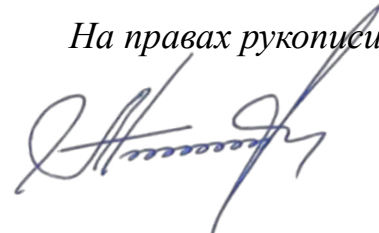


На правах рукописи



Костоев Адам Тимурович

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОШИБОК ЗРИТЕЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ

Специальность – 2.3.8 Информатика и информационные процессы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре искусственного интеллекта, прикладной математики и программирования в *федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)»*

Научный руководитель:

Цурков Владимир Иванович

доктор физико-математических наук, профессор,
ФИЦ ИУ РАН,
заведующий отделом № 13 (сложных систем)

Официальные оппоненты:

Кононов Дмитрий Алексеевич

доктор технических наук, доцент,
ИПУ РАН,
ведущий научный сотрудник

Рихтер Андрей Александрович

кандидат технических наук,
НИИ «Аэрокосмос»,
научный сотрудник

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Защита состоится «___» _____ 2025 г. в ____ на заседании диссертационного совета 24.1.224.03 при Федеральном исследовательском центре «Информатика и управление» Российской академии наук по адресу: 119333, г. Москва, ул. Вавилова, д. 42.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук и на сайте <https://www.frccsc.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.224.03
кандидат технических наук



Рейер И.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Зрительное восприятие играет ключевую роль при обработке информации человеком. Понимание механизмов зрительного восприятия является важным фактором исследований в различных областях науки и техники: психологии, психофизиологии, искусственного интеллекта и др. При этом известно, что восприятие человеком сенсорной информации – сложный процесс, подверженный различным ошибкам и искажениям. Неправильная трактовка видимого образа может быть связана с различными нарушениями зрительных органов чувств и обычно подразумевает индивидуальный характер восприятия человека.

Однако существуют и систематические неточности в восприятии, причины которых до сих пор остаются неоднозначными. Главное отличие подобных ошибок в том, что они не поддаются произвольной коррекции и закономерно проявляются у каждого человека. Такие явления восприятия называют зрительными (или оптическими) иллюзиями. Особый интерес для исследователей представляет класс геометрических иллюзий, возникающих при оценке свойств и параметров объектов, вызывающих искажения форм, размеров, наклонов, расстояний и других геометрических параметров фигур. Такой интерес вызван достаточно удобной процедурой количественной регистрации ошибочных оценок, позволяющий исследовать сложные механизмы зрительного восприятия.

Актуальность исследования также обусловлена влиянием зрительных геометрических иллюзий в различных сферах профессиональной и научной деятельности: психофизика и психология восприятия, оформление интерьеров и городского пространства, дизайн и моделирование одежды и др.

Степень разработанности темы. Систематическое изучение зрительных геометрических иллюзий началось с середины XIX века. Существенный вклад внесли такие ученые, как J. Oppel, F. Muller-Lyer, J. Poggendorff, F. Zolner, W. Wundt, E. Hering, H. Ebbinghaus, H. Helmholtz, E. Titchener и др. Вышеперечисленными учеными открыты первые геометрические иллюзии, традиционно рассматриваемые в науке как классические.

В период XX века среди зарубежных и отечественных исследований стоит отметить работы И.Д. Артаманова, А.Л. Ярбуса, В.Д. Глезера, R. Day, R. Gregory, B. Gillam, E. Greene, H. Leibowitz и др.

В настоящее время изучением искажений зрительного восприятия занимаются группы исследователей различных научно-исследовательских институтов. Особое место занимают работы сотрудников Института физиологии им. И.П. Павлова РАН, г. Санкт-Петербург: В.М. Бондарко, М.В. Данилова, В.Н. Чихман и др.

Отдельного внимания заслуживают работы, осуществленные в Институте проблем передачи информации имени А.А. Харкевича РАН, г. Москва: Г.И. Рожкова, Е.А. Толмачева, В.В. Огников и др.

