

# Оптимизация паттерна фрагментации ядра хрусталика в ходе гибридной фактоэмульсификации при различной плотности катаракты

Ю.Н. Юсеф<sup>1,2</sup>С.Н. Юсеф<sup>1</sup>А.С. Введенский<sup>1</sup>М.Н. Иванов<sup>1</sup>, Л. Алхарки<sup>1</sup>, Н.Д. Фокина<sup>2</sup><sup>1</sup> ФГБНУ «Научно-исследовательский институт глазных болезней имени М.М. Краснова»  
ул. Россолимо, 11а, б, Москва, 119021, Российская Федерация<sup>2</sup> ФБАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова»  
(Сеченовский Университет) Министерства здравоохранения Российской Федерации  
Большая Пироговская ул., 2, стр. 4, Москва, 119991, Российская Федерация

## РЕЗЮМЕ

**Офтальмология. 2024;21(4):702–708**

**Цель** — сравнительное исследование энергетических и гидродинамических параметров фактоэмульсификации при использовании различных паттернов фемтолазерной фрагментации ядра хрусталика у пациентов с катарактой III и IV степени плотности по классификации Буратто. **Пациенты и методы.** Фемтолазерная (гибридная) фактоэмульсификация произведена у 252 пациентов (252 глаза) с катарактой III степени плотности — 1-я группа, у 237 пациентов (237 глаз) IV степени плотности — 2-я группа. В подгруппе 1А для фемтолазерной фрагментации ядра применяли паттерн «пицца» (10 радиальных разрезов), в подгруппе 1В — паттерн «цилиндры» (сочетание 8 радиальных разрезов с 5 циркулярными разрезами), в подгруппе 1С — паттерн «сетка» (8 радиальных разрезов в комбинации с множественными разрезами в центральной зоне в виде сетки с размером ячейки 0,5 мм). В подгруппе 2А для фемтолазерной фрагментации ядра применяли паттерн «пицца», в подгруппе 2В — паттерн «цилиндры», в подгруппе 2С — паттерн «сетка». Передний капсулорексис и предварительную фрагментацию ядра хрусталика выполняли с помощью фемтолазерной хирургической системы VICTUS. Подсчитывали эффективное время ультразвука, объем израсходованного ирригационного раствора на этапе эмульсификации фрагментов ядра. Через 3 месяца после операции оценивали потерю клеток эндотелия роговицы. **Результаты.** В 1-й группе наименьшее эффективное время ультразвука выявлено при использовании паттерна «сетка» —  $1,65 \pm 0,69$  с, что было достоверно меньше по сравнению с паттерном «цилиндры» —  $2,33 \pm 0,72$  с ( $p < 0,05$ ) и паттерном «пицца» —  $3,18 \pm 0,83$  с ( $p < 0,01$ ). Во 2-й группе наименьшее эффективное время ультразвука выявлено при использовании паттерна «сетка» —  $3,96 \pm 0,81$  с, что было достоверно меньше по сравнению с паттерном «цилиндры» —  $4,93 \pm 0,93$  с ( $p < 0,05$ ) и паттерном «пицца» —  $6,17 \pm 1,13$  с ( $p < 0,05$ ). В 1-й группе объем ирригационного раствора, израсходованный в ходе эмульсификации фрагментов ядра, был достоверно меньше при применении паттерна «сетка» —  $20,3 \pm 3,0$  мл по сравнению с паттернами «цилиндры» —  $30,4 \pm 5,6$  мл ( $p < 0,05$ ) и паттерном «пицца»  $38,2 \pm 7,8$  мл ( $p < 0,01$ ). Во 2-й группе объем ирригационного раствора, израсходованный в ходе эмульсификации фрагментов ядра, был достоверно меньше при применении паттерна «сетка» —  $39,0 \pm 7,9$  мл по сравнению с паттернами «цилиндры» —  $57,5 \pm 10,0$  мл ( $p < 0,05$ ) и паттерном «пицца» —  $77,0 \pm 12,9$  мл ( $p < 0,01$ ). В 1-й группе после использования паттерна «сетка» потеря клеток эндотелия роговицы составила  $3,36 \pm 0,93$  %, что было существенно меньше по сравнению с паттерном «цилиндры» —  $5,04 \pm 1,21$  % ( $p < 0,05$ ) и паттерном «пицца» —  $6,93 \pm 1,53$  % ( $p < 0,05$ ). Во 2-й группе после использования паттерна «сетка» потеря клеток эндотелия роговицы составила  $8,61 \pm 1,65$  %, что было существенно меньше по сравнению с паттерном «цилиндры» —  $9,83 \pm 1,73$  % ( $p < 0,05$ ) и паттерном «пицца» —  $11,52 \pm 1,91$  % ( $p < 0,05$ ). **Заключение.** Паттерн «сетка» позволяет минимизировать эффективное время ультразвука, объем израсходованного ирригационного раствора и, как следствие, потерю клеток эндотелия роговицы по сравнению с другими паттернами фемтолазерной фрагментации ядра хрусталика.

