

## ПРЕОДОЛЕНИЕ КОНФЛИКТА КОНВЕРГЕНЦИИ И АККОМОДАЦИИ В СИСТЕМАХ ВИРТУАЛЬНОЙ И ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

НГОК ШОН НГУЕН, Г. Э. РОМАНОВА

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: sonitmo@gmail.com

Проанализированы способы преодоления конфликта аккомодации и конвергенции в системах виртуальной и дополненной реальности. Проведена оценка конвергенции и аккомодации в оптических системах виртуальной реальности. Предложен подход с использованием клиновой оптики и децентрированных линз.

**Ключевые слова:** виртуальная реальность, дополненная реальность, конфликт конвергенции-аккомодации, варифокальные дисплеи, мультифокальные дисплеи, дисплеи светового поля, комфортные зоны, зона ясного одиночного бинокулярного зрения, фория

**Введение.** Технологии виртуальной (virtual reality, VR) и дополненной реальности (augmented reality, AR) широко используются не только в индустрии развлечений, но и в образовании, медицине и других областях.

Принципиальная схема оптической части систем VR/AR (объектив) представлена на рис. 1 (показан один канал — один глаз).

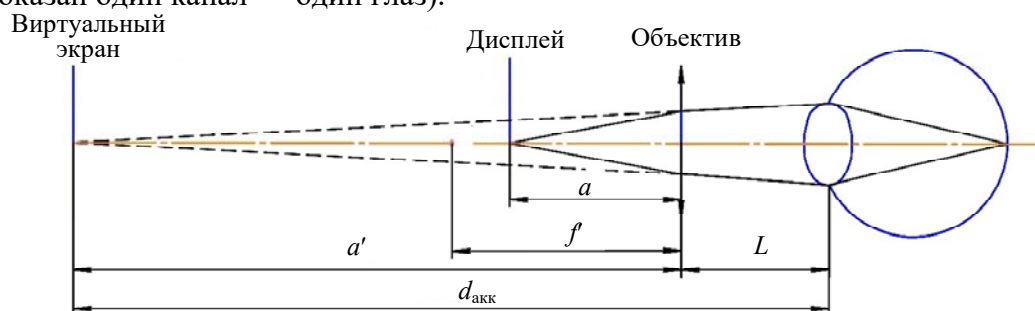


Рис. 1

Особенности оптической системы, используемой в качестве объектива, в частности, определяют комфорт наблюдателя. Дискомфорт наблюдателя может быть вызван:

- ореолами или перекрестными помехами между двумя изображениями, когда левый глаз видит часть изображения для правого глаза и наоборот [1]. Это происходит из-за неполной изоляции левого и правого каналов изображения;

- асимметрией бинокулярной системы из-за неправильного проектирования системы или неточной сборки [2];

- зрительно-вестибулярными конфликтами (visual-vestibular conflicts) [3], вызванными различием между визуально воспринимаемым движением и физическим движением пользователя при ношении очков виртуальной реальности.

- конфликтом конвергенции-аккомодации (vergence-accommodation conflict, VAC) из-за рассогласования расстояний, соответствующих расстоянию конвергенции и аккомодации.

VAC, как правило, присутствует во всех типичных системах VR/AR, вызывая дискомфорт и усталость при длительном использовании систем такого типа. Именно по этим причинам в последнее время особый интерес исследователей вызывает поиск пути преодоления VAC [4]. Однако в основном предлагаются громоздкие и сложные оптические схемы [5—7].

Отсутствие оптической системы, обеспечивающей минимизацию VAC с учетом компактной структуры достаточно высокого качества изображения, обуславливает актуальность исследования. В настоящей работе рассматриваются конфликт конвергенции и аккомодации и возможности уменьшения его в системах виртуальной и дополненной реальности за счет применения относительно простых способов.

**Традиционные решения.** VAC вызывается рассогласованием дистанций, соответствующих дальности сведения зрительных осей при конвергенции (расстояние конвергенции) и аккомодации (расстояние аккомодации).

При естественном зрении аккомодация и конвергенция согласованы: расстояние конвергенции равно расстоянию аккомодации (рис. 2, а). На рис. 2, б представлена биокулярная система, в которой оба глаза видят одно изображение, на рис. 2, в — бинокулярная (каждому глазу соответствует отдельный канал и отдельное изображение). В бинокулярной системе расстояние аккомодации может быть разным, а расстояние конвергенции равно бесконечности, так как зрительная ось совпадает с оптической, такое несоответствие называется конфликтом аккомодации и конвергенции [8, 9].