Существенный вклад в изучение психологических механизмов возникновения зрительных иллюзий и их классификацию внесла Г.Я. Меншикова (МГУ им. М.В. Ломоносова). Также стоит отметить работы Л.Н. Медведева, И.И. Шошиной,

Е.С. Федоровой и др., занимающихся исследованием влияния индивидуальных свойств человека на возникновение искажений в зрительном восприятии.

Однако несмотря на давнюю историю изучения сенсорных ошибок восприятия, на сегодняшний день нет ни одной сформулированной гипотезы, позволяющей исключить противоречия хотя бы в объяснении основных закономерностей зрительного искажения при восприятии даже простых геометрических фигур. Одной из причин такого положения – недостаточно надежная процедура тестирования испытуемых, в связи с чем возникает необходимость в разработке методов количественного тестирования, дающих относительно высокую воспроизводимость результатов.

Важно отметить значимость разработки средств компьютерной поддержки для автоматизированных психофизиологических экспериментов, направленных на изучение механизмов зрительного восприятия. Основное внимание при разработке уделяется аспектам синтеза и сохранения изображений-стимулов, их предъявлению наблюдателям, а также анализу ответов в специализированных программах. В настоящее время отечественными и зарубежными авторами разработан ряд различного программного обеспечения (ПО) для проведения психофизиологических экспериментов. Однако большинство разрабатываемого ПО в области исследований зрительного восприятия в настоящее время является лишь инструментом для решения отдельных задач в рамках одного типа исследований. В связи с чем возникает необходимость в разработке общей методологии проведения экспериментов (тестирований) и системы, реализующей данную методологию.

Также присутствует необходимость в изучении влияния геометрических параметров на величину зрительных искажений. Важно понять при каких условиях зрительные иллюзии проявляются наиболее сильно, при каких исчезают совсем, каков характер зависимости иллюзии при варьировании геометрических характеристик, как компенсировать проявление иллюзии. Детальный анализ всех тонкостей проявления зрительных иллюзий в зависимости от их геометрических параметров позволит, в свою очередь, найти более однозначные ответы на вопросы о механизмах возникновения зрительных иллюзий.

Целью исследования является автоматизация процесса тестирования и статистического анализа данных систематических ошибок зрительного восприятия, возникающих при оценке человеком геометрических иллюзий.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **задач исследования**:

1. Построить и описать модель тестирования систематических ошибок зрительного восприятия как информационный процесс;
2. Разработать методологию и автоматизированную систему тестирования систематических ошибок зрительного восприятия, позволяющие осуществлять исследования геометрических иллюзий при различной постановке задачи;
3. Используя предложенную методологию и систему тестирования определить статистические зависимости иллюзий Поггендорфа, Мюллера-Лайера и Вунда-Фика от их основных геометрических характеристик;
4. Построить регрессионные модели, наиболее адекватно описывающие зависимости иллюзий от их основных геометрических характеристик;

5. Выявить зависимость геометрических иллюзий от ориентационных характеристик тест-объектов;

6. Построить регрессионные модели, наиболее адекватно описывающие зависимости иллюзий от их ориентационных характеристик.

Методология и методы исследования.

Для решения поставленных задач и выполнения цели исследования используются: методы разработки и проектирования ПО, эксперимент (в форме тестирования), статистическая обработка данных, методы корреляционного и регрессионного анализа данных, проверка статистических гипотез.

Научная новизна исследования.

1. Впервые разработана модель тестирования зрительных иллюзий в виде информационного процесса;

2. Построены регрессионные модели зависимостей ошибок от геометрических параметров иллюзий Поггендорфа, Мюллера-Лайера и Вунда-Фика;

3. Впервые проанализированы модификации иллюзий Поггендорфа, Мюллера-Лайера и Вунда-Фика, с учетом вращения всей тестовой конструкции;

4. Выдвинуты и подтверждены гипотезы о тригонометрическом характере геометрических иллюзий при повороте тест-объектов.

Теоретическая и практическая значимость.