**Ключевые слова:** катаракта, ядро хрусталика, фемтосекундный лазер, фактоэмульсификация

**Для цитирования:** Юсеф Ю.Н., Юсеф С.Н., Введенский А.С., Иванов М.Н., Алхарки Л., Фокина Н.Д. Оптимизация паттерна фрагментации ядра хрусталика в ходе гибридной фактоэмульсификации при различной плотности катаракты. *Офтальмология*. 2024;21(4):702–708. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2024-4-702-708>

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

**Конфликт интересов отсутствует.**



# Optimization of the Lens Nucleus Fragmentation Pattern During Hybrid Phacoemulsification with Different Cataract Densities

Yu.N. Yusef<sup>1,2</sup>, S.N. Yusef<sup>1</sup>, A.S. Vvedenskiy<sup>1</sup>, M.N. Ivanov<sup>1</sup>, L. Alkarki<sup>1</sup>, N.D. Fokina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> M.M. Hrasnov Research Institute of Eye Diseases  
Rossolimo str. 11A, B, Moscow, 119021, Russian Federation

<sup>2</sup> Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University)  
Bolshaya Pirogovskaya str., 2, bld. 4, Moscow, 119991, Russian Federation

## ABSTRACT

Ophthalmology in Russia. 2024;21(4):702–708

**Purpose:** comparative study of the energy and hydrodynamic parameters of phacoemulsification using different patterns of femtosecond laser fragmentation of the lens nucleus in patients with grade III and IV cataracts. **Patients and methods.** Femtosecond laser (hybrid) phacoemulsification was performed in 252 patients (252 eyes) with grade III cataracts (group 1), and 237 patients (237 eyes) with grade IV cataracts according to the Buratto classification (group 2). In subgroup 1A, the pizza pattern (10 radial incisions) was used for femtosecond laser fragmentation of the nucleus. In subgroup 1B — the cylinder pattern (a combination of 8 radial incisions with 5 circular incisions), and in subgroup 1C — the grid pattern (8 radial incisions in combination with multiple incisions in the central zone in the form of a grid with a cell of 0.5 mm).

In subgroup 2A, the pizza pattern was used for femtosecond laser fragmentation of the nucleus, in subgroup 2B — the cylinder pattern, and in subgroup 2C — the mesh pattern. Anterior capsulorhexis and preliminary fragmentation of the lens nucleus were performed using the VICTUS femtosecond laser surgical system. The effective ultrasound time and volume of the irrigation solution consumed at the stage of emulsification of the nuclear fragments were calculated. Corneal endothelial cell loss was assessed in 3 months after the surgery. **Results.** In group 1, the shortest effective ultrasound time was revealed if the mesh pattern  $1.65 \pm 0.69$  s, it was significantly less than the cylinder pattern —  $2.33 \pm 0.72$  s ( $p < 0.05$ ) and the pizza pattern —  $3.18 \pm 0.83$  s ( $p < 0.01$ ). In group 2, the shortest effective ultrasound time was revealed when using the “grid” pattern  $3.96 \pm 0.81$  s, it was significantly less than the “cylinders” pattern —  $4.93 \pm 0.93$  s ( $p < 0.05$ ) and the “pizza” pattern —  $6.17 \pm 1.13$  s ( $p < 0.05$ ). In group 1, the volume of irrigation solution consumed during emulsification of nuclear fragments was significantly less when using the “grid” pattern —  $20.3 \pm 3.0$  ml compared to the “cylinders” patterns —  $30.4 \pm 5.6$  ml ( $p < 0.05$ ) and the “pizza” pattern  $38.2 \pm 7.8$  ml ( $p < 0.01$ ). In group 2, the volume of irrigation solution consumed during emulsification of nuclear fragments was significantly less when using the “mesh” pattern —  $39.0 \pm 7.9$  ml compared to the “cylinder” patterns —  $57.5 \pm 10.0$  ml ( $p < 0.05$ ) and the “pizza” pattern —  $77.0 \pm 12.9$  ml ( $p < 0.01$ ). In group 1, after using the “mesh” pattern, the loss of corneal endothelial cells was  $3.36 \pm 0.93$  %, which was significantly less compared to the “cylinder” pattern —  $5.04 \pm 1.21$  % ( $p < 0.05$ ) and the “pizza” pattern —  $6.93 \pm 1.53$  % ( $p < 0.05$ ). In group 2, after using the “grid” pattern, the loss of corneal endothelial cells was  $8.61 \pm 1.65$  %, it is significantly less compared to the “cylinders” pattern —  $9.83 \pm 1.73$  % ( $p < 0.05$ ) and the “pizza” pattern —  $11.52 \pm 1.91$  % ( $p < 0.05$ ). **Conclusion.** The “grid” pattern allows to minimize the effective ultrasound time, the volume of the spent irrigation solution and, as a consequence, the loss of corneal endothelial cells compared to other patterns of femtosecond laser fragmentation of the lens nucleus.

**Keywords:** cataract, lens nucleus, femtosecond laser, phacoemulsification

**For citation:** Yusef Yu.N., Yusef S.N., Vvedenskiy A.S., Ivanov M.N., Alkarki L., Fokina N.D. Optimization of the Lens Nucleus Fragmentation Pattern During Hybrid Phacoemulsification with Different Cataract Densities. *Ophthalmology in Russia*. 2024;21(4):702–708. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2024-4-702-708>

**Financial Disclosure:** no author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

**There is no conflict of interests.**

Применение фемтосекундного лазера в факохирургии явилось важнейшим шагом на пути совершенствования технологий хирургии хрусталика и позволило проводить удаление катаракты на качественно новом уровне. Фемтосекундный лазер обеспечивает выполнение роговичных разрезов, переднего кругового капсулорексиса и предварительной фрагментации ядра с недостижимой для мануальных методик точностью и повторяемостью [1–5].

Важнейшей тенденцией факохирургии двух последних десятилетий стало стремление хирургов максимально уменьшать ультразвуковое энергетическое воздействие на ткани глазного яблока за счет внедрения новых

технологий и хирургических приемов. Одним из таких хирургических приемов, позволяющих значительно уменьшать эффективное время ультразвука, является фрагментация ядра хрусталика. Все современные фемтолазерные хирургические системы дают возможность выполнять фрагментацию ядра хрусталика с использованием различных паттернов, имеющих в программном обеспечении устройства, до вскрытия глазного яблока [6–10].