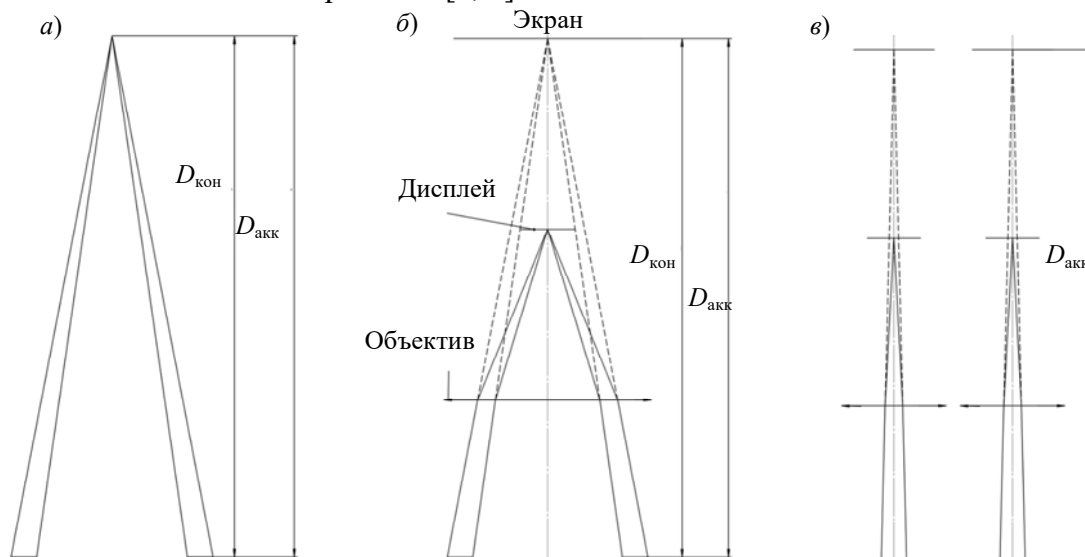


Рис. 2

Для преодоления VAC предложены дисплеи с переменной плоскостью фокусировки (вариофокальные) [10—16], дисплеи с несколькими плоскостями изображения (мультифокальные) [6, 17—20], дисплеи светового поля [21—24] и др.

В вариофокальных дисплеях положение фокальной плоскости зависит от расстояния до объекта, на который смотрит наблюдатель в данный момент. Вариофокальный подход предполагает отслеживание положения глаз для определения направления взгляда пользователя, т.е. при этом определяется угол конвергенции обоих глаз. Эта информация используется для изменения положения плоскости изображения, чтобы аккомодация соответствовала конвергенции, и за счет этого устраняется VAC.

Как правило, такой подход реализуется за счет возвратно-поступательного движения дисплея по отношению к линзе окуляра [10, 11] или за счет вариофокальной линзовой системы (в которой можно изменять фокусное расстояние, например, с использованием линзы Альвареса [5]). Конечно, скорость оптической подстройки системы не очень высока, однако такие системы могут работать в режиме реального времени (поскольку движения глаз не очень быстрые).

В отличие от вариофокальных, мультифокальные дисплеи не требуют обязательного отслеживания глаз. В таких системах создается несколько виртуальных изображений, на которых пользователь может фокусировать взгляд. Однако для естественного зрения потребуется

минимум 14 плоскостей, расположенных от 500 мм и до бесконечности, с межплоскостным расстоянием в 1/7 диоптрии [17, 18]. К недостаткам таких систем также можно отнести уменьшенный коэффициент пропускания из-за потерь на поглощение, отражение и рассеяние в оптических материалах дисплеев.

В дисплеях светового поля между оптической системой и микродисплеем располагается матрица микролинз или матрица точечных отверстий, за счет чего формируется световое поле. Основными достоинствами таких систем являются небольшие размеры и масса, значительное поле зрения и небольшая дисторсия. Однако такие системы не позволяют обеспечить высокое пространственное разрешение [21—24].

**Комфортные зоны.** VAC хорошо изучен в оптометрии и офтальмологии, в этих областях используются три понятия: гетерофория, зона ясного одиночного бинокулярного зрения и зона комфорта.

При гетерофории направления взглядов левого и правого глаза в положении покоя, без необходимости бинокулярного слияния, не симметричны. Гетерофория может быть классифицирована на: экзофорию (exophoria), если взгляд отклоняется наружу (рис. 3, б), и эзофорию (esophoria), если направление отклонения — внутрь (рис. 3, в).

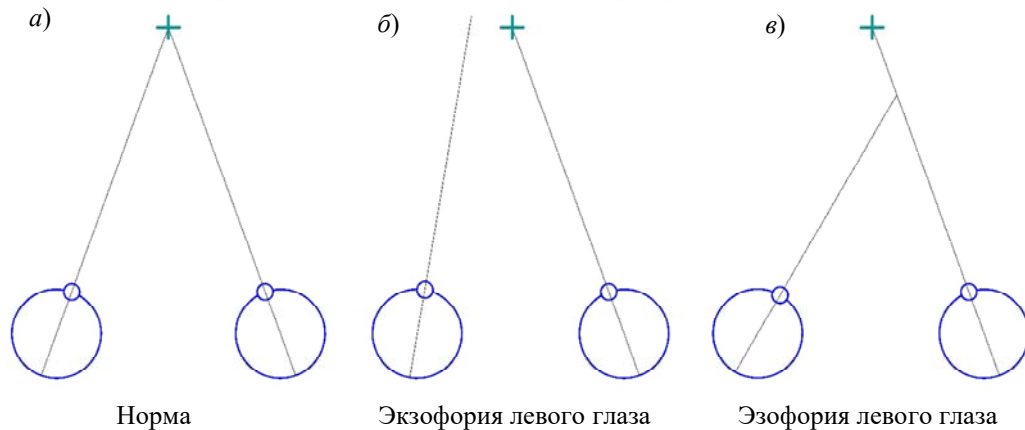


Рис. 3

Индивидуальные значения конвергенции и их связь с аккомодацией можно проиллюстрировать рис. 4 (положения покоя соединяются линией фории).

