обследуемого.

$R_i$  – отображение преобразований, проводимых в процессе исследований: 1-офтальмотоноскографии; 2 – офтальмоореографии; 3 – измерения АД и ЧСС.

$R_{ij}$  – графовое отображение управления последовательностью формирования множества результатов измерения, в которую входит реализация следующих алгоритмов патоспецифической измерительной установки – получение данных о динамике внутриглазного давления, о динамике кровенаполнения сосудов глаза, о функциональных характеристиках системной гемодинамики.

Из показанного выше следует общее уравнение измерений, реализуемое описываемой патоспецифической измерительной установкой (4):

$$\lambda_{ij}(t)_{\substack{i=1,4 \\ j=1,2,3}} = R_5 R_{k2} \begin{cases} \varphi_{1j}(t) \\ \varphi_{2j}(t) \\ \varphi_{3j}(t) \\ R_4 R_{k1} \begin{cases} \varphi_{1j}(t) \\ \varphi_{2j}(t) \\ \varphi_{3j}(t) \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

Полная погрешность измерения – разность между результатами выполнения реальной и гипотетической измерительной процедуры. Имея представленную выше информацию об измерительной ситуации, можно записать формальное выражение полной погрешности измерительного канала офтальмотоноскографии.

Исходя из этого, можно записать формальное выражение полной погрешности измерительного канала толерантности ВГД (5):

$$\lambda_{4j}(t) = R_5 R_4 R_{k1} \begin{cases} \varphi_{1j}(t) \\ \varphi_{2j}(t) = R_5 \varphi_{4j}(t), \\ \varphi_{3j}(t) \end{cases} \quad (5)$$

где

$$\varphi_{4j}(t) = R_4 R_{k1} \begin{cases} \varphi_{1j}(t) \\ \varphi_{2j}(t) \\ \varphi_{3j}(t) \end{cases}$$

Ниже представлено уравнение полной погрешности рассматриваемой установки (6):

$$\Delta\lambda_{4j}(t) = \Delta_5\lambda_{4j}(t) + \Delta\varphi_{4j}(t) \quad (6)$$

Описанную полную погрешность можно разложить на элементы следующим образом (7):

$$\Delta_5\lambda_{4j}(t) = R_5\varphi_{4j}(t) - R_5^r\varphi_{4j}(t) \quad (7)$$

а также (8)

$$\Delta_{\varphi_{4j}}\lambda_{4j}(t) = R_5^r\varphi_{4j}(t) - R_5^r\varphi_{4j}^r(t). \quad (8)$$

**Заключение.** Таким образом, метрологический анализ разработанной в рамках настоящего исследования патоспецифической установки для диагностики глаукомы имеет ряд особенностей, связанных с тем, что погрешности процесса измерения формируются, исходя из известных паспортных значений соответствующих показателей и из погрешностей, связанных с конкретной реализацией аппаратно-программного обеспечения

установки.

Исходя из изложенного, можно сделать вывод, что разрабатываемая патоспецифическая измерительная установка для диагностики глаукомы является представителем нового класса медицинской техники, предназначенной для поддержки принятия медицинских решений, в частности, связанных с проблемами диагностики глаукомы. Применение такой установки позволит существенно сократить совокупную трудоемкость диагностического процесса при данном заболевании, повысить производительность труда медицинского персонала и, в целом, повысить качество диагностики такого социально-значимого неизлечимого хронического заболевания, как глаукома.

### **Литература**

1. Zhang N., Wang J., Chen B., Li Y., Jiang B. Prevalence of primary angle closure glaucoma in the last 20 years: a meta-analysis and systematic review // *Frontiers in Medicine*. -2021. –N.7. p.79.

2. Lee K., Yang H., Kim J.Y., Seong G.J., Kim C.Y., Bae H.W. Risk factors associated with structural progression in normal-tension glaucoma: intraocular pressure, systemic blood pressure, and myopia // *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. -2020. –N. 61(8). - pp. 35-35.

3. Brusini P., Salvetat M.L., Zeppieri M. How to measure intraocular pressure: an updated review of various tonometers // *Journal of clinical medicine*. - 2021. –N. 10(17). - p.3860.

4. Гуцин А.В. Устройство для бесконтактного измерения давления в передних цилиарных артериях глаза // *Инженерный вестник Дона*. -2018. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5202](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5202)

5. Гуцин А.В. Комбинированный офтальмопневмогониометр // *Инженерный вестник Дона*. 2022. №6. URL:

ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7756

6. Jammal A.A., Berchuck S.I., Mariottoni E.B., Tanna A.P., Costa V.P., Medeiros F.A. Blood pressure and glaucomatous progression in a large clinical population // *Ophthalmology*. -2022. –N. 129(2). - pp. 161-170.

7. Janani R., Rajamohana, S.P. Early detection of glaucoma using optic disc and optic cup segmentation: A survey // *Materials Today: Proceedings*. -2021. – N.45. - pp. 2763-2769.

8. Lee J.W., Chan P.P., Zhang X., Chen L.J., Jonas J.B. Latest developments in normal-pressure glaucoma: diagnosis, epidemiology, genetics, etiology, causes and mechanisms to management. // *Asia-pacific Journal of Ophthalmology (Philadelphia, Pa.)*. -2019. –N. 8(6). - p.457.

9. Jayaram H. Intraocular pressure reduction in glaucoma: Does every mmHg count? // *Taiwan Journal of Ophthalmology*. -2020. –N. 10(4). - p.255.

10. Villasana G.A., Bradley C., Ramulu P., Unberath M., Yohannan, J. The effect of achieving target intraocular pressure on visual field worsening // *Ophthalmology*. -2022. –N. 129(1). – pp. 35-44.

### References

1. Zhang N., Wang J., Chen B., Li Y., Jiang B. *Frontiers in Medicine*. 2021. N.7. p.79.

2. Lee K., Yang H., Kim J.Y., Seong G.J., Kim C.Y., Bae H.W. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 2020. N. 61(8). pp. 35-35.

3. Brusini P., Salvetat M.L., Zeppieri M. *Journal of clinical medicine*. 2021. N. 10(17). p.3860.

4. Guschin A.V. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2018. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5202](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5202)

5. Guschin A.V. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2022. №6. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7756](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7756)



6. Jammal A.A., Berchuck S.I., Mariottoni E.B., Tanna A.P., Costa V.P., Medeiros F.A. Ophthalmology. 2022. N. 129(2). pp. 161-170.
7. Janani R., Rajamohana, S.P. Materials Today: Proceedings. 2021. N.45. pp. 2763-2769.
8. Lee J.W., Chan P.P., Zhang X., Chen L.J., Jonas J.B. Asia-pacific Journal of Ophthalmology (Philadelphia, Pa.). 2019. N. 8(6). p.457.
9. Jayaram H. Taiwan Journal of Ophthalmology. 2020. N. 10(4). p.255.
10. Villasana G.A., Bradley C., Ramulu P., Unberath M., Yohannan, J. Ophthalmology. 2022. N. 129(1). pp. 35-44.