Современные исследования эффективности предварительной фемтолазерной фрагментации ядра хрусталика показали практически двукратное снижение энергетической нагрузки (эффективного времени ультразвука)

и аналогичное уменьшение объема ирригационного раствора, необходимого для ядра хрусталика, по сравнению со стандартной торсионной факоэмульсификацией. Соответственно этому уменьшается и потеря клеток эндотелия роговицы, что является наиболее точным критерием травматичности удаления катаракты [11–13].

При этом в ряде работ показано, что при использовании различных паттернов фемтолазерной фрагментации ядра энергетические и гидродинамические параметры факоэмульсификации имеют достаточно выраженные различия [13, 14].

В то же время в некоторых исследованиях отмечено отсутствие существенных отличий в параметрах факоэмульсификации после применения разных паттернов фемтолазерной фрагментации у пациентов с катарактой различной степени плотности [15].

Современные фемтолазерные хирургические системы позволяют выполнять предварительную фрагментацию ядра с различными паттернами. Возможно разделение ядра с помощью 4, 6, 8 или 10 радиальных разрезов на сегменты, что дало название для такого паттерна — «пицца». В других аппаратах предусмотрено разделение ядра хрусталика на кубические фрагменты. Кроме того, предложено программное обеспечение, позволяющее комбинировать различные паттерны. В фемтолазерной системе VICTUS (Technolas Perfect Vision, Германия) возможна комбинация 4, 8 или 10 радиальных разрезов ядра с множественными циркулярными разрезами (паттерн «цилиндры»). Помимо этого, имеется комбинированный паттерн, включающий 8 радиальных разрезов с множественными взаимно перпендикулярными разрезами с интервалом до 300 микрон в виде сетки (паттерн «сетка») [5, 13, 16–18]. Применение комбинированных паттернов позволяет разделять ядро хрусталика на очень мелкие фрагменты, что, по мнению большинства исследователей, обеспечивает существенное снижение энергетической нагрузки и, соответственно, травматизации внутриглазных структур низкочастотным ультразвуком [5, 13, 14].

Целью настоящей работы было сравнительное исследование энергетических и гидродинамических параметров гибридной факоэмульсификации при использовании различных паттернов фемтолазерной фрагментации ядра хрусталика у пациентов с катарактой III и IV степени плотности.

## ПАЦИЕНТЫ И МЕТОДЫ

Произведено хирургическое лечение у 252 пациентов с незрелой катарактой III степени плотности (252 глаза) — первая группа, а также у 237 пациентов с незрелой катарактой IV степени плотности по классификации Буратто (237 глаза) — вторая группа. Пациенты были разделены на подгруппы в зависимости от паттерна фрагментации ядра хрусталика. Необходимо отметить, что все группы и подгруппы пациентов были сопоставимы по возрасту.

В подгруппу 1А вошли 83 пациента (83 глаза) в возрасте от 62 до 78 лет (в среднем  $71,1 \pm 2,2$  года), которым была проведена фемтолазерная фрагментация ядра с использованием паттерна «пицца» (10 радиальных разрезов) (рис. 1). Подгруппа 1В состояла из 82 пациентов (82 глаза) в возрасте от 62 до 77 лет (в среднем  $70,8 \pm 2,1$  года). В данной подгруппе была проведена фемтолазерная фрагментация ядра с использованием паттерна «цилиндры» (комбинация 8 радиальных разрезов с 5 циркулярными разрезами) (рис. 2). Группа 1С включала 87 пациентов (87 глаз) в возрасте от 63 до 79 лет (в среднем  $71,3 \pm 2,4$  года) с катарактой III степени плотности. В этих случаях проводилась фемтолазерная фрагментация ядра с использованием паттерна «сетка» (8 радиальных разрезов в сочетании с множественными разрезами в центральной зоне в виде сетки с ячейкой 0,5 мм) (рис. 3).

В подгруппу 2А были включены 77 пациентов (77 глаз) в возрасте от 63 до 78 лет (в среднем  $70,7 \pm 2,0$  года) с катарактой IV степени плотности. Им была проведена операция гибридной факоэмульсификации с предварительной фемтолазерной фрагментацией ядра с использованием паттерна «пицца» (разделение ядра на 10 радиальных разрезов) (рис. 1).

В подгруппу 2В были включены 79 пациентов (79 глаз) в возрасте от 64 до 79 лет (в среднем  $71,7 \pm 2,6$  года), которым также была проведена гибридная факоэмульсификация с предварительной фемтолазерной фрагментацией, но с использованием паттерна «цилиндры» (разделение ядра на 8 радиальных и 5 циркулярных разрезов) (рис. 2).

В подгруппу 2С был включен 81 пациент (81 глаз) в возрасте от 64 до 79 лет (в среднем  $71,9 \pm 2,7$  года). В этой подгруппе была проведена фрагментация ядра фемтосекундным лазером с использованием паттерна «сетка» (сочетание 8 радиальных разрезов и множественных перпендикулярных разрезов в центральной зоне, образующих сетку с ячейкой размером 0,5 мм) (рис. 3).

В сформированные группы не включали пациентов старше 79 лет, имевших осложненную катаракту, также страдающих сопутствующей патологией глазного яблока. Больных, имеющих тяжелые соматические заболевания, также не включали в исследование.

При проведении эмульсификации фрагментов, созданных фемтосекундным лазером, был измерен объем ирригационной жидкости, необходимый для данного этапа хирургического вмешательства. Стандартизацию показателей ультразвукового воздействия в ходе операции осуществляли, определяя эффективное время ультразвука ( $T$ ) по формуле:  $T = P \times t / 100$  %, где  $P$  — мощность ультразвука в процентах,  $t$  — время в секундах.