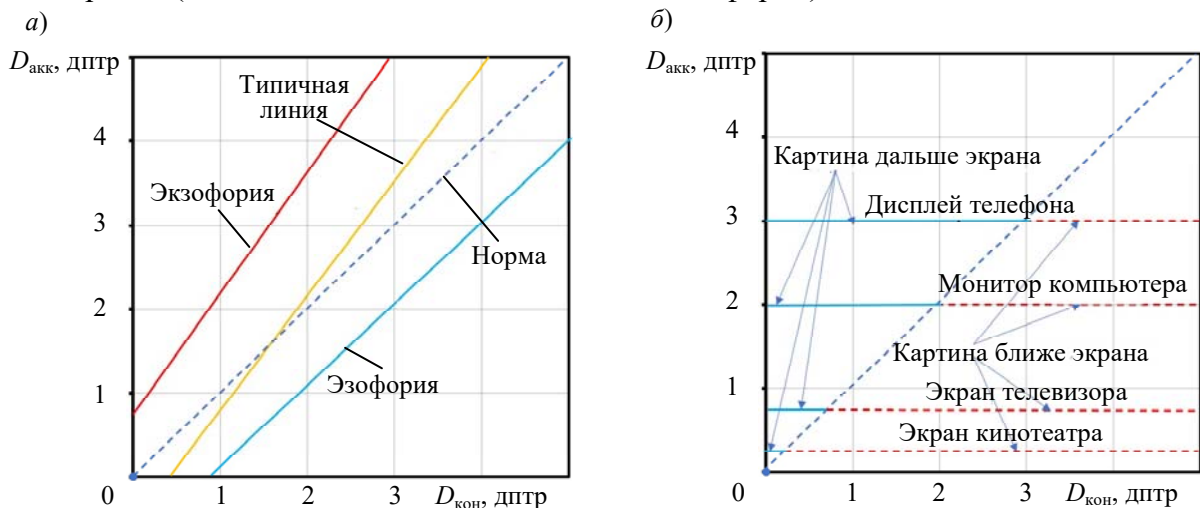


Рис. 4

Если линия фории находится левее линии „норма“, возникает экзофория, зрительные оси глаз имеют тенденцию не сходиться, наблюдателю более комфортно, когда стереоскопическая картина расположена дальше, чем экран. А если линия фории находится справа от

„нормы“, возникает эзофория, оси имеют тенденцию сходиться, наблюдателю более комфортно, если стереоскопическая картина ближе экрана.

Зона ясного одиночного бинокулярного зрения (zone of clear single binocular vision, ZCSBV) ясно видна наблюдателю при сохранении бинокулярного слияния [2, 25]. Как показали исследования, при наблюдении двумя глазами существует зона комфорта, в которой VAC не вызывает дискомфорт. По Персивалю [26], такая зона занимает одну треть ZCSBV, и при этом конвергентное расстояние ( $D_{\text{кон}}$ ) находится в интервале  $[(0,92D_{\text{акк}}-0,31), (1,02D_{\text{акк}}+0,66)]$  [8].

Шеард [27] пришел к аналогичному выводу, но утверждал, что зона комфорта простирается от каждой стороны линии фории до  $1/3$  расстояния до ZCSBV, в этом случае  $D_{\text{кон}} = [(0,79D_{\text{акк}}-0,19), (0,9D_{\text{акк}}+0,75)]$  [8]. Критерии Персиваля и Шеарда одинаковы, когда линия фории делит пополам ZCSBV, и различны в остальных случаях.

**Оценка конвергенции и аккомодации в оптических системах виртуальной реальности.** Для расчетов будем рассматривать схему рис. 1. Так как в бинокулярной системе зрительная ось глаза совпадает с оптической, то угол конвергенции всегда равен нулю ( $D_{\text{кон}}=0$ ). Для устранения VAC можно выполнить критерий Персиваля или Шеарда.

Из очевидных геометрических соотношений:  $d_{\text{акк}} = L + a'$  (мм), где  $d_{\text{акк}}$  — расстояние аккомодации,  $L$  — вынос зрачка.

Используя формулу отрезков, можно получить соотношение для расстояния аккомодации в виде:

$$d_{\text{акк}} = L + \frac{f'a}{f'-a}, \text{ или в диоптриях: } D_{\text{акк}} = \frac{1000}{d_{\text{акк}}} = \frac{1000(f'-a)}{(f'-a)L + f'a}. \quad (1)$$

Из критериев Персиваля и Шеарда и формул (1) можно сделать следующие выводы:

— если необходимо сформировать изображение в бесконечности, дисплей располагают в передней фокальной плоскости линзы ( $a = f'$ ), и в этом случае VAC не возникает. Так работают системы коллиматорного типа, используемые, например, в авионике;

— если изображение надо сформировать на некотором конечном расстоянии, VAC не возникает при  $D_{\text{акк}} < 0,345$  дптр (соответственно  $d_{\text{акк}} > 2,8$  м), согласно критерию Персиваля.

**Способы устранения конфликта конвергенции и аккомодации.** Преодолеть VAC при формировании изображения на конечном расстоянии относительно просто: например, добавить клин (рис. 5, а) или клиновую оптику и использовать децентрированные линзы (рис. 5, б). Применение таких элементов позволяет отклонить зрительную ось от оптической на угол  $\delta$ , поэтому  $D_{\text{кон}} \neq 0$ .