Результаты, изложенные в диссертации, используются в научной работе лаборатории психологии познавательных процессов и математической психологии ИП РАН. Разработанная методология и автоматизированная система включены в научный процесс сбора результатов тестирования на восприятие геометрических иллюзий.

Результаты диссертационной работы используются также в учебном процессе и научно-исследовательской работе (НИР) кафедры искусственного интеллекта, прикладной математики и программирования ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина». Разработанная методология и автоматизированная система тестирования систематических ошибок зрительного восприятия включены в процесс осуществления производственной практики «Технологическая (проектно-технологическая) практика», проводимой студентам кафедры. В рамках НИР 2019-2023 гг. в ходе выполнения темы «Разработка интеллектуальной организационно-технической системы для поддержки целенаправленной деятельности» получено 3 патента и зарегистрировано 3 программы для ЭВМ. Полученные результаты используются также в НИР 2024-2028 гг. в ходе выполнения темы «Новые методы и модели передачи, обработки, хранения и анализа данных».

Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, также нашли практическое применение в деятельности компании ООО «Салюте-дизайн», специализирующейся на разработке и производстве одежды. В частности, они используются при моделировании и проектировании изделий для людей с асимметричной антропометрией. Внедрение полученных научных данных позволяет более точно учитывать индивидуальные морфологические особенности фигуры, повышая эргономичность, комфорт и эстетическую выразительность создаваемой продукции. Это способствует оптимизации процессов конструирования и улучшению потребительских характеристик одежды для данной категории пользователей.

Положения, выносимые на защиту.

1. Тестирование систематических ошибок зрительного восприятия представлено как информационный процесс. Предложена методика проведения тестирования;
2. Спроектирована автоматизированная система тестирования систематических ошибок зрительного восприятия, позволяющая проводить эксперименты с различными иллюзиями в рамках единой методики;
3. Работа системы подтверждена проведением исследования иллюзий Поггендорфа, Мюллера-Лайера и Вунда-Фика. Получены характеры зависимости иллюзии от геометрических признаков, которые не противоречат существующим исследованиям;
4. Проведены исследования новой модификации иллюзий Поггендорфа, Мюллера-Лайера, Вунда-Фика – вращение. Получены статистические зависимости величины иллюзий от угла поворота тест-объектов;
5. Получены статистические модели зависимостей для всех исследуемых вариантов иллюзий Поггендорфа, Мюллера-Лайера и Вунда-Фика от их геометрических параметров.

Степень достоверности и апробация работы. Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается: обширным анализом работ в области исследования зрительных иллюзий; описанием и воспроизводимостью экспериментов, проведенных в форме тестирования зрительного восприятия испытуемых в условиях возникновения геометрических иллюзий; корректным применением математического аппарата корреляционно-регрессионного анализа данных и проверкой статистических гипотез, корректным использованием современных средств программирования и методов проектирования ПО; согласованностью результатов проведенных экспериментальных исследований с известными теоретическими положениями в области зрительного восприятия; публикациями результатов в рецензируемых изданиях, в том числе рекомендованных ВАК; патентами на изобретения и полезную модель, подтверждающие работоспособность и воспроизводимость предложенной системы тестирования.

Основные результаты исследования докладывались на следующих конференциях: 31st International Conference of Young Scientists and Students «Topical Problems of Mechanical Engineering», Moscow, Russia, 2019; Постоянно действующий семинар кафедры прикладной математики и программирования ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина «Теория систем», Москва, 2020, 2022, 2023, Москва, Россия; Всероссийская научная конференция молодых исследователей с международным участием, Москва, 2022.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 16 работ: 5 работ в изданиях, входящих в перечень ВАК (категории K1 и K2) и/или Scopus; 5 работ в сборниках трудов конференций, индексируемые в РИНЦ. Также получено 2 патента на изобретение, 1 патент на полезную модель и 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Соответствие паспорту научной специальности. Содержание диссертации и направленность полученных результатов соответствуют следующим пунктам

паспорта специальности 2.3.8 «Информатика и информационные процессы» (технические науки):