В рамках проведенной работы передний круговой капсулорексис и предварительная фрагментация ядра хрусталика были выполнены с применением фемтолазерной хирургической системы VICTUS (Technolas Perfect Vision, Германия). Чтобы обеспечить стабильное

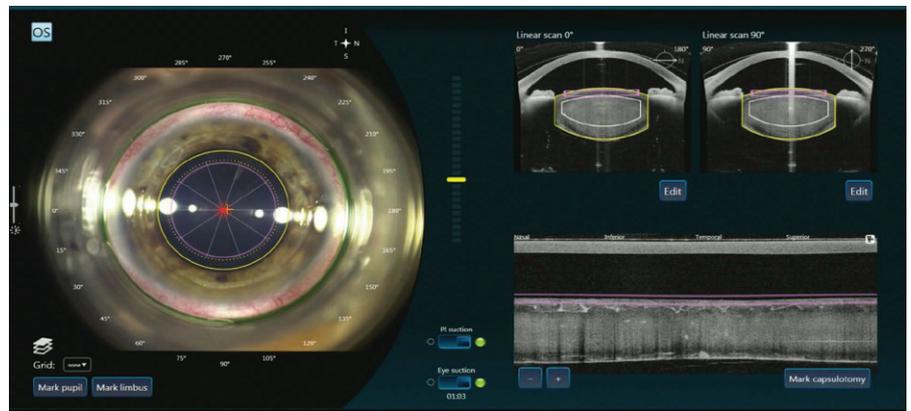
внутрикапсульное положение интраокулярной линзы (ИОЛ), диаметр переднего капсулорексиса составил от 5,0 до 5,2 мм.

У пациентов с III степенью плотности ядра хрусталика, в соответствии с нашей дифференцированной методикой фемтолазерной фрагментации, использовали энергию импульсов фемтосекундного лазера в диапазоне от 7000 до 7200 наноджоулей. В то же время у пациентов с IV степенью катаракты при этой же методике применяли энергию лазерных импульсов от 7700 до 7900 наноджоулей [17, 18].

Во всех хирургических вмешательствах эмульсификацию фрагментированного фемтосекундным лазером ядра хрусталика и удаление кортикальных масс проводили, применяя факоэмульсификатор «Centurion Vision System» (Alcon). В ходе операции использовали одни и те же вископрепараты. После удаления катаракты в капсульный мешок была имплантирована гидрофобная акриловая ИОЛ. Каких-либо операционных и послеоперационных осложнений у всех включенных в исследование пациентов не отмечали.

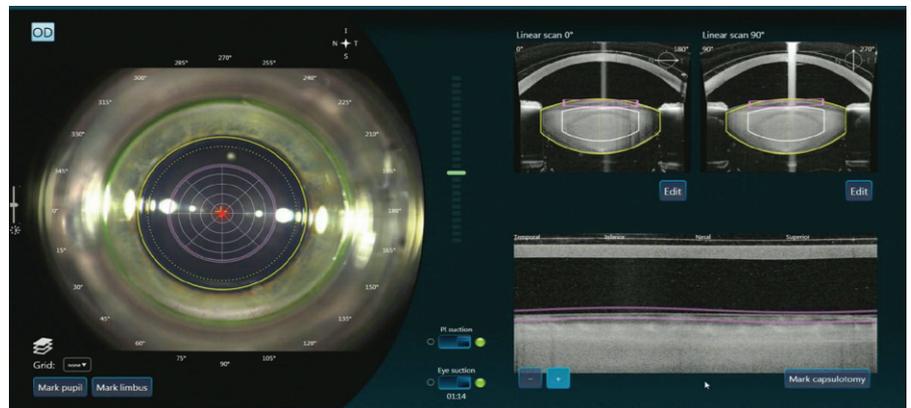
Срок наблюдения составил 3 месяца после хирургического вмешательства. С использованием бесконтактного эндотелиального микроскопа SP-3000P (TOPCON, Япония) до операции и через 3 месяца после нее, когда стабилизируется плотность эндотелия роговицы, выполняли подсчет клеток эндотелия и определяли толщину роговицы в центральной зоне. Плотность эндотелия роговицы и данные пахиметрического исследования не имели каких-либо значимых различий до хирургического вмешательства во всех группах больных ( $p > 0,05$ ).

Для проведения статистической обработки полученных данных были применены параметрические и непараметрические методы статистического анализа.



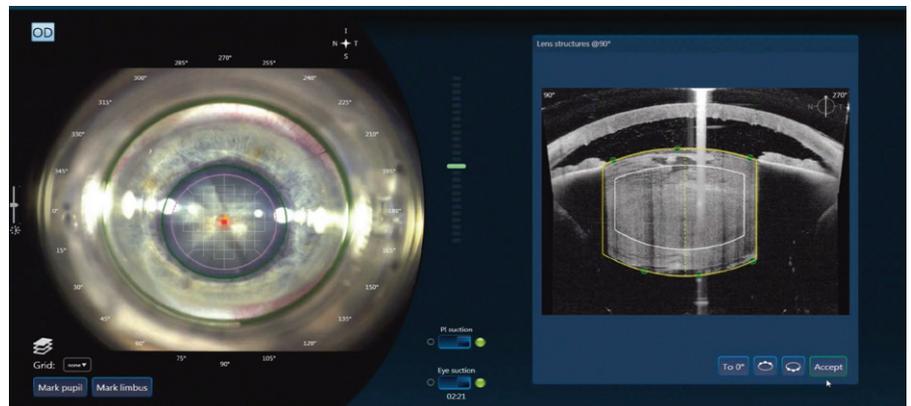
**Рис. 1.** 10 радиальных разрезов ядра — паттерн предварительной фемтолазерной фрагментации ядра «пицца»

**Fig. 1.** 10 radial cuts of the nucleus — “pizza” pattern of preliminary femtosecond laser-assisted fragmentation of the nucleus



**Рис. 2.** Комбинация 8 радиальных разрезов ядра с 5 циркулярными разрезами — паттерн предварительной фемтолазерной фрагментации ядра «цилиндры»