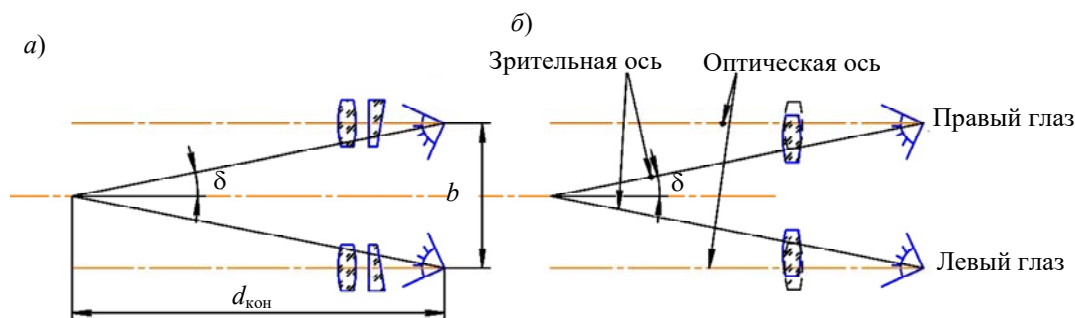


Рис. 5

Применение клиновой оптики основано на идеях Ю. А. Утехина. Клин располагается в системе, формирующей изображение, перед глазом наблюдателя. Клин отклоняет зрительную ось на угол  $\delta$ . Действие клина иллюстрирует рис. 6: 1 — осевой луч, 2 — главный луч, проходящий через центр зрачка;  $\varphi$  — угол отклонения первого луча от исходного направления;

$b$ , мм — расстояние между глазами;  $\alpha$  — угол клина;  $n$  — показатель преломления материала клина;  $\varepsilon$  — угол преломления первого луча через вторую поверхность клина.

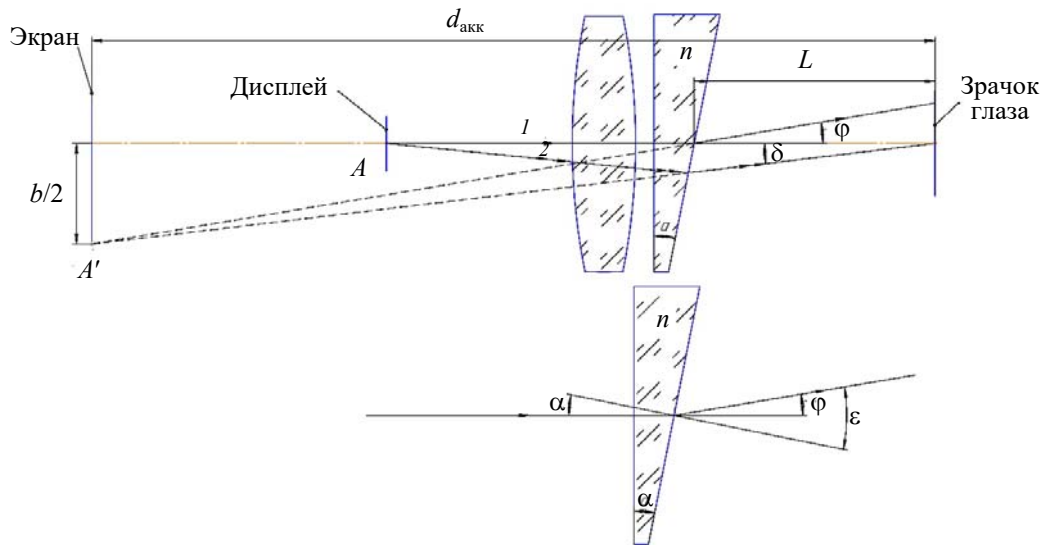


Рис. 6

В системе отсутствует VAC, когда:  $d_{\text{акк}} = d_{\text{кон}} = \frac{b}{2 \operatorname{tg} \delta}$  (мм).

С использованием закона преломления можно получить:

$$\varphi = \varepsilon - \alpha = \arcsin(n \cdot \sin \alpha) - \alpha, \quad (2)$$

$$\delta = \operatorname{arctg} \left( \frac{d_{\text{акк}} - L}{d_{\text{акк}}} \operatorname{tg} \varphi \right). \quad (3)$$

Выражения (2) и (3) позволяют получить уравнение:

$$\delta = \operatorname{arctg} \left[ \frac{d_{\text{акк}} - L}{d_{\text{акк}}} \operatorname{tg}(\arcsin(n \sin \alpha) - \alpha) \right]. \quad (4)$$

Таким образом, зная расстояние аккомодации и глазную базу, можно определить значения необходимого для решения задачи угла клина. На рис. 7 представлена зависимость угла клина от расстояния аккомодации для различных глазных баз при показателе преломления материала клина  $n = 1,5$  и  $L = 20$  мм ( $1 - b = 58$ ,  $2 - 62$ ,  $3 - 66$  мм).

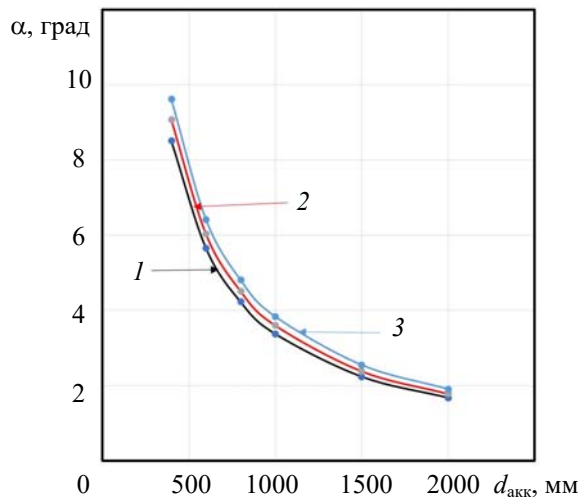


Рис. 7

На рис. 8, а представлен пример системы, в которой используется линза с асферической поверхностью в качестве объектива и добавлением клина для преодоления VAC. Фокусное

расстояние линзы  $f'=100$  мм, диаметр выходного зрачка  $D'=6$  мм, расстояние аккомодации 600 мм, угол клина  $6,08^\circ$ , клин выполнен из стекла N-BK7 (Schott).