1. Разработка компьютерных методов и моделей описания, оценки и оптимизации информационных процессов и ресурсов, а также средств анализа и выявления закономерностей на основе обмена информацией пользователями и возможностей используемого программно-аппаратного обеспечения;

16. Автоматизированные информационные системы, ресурсы и технологии по областям применения (научные, технические, экономические, образовательные, гуманитарные сферы деятельности), форматам обрабатываемой, хранимой информации. Системы принятия групповых решений, системы проектирования объектов и процессов, экспертные системы и др.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографии, списка рисунков и таблиц, приложений. Общий объем диссертации 114 страниц (без учета приложений), из них 94 страницы текста, включая 43 рисунка и 15 таблиц. Библиография включает 160 наименований на 16 страницах.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность исследования, описана степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи, аргументирована научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, представлены основные методы исследования и выносимые на защиту научные положения.

В первой главе проводится обзор существующих подходов исследования зрительных иллюзий, отдельно рассмотрен класс геометрических иллюзий. Описаны общие представления о механизмах возникновения зрительных иллюзий. Также проведен обзор методов и систем оценок зрительного восприятия.

Исследования геометрических иллюзий разделяются на качественные и количественные методы. Классические методы уравнивания, лестницы и постоянных стимулов остаются фундаментальными инструментами количественного анализа иллюзий. Они позволяют измерять точку субъективного равенства – значение параметра, при котором воспринимаемая иллюзия исчезает. Каждый метод обладает своими преимуществами: метод уравнивания подходит для интуитивной подстройки, метод лестницы – для оптимального баланса между точностью и экономичностью, а метод постоянных стимулов – для построения психометрических функций и глубокой статистической обработки. Качественные методы ориентированы на выявление наличия иллюзии, но не позволяют точно измерить её силу. Количественные методы, напротив, позволяют выразить величину искажения в физических единицах, обеспечивая воспроизводимость, возможность статистической обработки и точное сопоставление между группами испытуемых и условиями.

Физиологические и психологические особенности испытуемых (возраст, пол, психическое состояние и др.) существенно влияют на восприимчивость к иллюзиям. Одновременно варьирование свойств самой иллюзорной фигуры позволяет выявить значимые факторы, определяющие силу иллюзии и уровень зрительной обработки, к которому она относится. Эксперименты с целенаправленной

модификацией иллюзорных фигур (изменение углов, удаление контекста, добавление отвлекающих элементов и др.) позволяют проверять гипотезы о механизмах возникновения зрительных иллюзий. Если изменение одного параметра существенно снижает эффект иллюзии, это указывает на его критическую роль в зрительной интерпретации.

Современное ПО для исследования геометрических иллюзий позволяет количественно оценивать силу зрительных искажений с высокой точностью. Автоматизация предъявления стимулов и фиксации ответов минимизирует влияние человеческого фактора и обеспечивает воспроизводимость результатов. ПО, позволяющее испытуемым самостоятельно настраивать параметры иллюзорной фигуры до субъективного устранения эффекта, демонстрируют более высокую чувствительность и выявляют широкий диапазон индивидуальных вариаций. Описанные в научной литературе программные комплексы включают модули для различных классических иллюзий, а также позволяют варьировать условия предъявления, что делает их удобными для сравнительных и комплексных исследований.

Однако известные программные средства в области исследования геометрических иллюзий требуют полного присутствия оператора, что затрудняет масштабируемость и ограничивает возможности группового тестирования. Кроме того, техническое устаревание используемых платформ снижает гибкость и переносимость ПО на современные системы. Также отсутствует встроенная статистическая обработка, что требует дополнительных усилий на этапе анализа данных.

Во второй главе предложена общая модель тестирования систематических ошибок зрительного восприятия, представленная как информационный процесс. Процесс тестирования описан и формализован методами функционального моделирования IDEF0 (англ. function modeling) и UML (англ. Unified Modeling Language – унифицированный язык моделирования). На общей контекстной диаграмме обозначены входы, выходы, механизмы и элементы управления, задействованные в процессе тестирования (Рис. 1).