**Fig 2.** A combination of 8 radial cuts of the nucleus with 5 circular cuts — a pattern of preliminary femtosecond laser-assisted fragmentation of the nucleus “cylinders”



**Рис. 3.** Комбинация 8 радиальных разрезов ядра с множественными взаимно перпендикулярными разрезами в центре ядра — паттерн предварительной фемтолазерной фрагментации ядра «сетка»

**Fig 3.** Combination of 8 radial cuts of the nucleus with multiple mutually perpendicular cuts in the center of the nucleus — “grid” pattern of preliminary femtosecond laser-assisted fragmentation of the nucleus

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Известно, что ультразвуковая энергетическая нагрузка увеличивается по мере увеличения степени плотности ядра хрусталика. Полученные в ходе исследования данные выявили зависимость основных параметров гибридной фактоэмульсификации: эффективного времени ультразвука и объема использованного для эмульсификации фрагментов ядра иригационного раствора от использованного паттерна фемтолазерной фрагментации ядра.

У пациентов с III степенью плотности ядра хрусталика использование паттерна «сетка» (комбинация 8 радиальных разрезов с множественными взаимно перпендикулярными разрезами в центральной зоне ядра) для предварительной фемтолазерной фрагментации ядра хрусталика показало наименьшую энергетическую нагрузку и эффективное время ультразвука (подгруппа 1С) (рис. 3). Эффективное время при этом составило  $1,65 \pm 0,69$  с, что значительно меньше, чем при использовании паттерна «цилиндры» в подгруппе 1В (рис. 2) —  $2,33 \pm 0,72$  с ( $p < 0,05$ ), и еще меньше, чем при применении паттерна «пицца» в подгруппе 1А (рис. 1) —  $3,18 \pm 0,83$  с ( $p < 0,01$ ) (табл. 1).

При IV степени плотности ядра хрусталика наименьшая энергетическая нагрузка (эффективное время ультразвука) отмечена в подгруппе 2С при использовании паттерна «сетка». В этой подгруппе использовалась комбинация 8 радиальных разрезов с множественными взаимно перпендикулярными разрезами в центральной зоне ядра (рис. 3). Время ультразвука составило  $3,96 \pm 0,81$  с, что значительно меньше, чем при использовании паттерна «цилиндры» в подгруппе 2В (рис. 2), в которой использовалась комбинация радиальных и циркулярных разрезов, время ультразвука составило  $4,93 \pm 0,93$  с ( $p < 0,05$ ). Особенно существенное различие отмечается при использовании паттерна «пицца»

в подгруппе 2А (рис. 1), в которой производили 10 радиальных фемтолазерных разрезов ядра хрусталика. Время ультразвука составило  $6,17 \pm 1,13$  с ( $p < 0,05$ ) (табл. 2).

У пациентов с III степенью плотности ядра хрусталика при паттерне фрагментации «сетка» (подгруппа 1С) было израсходовано  $20,3 \pm 3,0$  мл иригационного раствора для эмульсификации образованных мелких фрагментов. Это количество почти в два раза меньше, чем при использовании паттерна «пицца» во время операции при образовании более крупных фрагментов ядра хрусталика (подгруппа 1А) —  $38,2 \pm 7,8$  мл ( $p < 0,01$ ) (табл. 1). Было показано, что использование паттерна фрагментации «сетка» позволяет существенно сократить объем иригационного раствора, необходимого для эмульсификации фрагментов ядра хрусталика.

Объем израсходованного иригационного раствора в ходе эмульсификации образованных фрагментов ядра при использовании паттерна «цилиндры» (подгруппа 1В) был также существенно больше ( $p < 0,05$ ) по сравнению с тем, что наблюдалось при применении паттерна «сетка» —  $30,4 \pm 5,6$  мл (табл. 1).

У пациентов с IV степенью плотности ядра хрусталика при паттерне фрагментации «сетка» (подгруппа 2С) объем иригационного раствора, необходимого для эмульсификации образованных особо мелких фрагментов, составил  $39,0 \pm 7,9$  мл. Этот объем был примерно в два раза меньше по сравнению с тем, что имело место при использовании паттерна «пицца» (подгруппа 2А) с формированием более крупных фрагментов ядра хрусталика —  $77,0 \pm 12,9$  мл ( $p < 0,01$ ) (табл. 2).

При использовании паттерна «цилиндры» (подгруппа 1В) объем израсходованного в ходе эмульсификации образованных фрагментов ядра иригационного раствора (подгруппа 2В) был значительно больше ( $p < 0,05$ )

**Таблица 1.** Эффективное время ультразвука (в секундах), объем иригационного раствора для эмульсификации фрагментов ядра хрусталика (в миллилитрах) и потеря клеток эндотелия роговицы (в %) при III степени плотности ядра хрусталика (группа 1)

**Table 1.** Effective ultrasound time (in seconds), irrigant solution volume for emulsification of lens nucleus fragments (in milliliters) and loss of corneal endothelial cells (in %) with grade III lens nucleus density (group 1)

Подгруппа пациентов. Паттерн фемтолазерной фрагментации ядра / Subgroup of patients. Femtosecond laser-assisted nuclear fragmentation pattern	Незрелая катаракта с ядром хрусталика III степени плотности / Immature cataract with lens nucleus of III degree of density		
	Эффективное время ультразвука в секундах / Effective ultrasound time in seconds	Объем требуемого иригационного раствора в мл / Volume of irrigation required solution in ml	Потеря клеток эндотелия роговицы в % / Corneal endothelial cell loss in %
1А. «пицца» / 1А. "pizza"	$3,18 \pm 0,83$	$38,2 \pm 7,9$	$6,93 \pm 1,53$
1В. «цилиндры» / 1В. "cylinders"	$2,33 \pm 0,72$	$30,4 \pm 5,6$	$5,04 \pm 1,21$
1С. «сетка» / 1С. "grid"	$1,65 \pm 0,69$	$20,3 \pm 3,0$	$3,36 \pm 0,93$
	$p_{1,2} < 0,05$ $p_{1,3} < 0,01$ $p_{2,3} < 0,05$	$p_{1,2} < 0,05$ $p_{1,3} < 0,01$ $p_{2,3} < 0,05$	$p_{1,2} < 0,05$ $p_{1,3} < 0,05$ $p_{2,3} < 0,05$