На рис. 8, б) представлены пятна рассеяния одного канала в осевой точке при работе в стандартном видимом диапазоне  $d, F, C$ : видно, что добавление клиновидной оптики снижает качество изображения из-за внесения хроматических aberrаций. Полный размер пятна рассеяния  $7,2'$  для видимого диапазона, он не превышает размера кружка Эйри при работе в зеленом цвете.

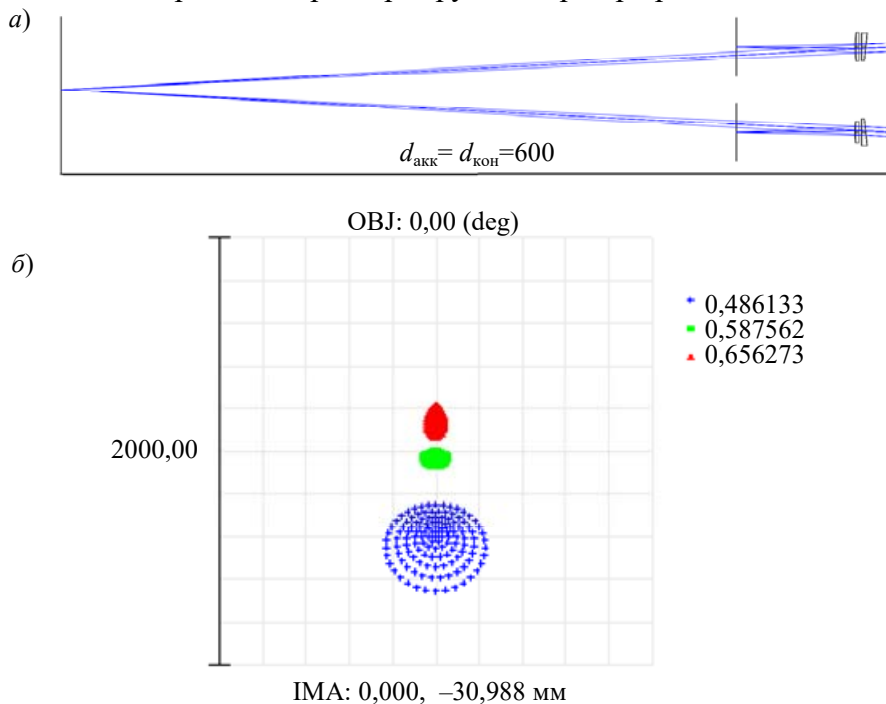


Рис. 8

На рис. 9 представлена принципиальная схема использования децентрированной линзы (представлен один канал — один глаз):  $d_1$  — оптическая ось центрированной линзы;  $d_2$  — оптическая ось децентрированной линзы;  $m$  (мм) — смещение линзы по  $Y$ ;  $A', A''$  — изображения точки  $A$ , построенные соответственно центрированной и децентрированной линзой,  $m'$  (мм) — смещение осевой точки изображения  $A''$  относительно централизованного положения  $A'$ .

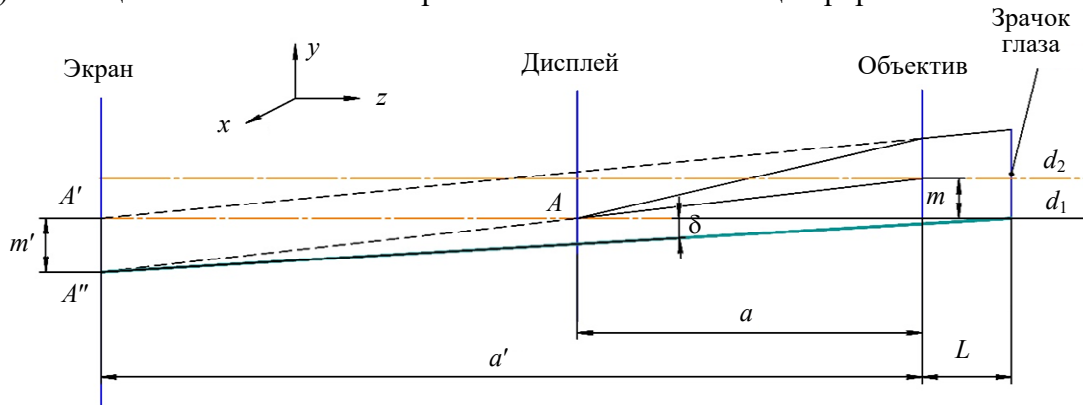


Рис. 9

Из рис. 9 видно, что:

$$m' = \frac{m(d_{акк} - L)}{f'}, \quad \text{tg } \delta = \frac{m'}{d_{акк}}. \tag{6}$$

В системе отсутствует VAC, когда:

$$d_{акк} = d_{кон} = \frac{b}{2 \text{tg } \delta}, \quad \text{при этом } m' = \frac{b}{2}. \tag{7}$$

Тогда с учетом выражений (6) и (7):

$$m = \frac{bf'}{2(d_{\text{акк}} - L)}. \quad (8)$$

На рис. 10 представлена зависимость смещения линзы от расстояния аккомодации для различных фокусных расстояний при размере глазной базы  $b = 62$  мм,  $L = 20$  мм. При  $b > 62$  мм графики сместятся вверх, и наоборот. Зависимость смещения линзы от расстояния аккомодации: 1 — при  $f' = 25$ , 2 — 50, 3 — 100, 4 — 150, 5 — 200 мм.

