

Аберрации волнового фронта и очковые линзы Часть 2

Д.Мейстер, специалист Carl Zeiss Vision

Аберрации волнового фронта прогрессивных линз

Прогрессивные очковые линзы индуцируют значительные уровни аберраций волнового фронта второго порядка, особенно в областях «сглаживания» кривизны поверхности на периферии линзы. Необходимость обеспечения плавного изменения оптической силы по поверхности прогрессивной линзы требует плавного изменения кривизны поверхности. Однако существующие теоретические математические ограничения на плавное изменение кривизны поверхности вдоль коридора прогрессии говорят о неизбежности индуцирования поверхностного астигматизма, т.е. возникновения разницы кривизны поверхности по разным меридианам в каждой точке, лежащей по сторонам коридора прогрессии. Известная теорема Минквица показывает математически, что в окрестности коридора прогрессии нежелательный поверхностный астигматизм увеличивается в 2 раза быстрее, чем нарастает вдоль коридора прогрессии оптическая сила (аддидация) линзы.

Нежелательный цилиндр, индуцированный преломлением лучей, проходящих через области прогрессивной линзы с поверхностным астигматизмом, приводит к появлению астигматических мод Цернике второго порядка (Z_2^{-2} и Z_2^2), дающих значительный вклад в общий вид аберрационного волнового фронта. Аберрации прогрессивной линзы низших порядков обусловлены в основном этим нежелательным поверхностным астигматизмом (рис.3). Распределение дополнительной оптической силы по поверхности линзы может также приводить к размытию изображения из-за недостаточной или избыточной положительной оптической силы для данного расстояния до наблюдаемого объекта (оптическая сила не соответствует расстоянию до объекта). Вклад этой оптической ошибки аберрационного волнового фронта характеризуется модой дефокус (Z_2^0).

Кроме того, плавное изменение величины дополнительной оптической силы и поверхностного астигматизма по поверхности линзы индуцирует аберрации высших порядков, которые могут оказывать существенное влияние на качество изображения. Это относится, прежде всего, к модам третьего порядка – кома и трилистник (трифоль). Величина

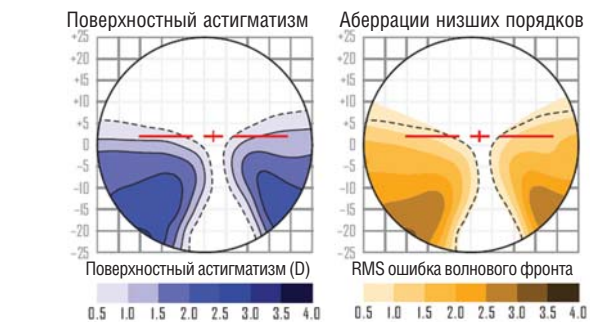


Рис.3. Аберрации прогрессивной линзы низших порядков обусловлены в основном нежелательным поверхностным астигматизмом в областях «сглаживания» кривизны поверхности линзы (диаметр зрачка 6 мм).

коэффициентов C_3^{-1} и C_3^{-3} , определяющих вклад этих мод, прямо пропорциональна аддидации линзы и обратно пропорциональна длине коридора прогрессии. Коэффициенты также быстро увеличиваются с увеличением размера зрачка (как куб его радиуса).

Нарастание дополнительной оптической силы приводит к появлению в коридоре прогрессии аберраций кома и трилистник. Традиционная кома обусловлена несимметричным изменением преломляющей силы и степени увеличения изображения по поверхности линзы для точек, расположенных вне оптической оси линзы. Изменение дополнительной оптической силы по поверхности прогрессивной линзы вызывает очень похожий эффект. Когда линия взгляда опускается вниз по коридору прогрессии, сила в верхнем поле зрачка отличается от силы в нижнем поле на величину, примерно пропорциональную диаметру зрачка и скорости изменения аддидации на соответствующем участке коридора прогрессии. Фактически, кома прямо пропорциональна скорости изменения величины аддидации в любой точке поверхности линзы (рис.4).