**Таблица 2.** Эффективное время ультразвука (в секундах), объем иригационного раствора для эмульсификации фрагментов ядра хрусталика (в миллилитрах) и потеря клеток эндотелия роговицы (в %) при IV степени плотности ядра хрусталика (группа 2)

**Table 2.** Effective ultrasound time (in seconds), volume of irrigant solution for emulsification of lens nucleus fragments (in milliliters) and loss of corneal endothelial cells (in %) with grade IV lens nucleus density (group 2)

Подгруппа пациентов. Паттерн фемтолазерной фрагментации ядра / Subgroup of patients. Femtosecond laser-assisted nuclear fragmentation pattern	Незрелая катаракта с ядром хрусталика IV степени плотности / Immature cataract with lens nucleus of IV degree of density		
	Эффективное время ультразвука в секундах / Effective ultrasound time in seconds	Объем требуемого иригационного раствора в мл / Volume of irrigation required solution in ml	Потеря клеток эндотелия роговицы в % / Corneal endothelial cell loss in %
2А. «пицца» / 1А. "pizza"	$6,17 \pm 1,13$	$77,0 \pm 12,9$	$11,52 \pm 1,91$
2В. «цилиндры» / 1В. "cylinders"	$4,93 \pm 0,93$	$57,5 \pm 10,0$	$9,83 \pm 1,73$
2С. «сетка» / 1С. "grid"	$3,96 \pm 0,81$	$39,0 \pm 7,9$	$8,61 \pm 1,65$
	$p_{1,2} < 0,05$ $p_{1,3} < 0,05$ $p_{2,3} < 0,05$	$p_{1,2} < 0,05$ $p_{1,3} < 0,01$ $p_{2,3} < 0,05$	$p_{1,2} < 0,05$ $p_{1,3} < 0,05$ $p_{2,3} < 0,05$

по сравнению с результатами применения паттерна «сетка» —  $57,5 \pm 10,0$  мл (табл. 2).

Степень десквамации эндотелия роговицы является признанным основным показателем травматичности хирургического вмешательства в факохирургии. Для объективной оценки этого показателя, согласно большинству публикаций, посвященных данной теме, необходимо проводить подсчет потери клеток эндотелия роговицы не ранее, чем через 2–3 месяца после операции, когда имеет место стабильность плотности клеток по всей площади роговицы [5, 11–13]. Данные пахиметрического исследования не имели существенных различий по группам оперированных больных после хирургического вмешательства.

При третьей степени плотности ядра хрусталика минимальная потеря эндотелия роговицы была определена после использования паттерна предварительной фемтолазерной фрагментации «сетка» (подгруппа 1С) — потеря составила  $3,36 \pm 0,93$  % (табл. 1).

Причина этого заключается в более эффективном использовании ультразвука и меньшем объеме ирригационного раствора в сравнении с другими методами фрагментации. У пациентов с III степенью плотности ядра хрусталика использование метода фрагментации «цилиндры» (подгруппа 1В) приводило к значительно большей потере эндотелия роговицы —  $5,04 \pm 1,21$  % ( $p < 0,05$ ), а применение метода «пицца» (подгруппа 1А) — еще больше —  $6,93 \pm 1,53$  % ( $p < 0,05$ ) (табл. 1). Следует отметить, что различия в потере эндотелия роговицы между методиками «пицца» и «цилиндры» также являются значимыми ( $p < 0,05$ ) (табл. 1).

У пациентов с IV степенью плотности ядра хрусталика применение паттерна фрагментации «сетка» (подгруппа 2С) привело к потере клеток эндотелия на уровне  $8,61 \pm 1,65$  % (7,29; 9,81), что значительно ниже, чем при использовании паттерна «цилиндры» (подгруппа 2В) —  $9,83 \pm 1,73$  % (8,63; 10,56), и особенно паттерна «пицца» (подгруппа 2А) —  $11,52 \pm 1,91$  % (10,31; 12,93) ( $p < 0,05$ ). Различия между подгруппами 2А и 2В также являются достоверными ( $p < 0,05$ ) (табл. 2).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Для снижения травматичности факоэмульсификации, согласно многим публикациям последних лет кроме минимизации эффективного времени ультразвука требуется, насколько это возможно, уменьшать объем ирригационного раствора. В первую очередь это относится к снижению травматизации эндотелия роговицы [12, 13]. Уменьшение воздействия основных факторов повреждения структур глазного яблока: экспозиции и мощности ультразвука, а также объема израсходованного в ходе операции ирригационного раствора снижает травматичность удаления хрусталика и способствует более быстрой реабилитации пациентов. Прежде всего это касается удаления плотной катаракты. В связи с этим в последние годы не прекращаются поиски путей снижения энергетического и ирригационного воздействия во время выполнения факоэмульсификации.