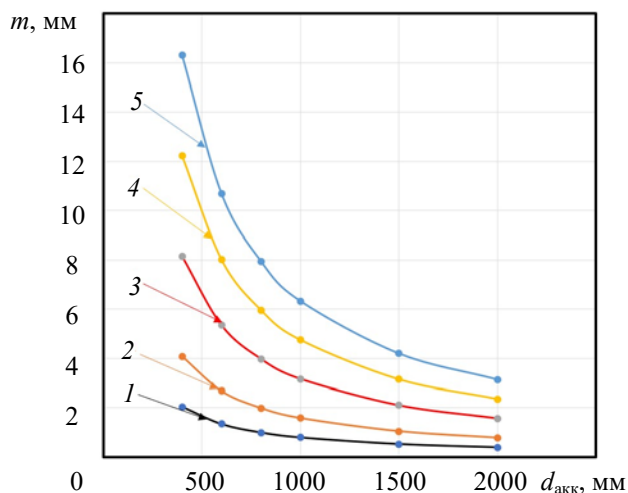
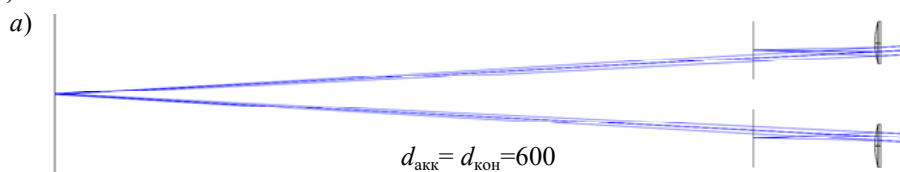


Рис. 10

Из результатов расчетов видно: чем больше фокусное расстояние, тем больше необходимо смещение линзы для устранения VAC. Однако большие значения фокусного расстояния, как правило, не используются в таких системах поскольку это увеличит габариты устройства.

На рис. 11, а представлен пример схемы с использованием децентрированной одиночной линзы с асферической поверхностью:  $f' = 100$  мм,  $D' = 6$  мм,  $m = 5,34$  мм,  $d_{\text{акк}} = 600$  мм. На рис. 11, б представлены пятна рассеяния для одного канала в осевой точке при работе в диапазоне  $d, F, C$ .



OBJ: 0,00 (deg)