Хотя для обычных прогрессивных поверхностей, которые рассматривались выше, моды аберраций кома и трилистник остаются постоянными в коридоре прогрессии, в современных прогрессивных линзах применяются осесимметричные сечения и нелинейные зависимости увеличения аддидации вдоль коридора прогрессии. Тем не менее, аберрационные моды высших

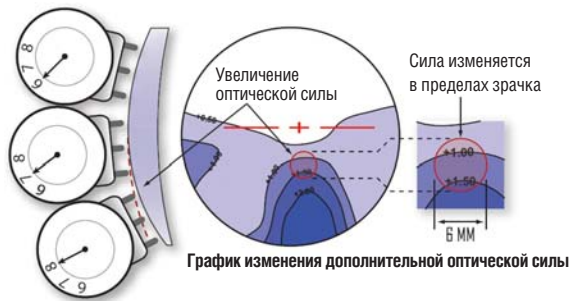


Рис.4. Изменение дополнительной оптической силы по поверхности прогрессивной линзы приводит к изменению оптической силы в пределах зрачка пользователя прогрессивными очками, индуцируя aberrации волнового фронта, подобные коме.

порядков и для таких линз будут изменяться пропорционально скорости изменения оптической силы поверхности в любой ее точке. Кома и трилистник будут максимальны в тех областях, в которых дополнительная оптическая сила и поверхностный астигматизм изменяются наиболее быстро (рис.5). Более того, поскольку aberrации высших порядков зависят от скорости изменения оптической силы поверхности, эти aberrации будут наиболее значительны в прогрессивных линзах с коротким коридором прогрессии или с большой величиной аддидации.

Разработчики прогрессивных дизайнов начинают уделять все большее внимание aberrациям волнового фронта высших порядков, создавая в ряде случаев дизайны с более низким уровнем aberrаций этого типа. К сожалению, полностью исключить aberrации высших порядков, индуцированные поверхностью прогрессивной линзы, так же как и нежелательный поверхностный астигматизм, невозможно. Фактически, по крайней мере, для современных прогрессивных линз, имеющих хороший дизайн, средние уровни aberrаций высших порядков часто оказываются примерно одинаковыми по величине (рис.6). Тем не менее, можно в определенной степени управлять aberrациями низших и высших порядков прогрессивной линзы.

Точно также, как для управления астигматизмом низшего порядка и дефокусом прогрессивной линзы существует два подхода (либо путем распределением “переходной” области по большей площади поверхности для

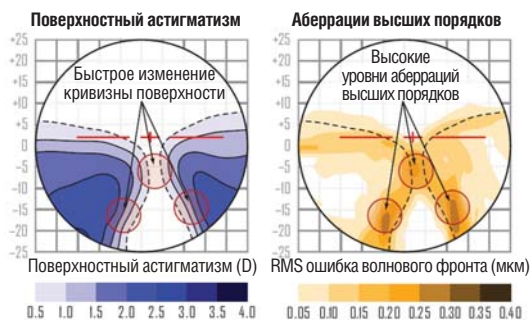


Рис.5. Аберрации высших порядков обычно выше в тех областях линзы, где дополнительная оптическая сила и астигматизм изменяются сильно.

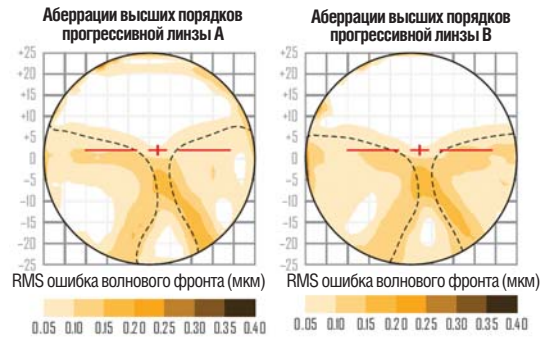


Рис.6. Прогрессивные линзы с хорошо рассчитанным дизайном часто показывают примерно равные уровни aberrаций высших порядков (на рисунке показаны ошибки RMS волнового фронта поверхности двух линз)

“смягчения” дизайна, либо ограничивая область перехода небольшими размерами и делая дизайн более “жестким”), так и для управления aberrациями высших порядков также применяются два относительно близких подхода. “Мягкий” дизайн прогрессивной линзы с плавным изменением оптической силы будет индуцировать относительно низкие уровни aberrаций высших порядков по всей поверхности линзы. В тоже время “жесткие” дизайны с быстрым нарастанием оптической силы будут иметь более низкие уровни aberrаций высших порядков в центре зон зрения вблизи и вдаль. При этом на границах зон зрения и в коридоре прогрессии уровень aberrаций высших порядков будет выше. Обычно минимизировать aberrации высших порядков в какой-нибудь определенной области линзы можно лишь за счет повышения их значений в других местах⁴.