Рис. 1. Процесс тестирования зрительного восприятия

Участниками процесса являются: испытуемый (или группа испытуемых), исследователь (или группа исследователей) и ПО. В начале процесса формируется постановка задачи исследования, в зависимости от которой осуществляется сам процесс тестирования. Постановка задачи представляет управляющий элемент, от которого зависит функционал процесса тестирования, реализуемый исследователем и ПО, выступающими в качестве механизмов процесса. Входным элементом процесса выступает испытуемый, который, следуя инструкциям исследователя, проходит тестирование. На выходе процесса формируются результаты тестирования.

Процесс тестирования разделен на четыре основных этапа: разработка тестовых материалов, инструктаж, проведение тестирования, обработка и анализ результатов тестирования (Рис. 2). Указанные этапы отражают основные функции процесса и являются также декомпозируемыми (Рис. 3-5).

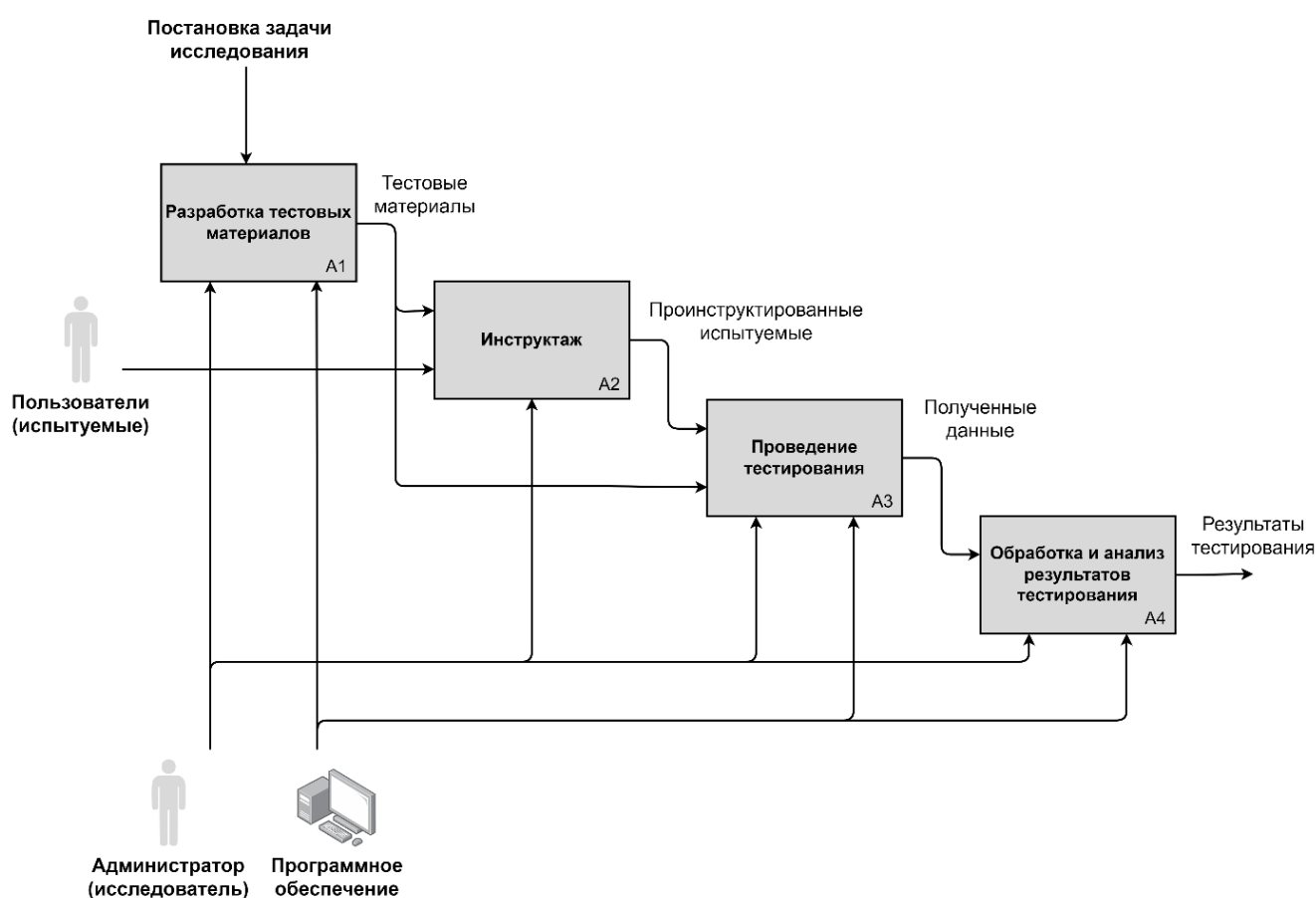


Рис. 2. Основные этапы процесса тестирования

Для детализации особенностей алгоритмической и процедурной реализации выполняемых системой операций и ее взаимодействия с участниками процесса разработаны сценарии действий исследователя и испытуемого. Диаграммы отражают последовательность операций процесса взаимодействия системы и исследователя и возможные для них сценарии исполнения процесса. Также разработаны алгоритмы взаимодействия испытуемого и исследователя с системой.

Основные результаты второй главы опубликованы в работе [1].