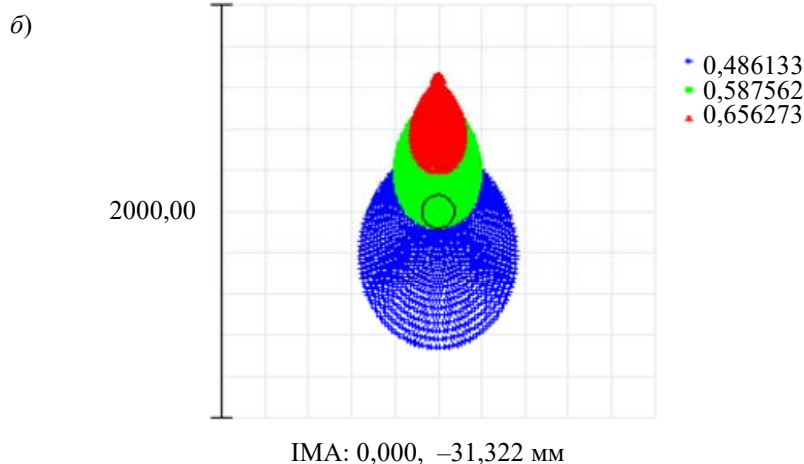


Рис. 11

**Выводы.** В работе рассмотрен конфликт конвергенции и аккомодации в системах виртуальной и дополненной реальности, работающих с изображением, полученным на конечном расстоянии. Рассмотрены варианты принципиального решения на основе клиновой оптики и децентрированных линз. Предложенные решения представляют собой базовые схемы, которые могут быть положены в основу дальнейшего абберационного расчета подобных систем, свободных от недостатков, присущих существующим решениям.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Woods A. J.* How are crosstalk and ghosting defined in the stereoscopic literature? // Proc. SPIE. 2011. Vol. 7863. Stereoscopic Displays and Applications XXII. P. 78630Z (25 February). DOI: 10.1117/12.877045.
2. *Kooi F. L., Toet A.* Visual comfort of binocular and 3D displays // Displays. 2004. Vol. 25. P. 99—108. DOI: 10.1016/j.displa.2004.07.004.
3. *Kim J., Kim W., Ahn S., Kim J., and Lee S.* Virtual Reality Sickness Predictor: Analysis of visual-vestibular conflict and VR contents // 2018 10th Intern. Conf. on Quality of Multimedia Experience (QoMEX). Cagliari, 2018. P. 1—6. DOI: 10.1109/QoMEX.2018.8463413.
4. *Zabels R. et al.* AR Displays: Next-Generation Technologies to Solve the Vergence–Accommodation Conflict // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. DOI:10.3390/APP9153147.
5. *Wilson A., Hong Hua.* High-resolution optical see-through vari-focal plane head-mounted display using freeform Alvarez lenses // Proc. SPIE. 2018. Vol. 10676. Digital Optics for Immersive Displays. P. 106761J. DOI: 10.1117/12.2315771.
6. *Cui W., Gao L.* Optical mapping near-eye three-dimensional display with correct focus cues // Opt. Lett. 2017. DOI: 10.1364/OL.42.002475. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1707/1707.03685.pdf>.
7. *Zabels R., Osmanis K., Narels M., Smukulis R., Osmanis I.* Integrated head-mounted display system based on a multi-planar architecture // Proc SPIE. 2019. Advances in Display Technologies IX. Vol. 10942. P. 1094208. DOI: 10.1117/12.2509954.
8. *Shibata T., Kim J., Hoffman D. M. et al.* The zone of comfort: predicting visual discomfort with stereo displays // Journal of Vision. 2011. Vol. 11, N 8. DOI: 10.1167/11.8.11.
9. *Hoffman D. M., Girshick A. R., Akeley K., Banks M. S.* Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue // Journal of Vision. 2008. Vol. 8, N 3. P. 1—30. DOI: 10.1167/8.3.33.
10. *Akşit K., Lopes W., Kim J., Shirley P., Luebke D.* Near-eye varifocal augmented reality display using see-through screens // ACM Transactions on Graphics. 2017. Vol. 36, N 6. P. 1—13. DOI:10.1145/3130800.3130892.
11. *Hasnain A., Laffont P.-Y., Jalil S. B. A., Buyukburc K., Guillemet P.-Y., Wirajaya S., Khoo L., Deng T., Bazin J. C.* Piezo-actuated varifocal head-mounted displays for virtual and augmented reality // Proc. SPIE. 2019. Vol. 10942. P. 1094207. DOI: 10.1117/12.2509143.
12. [Электронный ресурс]: <<https://www.vision-systems.com/non-factory/life-sciences/article/16738531/look-up-the-number>>.
13. *Suyama S., Date M., and Takada H.* Three-dimensional display system with dual-frequency liquid-crystal varifocal lens // Jpn. J. Appl. Phys. 2000. Vol. 39, N 2A. P. 480—484. DOI: 10.1143/JJAP.39.480.
14. *Liu S., Cheng D., and H. Hua.* An optical see-through head mounted display with addressable focal planes // Proc. 7th IEEE/ACM Int. Symp. Mixed Augmented Reality. Sep. 2008. P. 33—42. DOI: 10.1109/ISMAR.2008.4637321.
15. *Liu S. and Hua H.* Time-multiplexed dual-focal plane head mounted display with a liquid lens // Opt. Lett. 2009. Vol. 34, N 11. P. 1642. DOI: 10.1364/OL.34.001642.
16. *Shibata T., Kawai T., Ohta K., Otsuki M., Miyake N., Yoshihara Y., Iwasaki T.* Stereoscopic 3-D display with optical correction for the reduction of the discrepancy between accommodation and convergence // J. Soc. Inf. Disp. 2005. DOI: 10.1889/1.2039295.
17. *Rolland J. P., Krueger M. W., and Goon A. A.* Dynamic focusing in head mounted displays // Proc. SPIE. 1999. Vol. 3639. P. 463—470. DOI: 10.1117/12.349412.



18. Rolland J. P., Krueger M. W., and Goon A. Multifocal planes head-mounted displays // *Appl. Opt.* 2000. Vol. 39, N 19. P. 3209–3215. DOI: 10.1364/AO.39.003209.
19. Akeley K., Watt S. J., Girshick A. R., and Banks M. S. A stereo display prototype with multiple focal distances // *ACM SIGGRAPH Papers*. 2004. Vol. 23, N 3. P. 804. DOI: 10.1145/1015706.1015804.
20. Cheng D., Wang Q., Wang Y., and Jin G. Lightweight spatial-multiplexed dual focal-plane head-mounted display using two freeform prisms // *Chin. Opt. Lett.* 2013. Vol. 11, N 3. DOI:10.3788/COL201311.031201.
21. Hua H. and Javidi B. A 3D integral imaging optical see-through head-mounted display // *Opt. Express*. 2014. Vol. 22. P. 13484—13491. DOI: 10.1364/OE.22.013484.
22. Song W., Wang Y., Cheng D., and Liu Y. Design of light field head mounted display // *Proc. SPIE*. 2014. Vol. 9293. P. 92930J. DOI: 10.1364/IODC.2014.ITh4A.3.
23. Song W., Wang Y., Cheng D., and Liu Y. Light field head-mounted display with correct focus cue using microstructure array // *Chin. Opt. Lett.* 2014. N 12. P. 060010. DOI:10.3788/COL201412.060010.
24. Patent WO2018091984A1. Near-Eye Sequential Light-Field Projector with Correct Monocular Depth Cues / T. Sluka. 24 May 2017.
25. Donders F. C. On the anomalies of accommodation and refraction. London: New Sydenham Society, 1864. 344 p.
26. Percival A. S. The relation of convergence to accommodation and its practical bearing // *Ophthalmological Review*. 1892. N 11. P. 313—328.
27. Sheard C. The prescription of prisms // *American J. of Optometry*. 1934. N 11. P. 364—378.

**Сведения об авторах**

**Нгок Шон Нгуен**

— аспирант; Университет ИТМО, факультет прикладной оптики;  
E-mail: sonitmo@gmail.com

**Галина Эдуардовна Романова**

— канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет прикладной оптики; E-mail: romanova\_g\_e@mail.ru

Поступила в редакцию  
31.08.2020 г.

**Ссылка для цитирования:** Нгок Шон Нгуен, Романова Г. Э. Преодоление конфликта конвергенции и аккомодации в системах виртуальной и дополненной реальности // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2021. Т. 64, № 2. С. 143—152.

**OVERCOMING THE CONFLICT OF CONVERGENCE AND ACCOMMODATION  
IN VIRTUAL AND AUGMENTED REALITY SYSTEMS**

**Ngoc Son Nguyen, G. E. Romanova**

*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia*  
*E-mail: sonitmo@gmail.com*

Existing options for solving the problem of vergence-accommodation conflict in virtual and augmented reality systems are analyzed. An assessment of convergence and accommodation in virtual reality optical systems is carried out. A new approach based on wedge optics and decentralized lenses is proposed.