Фрагментация ядра хрусталика является традиционным способом снижения энергетического ультразвукового воздействия и ускорения эмульсификации ядра. Фемтосекундный лазер, помимо проведения переднего капсулорексиса идеальной формы и диаметра, позволяет фрагментировать ядро хрусталика до вскрытия глазного яблока, что снижает вероятность ряда осложнений. Паттерны фрагментации зависят от программного обеспечения фемтолазерной хирургической системы. Минимизация размеров фрагментов ядра позволяет значительно уменьшать эффективное время ультразвука, а при достаточно мягкой катаракте вообще обходиться без его использования. Благодаря этому существенно снижается энергетическая нагрузка на структуры глазного яблока. Полноценное разделение ядра на мелкие фрагменты обеспечивает существенное уменьшение объема ирригационного раствора, необходимого для проведения эмульсификации фрагментов ядра. Все это в комплексе снижает степень патологических изменений в тканях глазного яблока, возникающих вследствие воздействия низкочастотного ультразвука [16, 19].

Проведенное клиническое исследование выявило весьма значимое влияние паттерна фемтолазерной фрагментации на эффективное время ультразвука и объем ирригационного раствора в ходе факоэмульсификации. Результаты исследования показывают важность минимизации размеров сформированных фемтосекундным лазером фрагментов ядра при различной степени плотности катаракты. Благодаря этому удается получить существенное снижение травматичности хирургического вмешательства, что доказывают данные зеркальной микроскопии эндотелия роговицы. Уменьшение травматичности операции, в свою очередь, способствует ускорению реабилитации пациентов.

## ВЫВОДЫ

Выбор паттерна фемтолазерной фрагментации ядра хрусталика в ходе гибридной факоэмульсификации оказывает существенное влияние на энергетические и гидродинамические параметры факоэмульсификации, а также на степень потери клеток эндотелия роговицы.

Паттерн «сетка» позволяет минимизировать эффективное время ультразвука, объем израсходованного ирригационного раствора и, как следствие, потерю клеток эндотелия роговицы по сравнению с другими паттернами фрагментации ядра хрусталика.

Применение паттерна «сетка» обеспечивает возможность малотравматичного выполнения гибридной факоэмульсификации при особо плотных катарактах.

## УЧАСТИЕ АВТОРОВ

Юсеф Ю.Н. — концепция и дизайн, редактирование;  
Юсеф С.Н. — сбор и обработка материала, написание текста;  
Введенский А.С. — сбор и обработка материала, написание текста;  
Иванов М.Н. — сбор и обработка материала, редактирование;  
Алхарки Л. — сбор и обработка материала, статистическая обработка данных;  
Фокина Н.Д. — сбор и обработка материала, написание текста.

## ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Nagy Z, Takacs A, Filkorn T, Sarayba M. Initial clinical evaluation of an intraocular femtosecond laser in cataract surgery. *J. Refract. Surg.* 2009;25(12):1053–1060. doi: 10.3928/1081597X-20091117-04.
- Анисимова СЮ, Анисимов СИ, Трубилин ВН, Новак ИВ. Факоэмульсификация катаракты с фемтолазерным сопровождением. Первый отечественный опыт. Катарактальная и рефракционная хирургия. 2012;12(3):7–10. Anisimova SYu, Anisimov SI, Trubilin VN, Novak IV. Femtolaser-assisted phacoemulsification. The first domestic experience. *Cataract and Refractive Surgery.* 2012;12(3):7–10 (In Russ.).
- Анисимова СЮ, Трубилин ВН, Трубилин АВ, Анисимов СИ. Сравнение механического и фемтосекундного капсулорексиса при факоэмульсификации катаракты. Катарактальная и рефракционная хирургия. 2012;12(4):16–18. Anisimova SYu, Trubikin VN, Trubilin AV, Anisimov SI. Compare mechanical and femtosecond capsulorhexis in phacoemulsification. *Cataract and Refractive Surgery.* 2012;12(4):16–18 (In Russ.).
- Аветисов СЭ, Мамиконян ВР, Юсеф ЮН, Юсеф СН, Иванов МН, Аветисов КС. Гибридная факоэмульсификация: новый этап в совершенствовании хирургии катаракты. Вестник офтальмологии. 2014;130(2):4–7. Avetisov SE, Mamikonyan VR, Yusef YuN, Yusef SN, Ivanov MN, Avetisov KS. Hybrid phacoemulsification: a new stage in the improvement of cataract surgery. *Annals of Ophthalmology.* 2014;130(2):4–7 (In Russ.).
- Kecik M, Schweitzer C. Femtosecond laser-assisted cataract surgery: Update and perspectives *Front Med (Lausanne).* 2023;10:1131314. doi: 10.3389/fmed.2023.1131314.
- Fine H, Packer M, Hoffman R. New phacoemulsification technologies. *J. Cataract Refract. Surg.* 2002;28:1054–1060. doi: 10.1016/s0886-3350(02)01399-8.
- Fine H, Packee M, Hoffman R. Power modulations in new phacoemulsification technologies: Improved outcomes. *J. Cataract Refract. Surg.* 2004;30(5):1014–1019. doi: 10.1016/j.jcrs.2003.09.062.
- Малюгин БЭ. Хирургия катаракты и интраокулярная коррекция на современном этапе развития офтальмохирургии. Вестник офтальмологии. 2014;130(6):80–88. Malugin BE. State-of-the-art cataract surgery and intraocular optical correction. *Annals of Ophthalmology.* 2014;130(6):80–88 (In Russ.).
- Dick HB, Schultz T. A Review of Laser-Assisted Versus Traditional Phacoemulsification Cataract Surgery. *Ophthalmol Ther.* 2017;6:7–18. doi: 10.1007/s40123-017-0080-z.
- Assaf A, Aly M, Zaki R, Shaaban Y, Aziz B. Femtosecond laser-assisted cataract surgery in soft and hard nuclear cataracts: a comparison of effective phacoemulsification time. *Clin Ophthalmol.* 2021;15:1095–1100. doi: 10.2147/OPTH.S300145.
- Chen X, Yu Y, Zhu Y, Wang W, Yao Y. Clinical outcomes of femtosecond laser-assisted cataract surgery versus conventional phacoemulsification surgery for hard nuclear cataracts. *J. Cataract Refract. Surg.* 2017;43(4):486–491. doi: 10.1016/j.jcrs.2017.01.010.
- Schroeter A, Kropp M, Cvejic Z, Thumann G, Pajic B. Comparison of femtosecond laser-assisted and ultrasound-assisted cataract surgery with focus on endothelial analysis. *Sensors (Basel).* 2021;21(3):996. doi: 10.3390/s21030996.
- Whang W-J, Yung H-J, Lee S-H, Koo M, Oh H-Y, Yoo Y-S, Joo C-K. Effect of pre-fragmentation on efficacy and safety for phacoemulsification in femtosecond laser-assisted cataract surgery: a non-randomized clinical trial. *Ann Transl Med.* 2023;11(1):5. doi: 10.21037/atm-22-1279.
- Kaur M, Titiyal JS, Surve A, Verma R. Effect of Lens Fragmentation Patterns on Phacoemulsification Parameters and Postoperative Inflammation in Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery. *Current Eye Research.* 2018;43(10):1228–1232. doi: 10.1080/02713683.2018.1485951.
- Leda R, Machado D, Hida W, Motta A, Pacini T, Amorim R. Conventional Phacoemulsification Surgery Versus Femtosecond Laser Phacoemulsification Surgery: A Comparative Analysis of Cumulative Dissipated Energy and Corneal Endothelial Loss in Cataract Patients. *Clin Ophthalmol.* 2023;17:1709–1716. doi: 10.2147/OPTH.S408717.
- Nagy Z. Femtosecond laser-assisted cataract surgery: facts and results. New-Jersey: SLACK Incorporated, 2014.
- Аветисов КС. Дифференцированная техника гибридной факоэмульсификации при узком зрачке. Вестник офтальмологии. 2015;131(3):61–63. Avetisov KS. Differentiated approach to hybrid phacoemulsification in small pupil. *Annals of Ophthalmology.* 2015;131(3):61–63 (In Russ.). doi: 10.17116/oftalma201513136161-63.
- Юсеф СН. Модифицированная технология гибридной факоэмульсификации. Вестник офтальмологии. 2015;131(3):56–69. Yusef SN. Modified technique of hybrid phacoemulsification. *Annals of Ophthalmology.* 2015;131(3):56–60 (In Russ.). doi: 10.17116/oftalma2015131356-60.
- Huseynova T, Mita M, Corpuz C, Sotoyama Y, Tomita M. Evaluating the different laser fragmentation patterns used in laser cataract surgeries in terms of effective phacoemulsification time and power. *Clin Ophthalmol.* 2015;9:2067–2071. doi: 10.2147/OPTH.S64611.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт глазных болезней имени М.М. Краснова»  
Юсеф Юсеф Наим  
доктор медицинских наук, директор  
ул. Россоломо, 11а, б, Москва, 119021, Российская Федерация  
<https://orcid.org/0000-0003-4043-456X>