Хотя aberrации высших порядков могут приводить к ухудшению качества изображения и снижению контраста, aberrации низших порядков оказывают гораздо более сильное влияние на качество зрения в прогрессивных линзах. Максимальная RMS ошибка волнового фронта для aberrаций низших порядков до 10 раз больше, чем максимальная ошибка для aberrаций высших порядков (рис.7). В частности, нежелательный астигматизм доминирует в большинстве прогрессивных линз. Более того, клинические исследования показывают, что в отличие от aberrаций низших порядков aberrации высших порядков прогрессивных линз редко бывают выше по величине, чем естественные aberrации высших порядков глаза типичного пользователя линзами⁵.

Следовательно, при коррекции пресбиопии прогрессивными линзами, у которых имеются значительные aberrации низших порядков, распределение оптической силы и нежелательного астигматизма по поверхности, несомненно, будет играть главную роль для удовлетворенности в качестве зрения пользователя прогрессивными очками.

Исследования также продемонстрировали, что влияние aberrаций высших порядков на остроту зрения в коридоре прогрессии, где обычно их уровень наивысший, незначительно. Искажение волнового фронта, вызванное небольшим уровнем aberrаций высших порядков, может даже несколько улучшить глубину фокусирования глаза пользователя и повысить толерантность

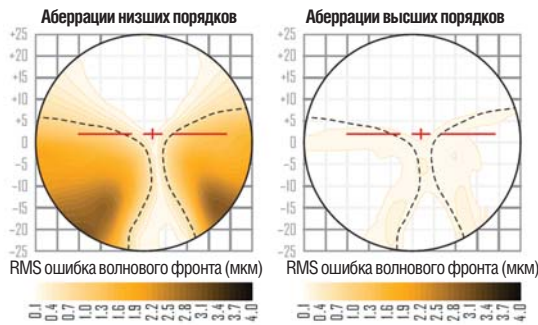


Рис.7. Аберрации низших порядков (нежелательный поверхностный астигматизм) по величине значительно больше, чем аберрации высших порядков по всей поверхности прогрессивной линзы

к размытию, вызванному аберрациями второго порядка линзы. Фактически, объединение аберраций высших порядков прогрессивной линзы и глаза может в некоторых случаях даже улучшать остроту зрения⁶. Тем не менее, аберрации высших порядков, индуцированные прогрессивной линзой, оказывают определенное влияние на зрение пользователя и поэтому должны учитываться при разработке прогрессивного дизайна.

Коррекция аберраций волнового фронта глаза

Для коррекции аберраций глаза низших порядков, соответствующих дефокусу и астигматизму, обычно назначают очковые и контактные линзы. Если аберрации глаза низших порядков скорректированы линзами, то острота зрения будет ограничена оставшимися некорректированными аберрациями высших порядков – таких, как сферическая аберрация и кома, особенно при больших размерах зрачка. Острота зрения “нормальных” пользователей без выраженных патологий зрения с коррекцией линзами лежит в диапазоне 1,0-1,2. Однако если исключить аберрации глаза низших и высших порядков, то может быть достигнуто “суперзрение” с повышенной контрастной чувствительностью, при котором острота зрения будет заметно выше 1,0 (рис.8).

Когда будут полностью исключены аберрации высших и низших порядков глаза, фактором, ограничивающим разрешающую способность глаза при малых размерах зрачка, станет дифракция света. Согласно критерию Релея, чтобы глаз различал две точки объекта как разные, диски Эйри (для ФРТ), соответствующие изображениям этих точек, должны быть разделены достаточным расстоянием. При больших размерах зрачка разрешающая способность глаза человека будет ограничена плотностью фоторецепторов на сетчатке глаза, т.е. числом колбочек в данной области сетчатки (предел Найквиста). Кроме того, еще одним ограничивающим фактором является хроматическая аберрация, вызванная разной степенью преломления световых лучей разной длины волны. Поэтому из-за существования оптических и физиологических ограничений острота глаза человека при условии полной коррекции и без каких-либо оптических аберраций может достигать 1,5-2,0.