**Keywords:** Virtual reality, augmented reality, vergence-accommodation conflict, varifocal displays, multifocal displays, light field displays, zone of comfort, the zone of clear single binocular vision, phoria

**REFERENCES**

1. Woods A.J. *Proc. SPIE*. 2011, vol. 7863, Stereoscopic Displays and Applications XXII, pp. 78630Z (25 February 2011). DOI: 10.1117/12.877045.
2. Kooi F.L., Toet A. *Displays*, 2004, vol. 25, pp. 99–108, DOI: 10.1016/j.displa.2004.07.004.
3. Kim J., Kim W., Ahn S., Kim J., Lee S. *2018 Tenth International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)*, Cagliari, 2018, pp. 1–6, DOI: 10.1109/QoMEX.2018.8463413.
4. Zabels R. et al. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, DOI:10.3390/APP9153147.
5. Wilson A., Hong Hua. *Proc. SPIE*, 2018, vol. 10676, Digital Optics for Immersive Displays, pp. 106761J, DOI: 10.1117/12.2315771.
6. Cui W., Gao L. *Opt Lett.*, 2017, DOI: 10.1364/OL.42.002475, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1707/1707.03685.pdf>.

7. Zabels R., Osmanis K., Narels M., Smukulis R., Osmanis I. *Proc SPIE*, 2019, Advances in Display Technologies IX, vol. 10942, pp. 1094208, DOI: 10.1117/12.2509954.
8. Shibata T., Kim J., Hoffman D.M. et al. *Journal of Vision*, 2011, no. 8(11), DOI: 10.1167/11.8.11.
9. Hoffman D.M., Girshick A.R., Akeley K., Banks M.S. *Journal of Vision*, 2008, no. 8(3), pp. 1–30, DOI: 10.1167/8.3.33.
10. Akşit K., Lopes W., Kim J., Shirley P., Luebke D. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, no. 6(36), pp. 1–13. DOI:10.1145/3130800.3130892.
11. Hasnain A., Laffont P.-Y., Jalil S.B.A., Buyukburc K., Guillemet P.-Y., Wirajaya S., Khoo L., Deng T., Bazin J.C. *Proc. SPIE*, 2019, vol. 10942, pp. 1094207. DOI: 10.1117/12.2509143.
12. <https://www.vision-systems.com/non-factory/life-sciences/article/16738531/look-up-the-number>.
13. Suyama S., Date M., and Takada H. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2000, no. 2A(39), pp. 480–484. DOI: 10.1143/JJAP.39.480.
14. Liu S., Cheng D., and Hua H. *Proc. 7th IEEE/ACM Int. Symp. Mixed Augmented Reality*, Sep. 2008, pp. 33–42, DOI: 10.1109/ISMAR.2008.4637321.
15. Liu S. and Hua H. *Opt. Lett.*, 2009, no. 11(34), pp. 1642, DOI: 10.1364/OL.34.001642.
16. Shibata T., Kawai T., Ohta K., Otsuki M., Miyake N., Yoshihara Y., Iwasaki T. *J. Soc. Inf. Disp.*, 2005, DOI: 10.1889/1.2039295.
17. Rolland J.P., Krueger M.W., and Goon A.A. *Proc. SPIE*, 1999, vol. 3639, pp. 463–470, DOI: 10.1117/12.349412.
18. Rolland J.P., Krueger M.W., and Goon A. *Appl. Opt.*, 2000, no. 19(39), pp. 3209–3215, DOI: 10.1364/AO.39.003209.
19. Akeley K., Watt S.J., Girshick A.R., and Banks M.S. *ACM SIGGRAPH Papers*, 2004, no. 3(23), pp. 804, DOI: 10.1145/1015706.1015804
20. Cheng D., Wang Q., Wang Y., and Jin G. *Chin. Opt. Lett.*, 2013, no. 3(11), DOI:10.3788/COL201311.031201.
21. Hua H. and Javidi B. *Opt. Express*, 2014, no. 22, pp. 13484–13491, DOI: 10.1364/OE.22.013484.
22. Song W., Wang Y., Cheng D., and Liu Y. *Proc. SPIE*, 2014, vol. 9293, pp. 92930J, DOI: 10.1364/IODC.2014.ITh4A.3.
23. Song W., Wang Y., Cheng D., and Liu Y. *Chin. Opt. Lett.*, 2014, no. 12, pp. 060010, DOI:10.3788/COL201412.060010.
24. Patent WO2018091984A1, *Near-Eye Sequential Light-Field Projector with Correct Monocular Depth Cues*, T. Sluka, 24 May 2017.
25. Donders F.C. *On the anomalies of accommodation and refraction*, London, New Sydenham Society, 1864, 344 p.
26. Percival A.S. *Ophthalmological Review*, 1892, no. 11, pp. 313–328.
27. Sheard C. *American Journal of Optometry*, 1934, no. 11, pp. 364–378.

#### **Data on authors**

**Ngoc Son Nguyen**

— Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Applied Optics; E-mail: sonitmo@gmail.com

**Galina E. Romanova**

— PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Applied Optics; E-mail: romanova\_g\_e@mail.ru

**For citation:** Ngoc Son Nguyen, Romanova G. E. Overcoming the conflict of convergence and accommodation in virtual and augmented reality systems. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 2. P. 143–152 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-2-143-152