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт глазных болезней имени М.М. Краснова»  
Юсеф Саид Наим  
доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник  
ул. Россоломо, 11а, б, Москва, 119021, Российская Федерация  
<https://orcid.org/0000-0003-0486-7819>

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт глазных болезней имени М.М. Краснова»  
Введенский Андрей Станиславович  
доктор медицинских наук, старший научный сотрудник  
ул. Россоломо, 11а, б, Москва, 119021, Российская Федерация  
<https://orcid.org/0000-0002-8134-8089>

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт глазных болезней имени М.М. Краснова»  
Иванов Михаил Николаевич  
доктор медицинских наук, заместитель директора по научной работе  
ул. Россоломо, 11а, б, Москва, 119021, Российская Федерация  
<https://orcid.org/0000-0002-2001-9310>

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт глазных болезней имени М.М. Краснова»  
Алхарки Лаис  
кандидат медицинских наук, научный сотрудник  
ул. Россоломо, 11а, б, Москва, 119021, Российская Федерация  
<https://orcid.org/0000-0001-6791-4219>

ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет)  
Министерства здравоохранения Российской Федерации  
Фокина Наталья Дмитриевна  
кандидат медицинских наук, доцент кафедры глазных болезней  
ул. Трубецкая, 8, стр. 2, Москва, 119991, Российская Федерация  
<https://orcid.org/0000-0003-2450-0395>

## ABOUT THE AUTHORS

Krasnov Research Institute of Eye Disease  
Yusef Yusef N.  
MD, director  
Rossolimo str., 11A, B, Moscow, 119021, Russian Federation  
<https://orcid.org/0000-0003-4043-456X>

Krasnov Research Institute of Eye Disease  
Yusef Said Naim  
MD, leading researcher  
Rossolimo str., 11A, B, Moscow, 119021, Russian Federation  
<https://orcid.org/0000-0003-0486-7819>

Krasnov Research Institute of Eye Disease  
Vvedenskiy Andrej S.  
MD, senior researcher  
Rossolimo str., 11A, B, Moscow, 119021, Russian Federation  
<https://orcid.org/0000-0002-8134-8089>

Krasnov Research Institute of Eye Disease  
Ivanov Michail N.  
MD, deputy director for research  
Rossolimo str., 11A, B, Moscow, 119021, Russian Federation  
<https://orcid.org/0000-0002-2001-9310>

Krasnov Research Institute of Eye Disease  
Alkharki Laïs  
PhD, researcher  
Rossolimo str., 11A, B, Moscow, 119021, Russian Federation  
<https://orcid.org/0000-0001-6791-4219>

Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University),  
Ophthalmology Department  
Fokina Natalia D.  
PhD, assistant professor of the ophthalmology department  
Trubetskaya str., 8, bld 2, Moscow, 119991, Russian Federation  
<https://orcid.org/0000-0003-2450-0395>