Для улучшения качества зрения имеются и другие возможности. Так, в рефракционной хирургии быстро

становится новым стандартом абляция роговицы на основании данных о волновом фронте глаза. Эта методика обещает улучшить зрение по сравнению, по крайней мере, с результатами традиционной абляции, путем модифицирования профиля абляции с учетом имеющихся данных по аберрациям глаза высших порядков. Однако из-за случайных факторов, оказывающих влияние на результаты операции, трудно полностью корригировать «тонкие» аберрации глаза высших порядков. Часто пациенты после таких операций не отмечают заметного улучшения зрения по сравнению с ранее используемой ими наилучшей очковой коррекцией.⁷

Можно также инкорпорировать коррекцию определенных аберраций глаза высших порядков в дизайн контактных линз, поскольку эти линзы можно заставить находиться в относительно фиксированном положении по отношению к оптике глаза путем уменьшения их вращения и поступательного движения на роговице. К сожалению, очковые линзы не могут исключить аберрации высших порядков глаза без индуцирования дополнительных аберраций низших порядков, так как глаз вращается относительно оптического центра линзы. Например, коррекция аберраций второго порядка приводит к индуцированию аберраций первого порядка, когда глаз отклоняется от центра коррекции (правило Прентиса), в то время как коррекция аберраций третьего порядка приводит к индуцированию астигматизма второго порядка и дефокуса.

Фактически, смещение всего лишь на несколько миллиметров линии взгляда от центра идеальной коррекции волнового фронта приводит к возникновению новых аберраций волнового фронта низших порядков, которые в действительности оказываются больше по величине, чем аберрации высших порядков, которые были устранены. И эти ошибки будут тем сильнее, чем больше смещение.⁸ Поскольку глаз постоянно находится в движении, коррекция аберраций высших порядков с помощью очковых линз в действительности приводит к ухудшению качества зрения для большинство зрительных полей.

Хотя имеются значительные оптические ограничения на исключение аберраций высших порядков с помощью очковых линз, все же имеется возможность обеспечить

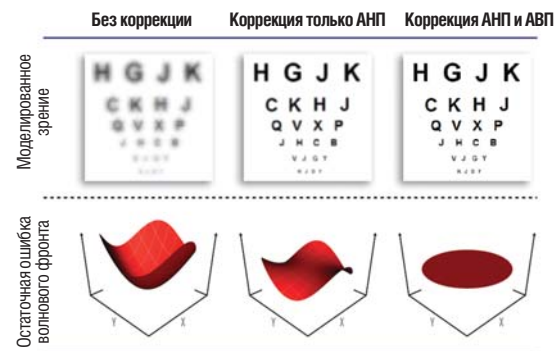


Рис.8. После коррекции аберраций низших порядков (АНП), оказывающих, как правило, гораздо большее влияние на качество зрения, возрастает роль аберраций высших порядков (АВП).

лучшую очковую коррекцию aberrаций низших порядков, если учесть влияние aberrаций высших порядков на зрение. Параметры оптимальной очковой коррекции зависят не только от aberrаций низших порядков (сферы и цилиндра), но и от aberrаций высших порядков глаза для конкретного размера зрачка.

Определение конечных параметров рефракции с учетом влияния на размытие изображения aberrаций высших порядков может привести к уточнению рефракции очковых линз (коррекции значений сферы и цилиндра), что позволит обеспечить оптимальное зрение в более широком диапазоне уровней освещенности.

Используя полученные с помощью aberрометра данные по волновому фронту, могут быть объективно рассчитаны оптимизированные с учетом aberrаций высших порядков параметры рецепта, которые повысят качество зрения по сравнению с полученным ранее без учета этих aberrаций.⁹ Традиционно применяемые авторефрактометры не заменяют субъективную оценку рефракции, как наилучший метод определения конечных параметров рецепта (сферы и цилиндра) на очковые линзы. Однако точность метода вынужденного выбора, обычно применяемого в ходе субъективного исследования рефракции для определения конечной очковой коррекции пациента, страдает из-за свойственной субъективным ответам вариабельности.^{10,11}

Пациент, выбирая «наилучший фокус», может использовать различные критерии восприятия — острота зрения, контраст или обязанность дать ответ, и полученные при этом ответы будут соответствовать разной оптической силе линзы. Глубина фокуса глаза может вызвать у пациента затруднение в реальном фиксировании небольшой разницы в качестве зрения, когда для сравнения предлагается несколько линз. Хотя эффект может быть несколько улучшен за счет направленной чувствительности сетчатки, известной как эффект Стайлс Кроуфорда, сферический эквивалент рефракции может варьировать в зависимости от размера зрачка, если имеются такие aberrации высших порядков, как сферическая aberrация. Определение рефракции методом кросс-цилиндра Джексона может не позволить найти силу цилиндра для идеальной коррекции, если имеются aberrации высших порядков или пациент не способен определить относительную четкость букв в таблице для оценки остроты зрения, пострадавшей из-за нарушения формы букв или двоения изображения, вызванных астигматизмом.

На точность конечных данных рецепта на линзы кроме потенциальной вариабельности субъективного метода оценки рефракции влияет также использование в ходе этой процедуры линз с шагом 0,25D. Ошибка округления при этом составляет $\pm 0,125$ D. Точность традиционных методов обработки поверхности линзы обычно не превышает $\pm 0,0625$ D. Суммирование обеих ошибок может приводить к нежелательной ошибке в силе сферы до 0,2 D.

Поскольку aberрометры предоставляют более детальные данные по рефракции глаза, включающие aberrации высших порядков для полного зрачка, то можно модифицировать параметры рефракции обычных линз (корректирующих

только aberrации низших порядков) путем учета влияния aberrаций высших порядков на качество ретинального изображения, обеспечив для линзы точность оптической силы 0,01 D. Программное обеспечение позволяет рассчитать рефракцию очковой линзы, которая обеспечит наилучшее качество ретинального изображения для конкретного диаметра зрачка глаза или диапазона диаметров без ограничений, накладываемых применением обычных авторефрактометров и субъективного метода определения рефракции (рис.9).

Таким образом, применение компьютерных программ, позволяющих увеличить качество зрения в результате учета aberrаций высших порядков глаза, может потенциально обеспечить более точную коррекцию зрения по сравнению с традиционным субъективным методом определения рефракции.¹²

Более того, с появлением технологии FreeForm обработки поверхности линзы теперь могут быть изготовлены с гораздо более высокой точностью — до 0,01 D. Полученные с учетом данных aberрометрии очковые FreeForm линзы обеспечивают по-настоящему оптимальную коррекцию aberrаций низших порядков, которая дает также повышенную контрастную чувствительность и более высокую остроту зрения в широком диапазоне освещенности или зрительных условий.¹³

Основные положения статьи

- Очковые линзы не способны корректировать aberrации высших порядков глаза, не индуцируя даже более значимые aberrации для направлений взгляда, не проходящих через центр линзы.
- Однофокальные и бифокальные линзы с хорошо рассчитанным дизайном обычно имеют лишь незначительные уровни aberrаций низших и высших порядков.
- Изменение величины дополнительной оптической силы в прогрессивных линзах индуцирует значительные уровни aberrаций низших и высших порядков.
- Качество зрения в очковых линзах может быть улучшено, если использовать при расчете дизайна данные aberрометрии по aberrациям низших и высших порядков глаза для широкого диапазона размеров зрачка.

Список литературы будет приведен вместе с интернет-версией статьи на сайте www.optica4all.ru.

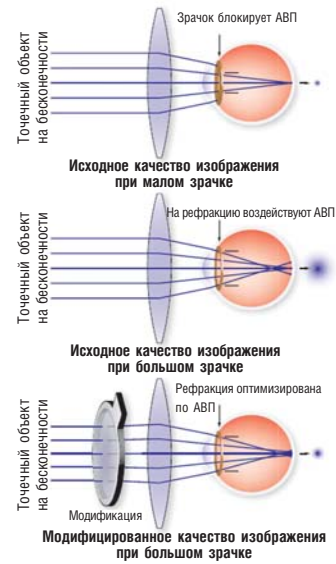


Рис.9. Очковые линзы, дизайн которых рассчитан на основе данных о волновом фронте, могут очень точно корректировать aberrации низших порядков, обеспечивая максимально высокое качество зрения при разных размерах зрачка.