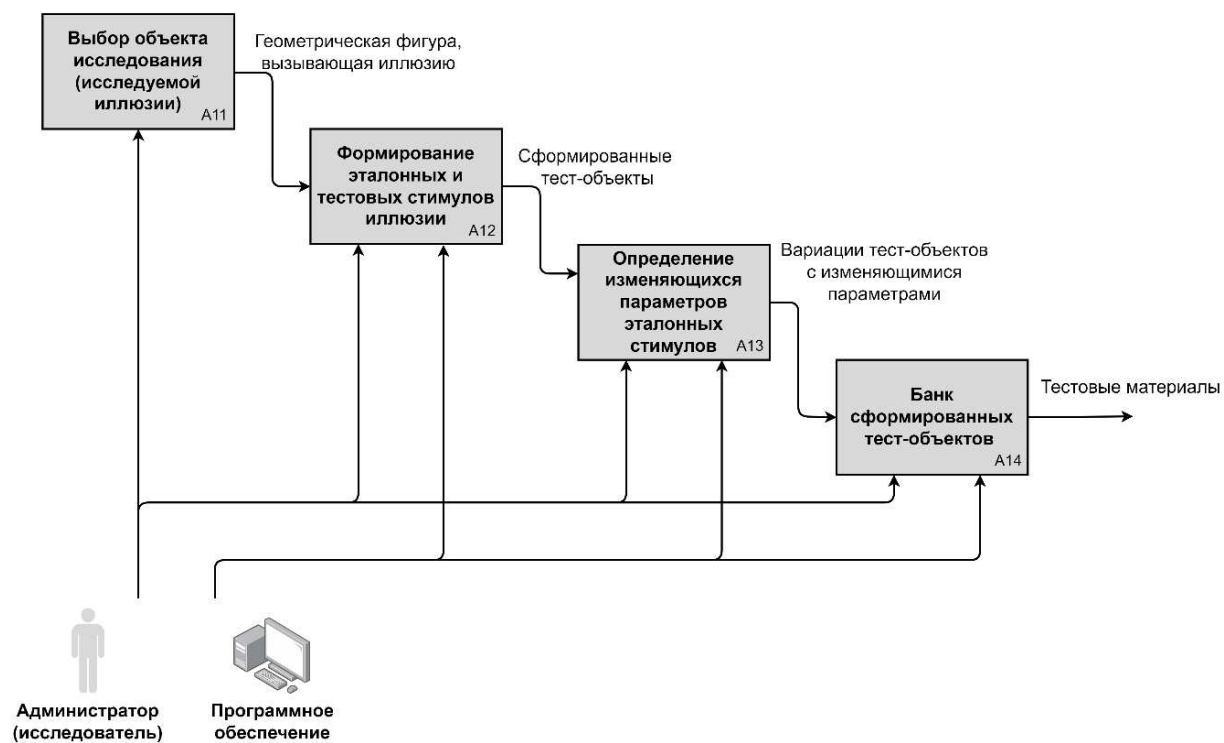


Рис. 3. Этап разработки тестовых материалов

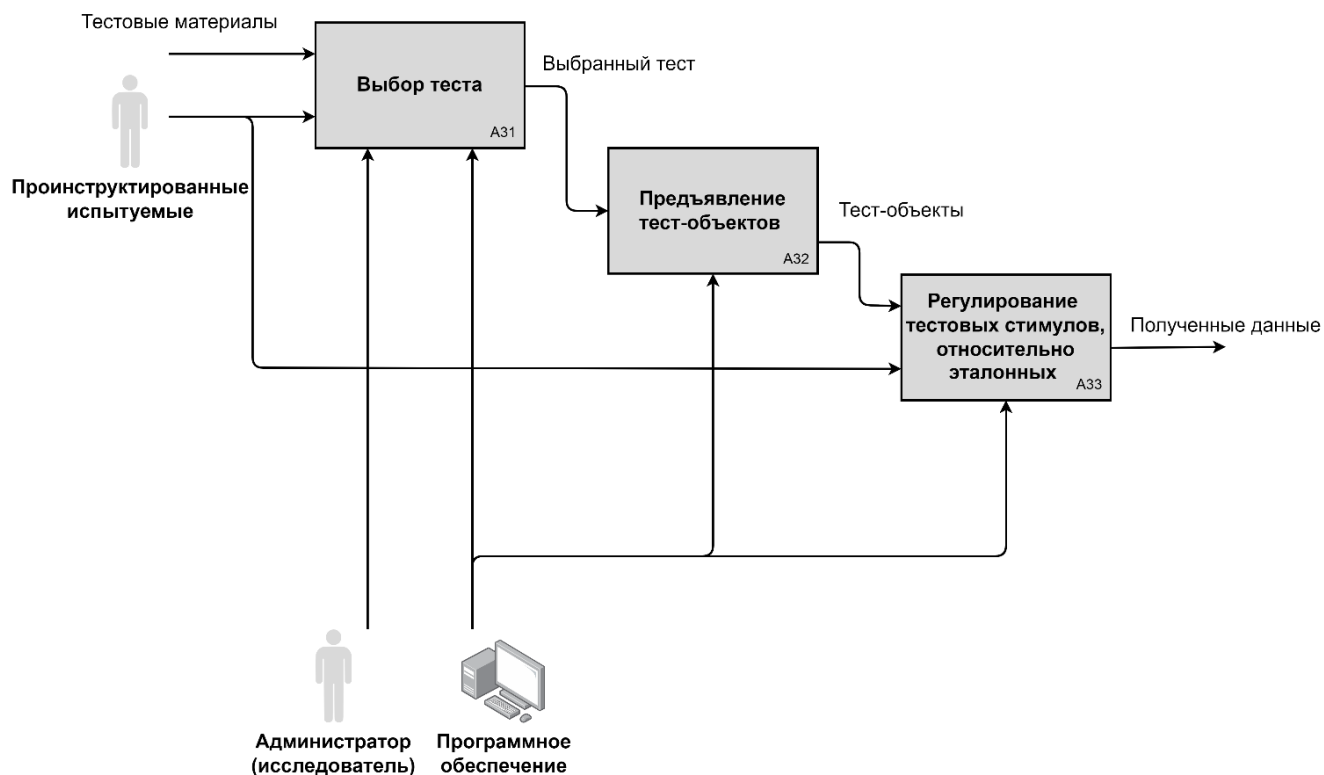


Рис. 4. Этап проведения тестирования

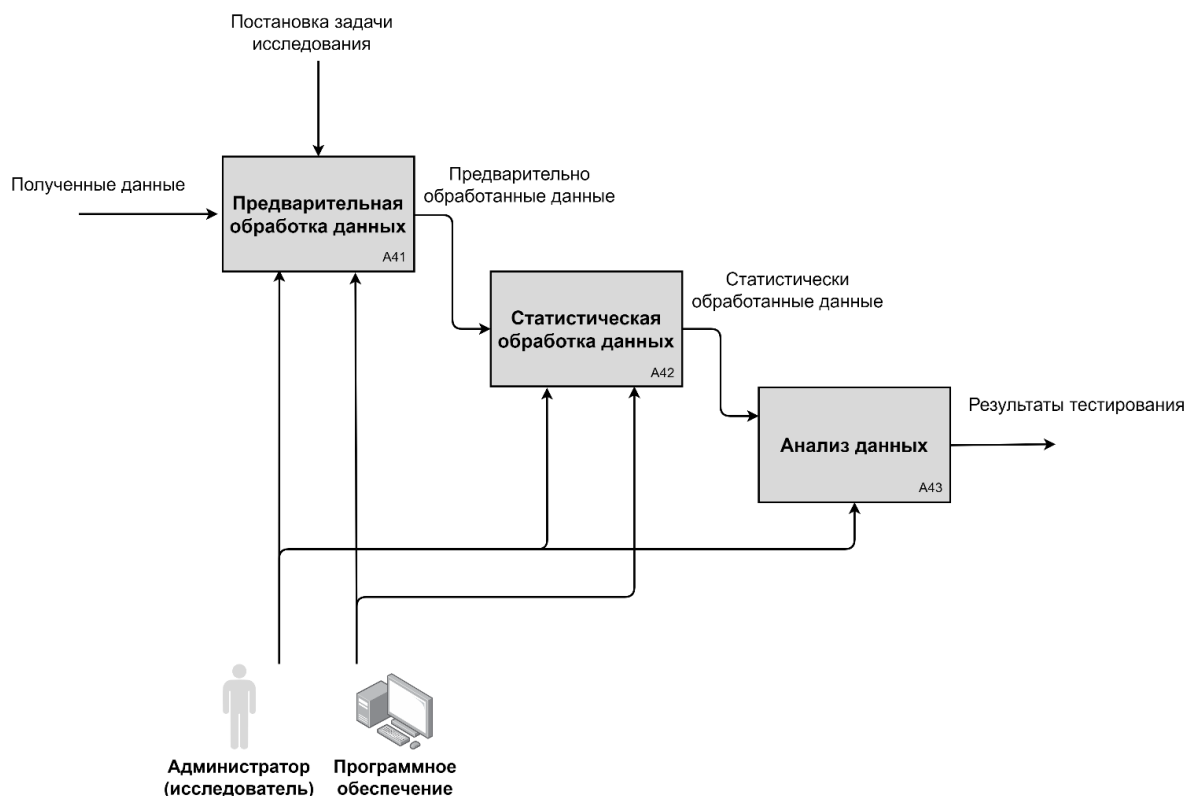


Рис. 5. Обработка и анализ результатов тестирования

В третьей главе предложена автоматизированная система тестирования систематических ошибок зрительного восприятия. На основе описанной методологии тестирования предлагается использование автоматизированной системы, позволяющей осуществлять оценку зрительного восприятия испытуемых в условиях возникновения иллюзий [6].

На Рис. 6 представлена структурная схема автоматизированной системы тестирования систематических ошибок зрительного восприятия. Система тестирования содержит следующие компоненты: 1) платформу, представляющую площадку для расположения испытуемого и его дальнейшего прохождения тестирования; 2) персональный компьютер (ПК), установленный на платформе, включающий клавиатуру для ввода данных, контроллер (компьютерная мышь) и монитор; 3) устройство для монокулярного и бинокулярного тестирования [7], также установленное на платформе. Устройство в виде установки позволяет ограничить видимость предъявляемым тест-объектом.

При этом на схеме изображены основные компоненты, установленные в ПК: жесткий диск для хранения данных, дисплейный адаптер для преобразования получаемой информации в визуальные элементы и процессор.

Кроме аппаратной части, система включает ПО, реализующее следующие функции (Рис. 7):

1. Формирование тест-объектов зрительных иллюзий;
2. Организация процедуры тестирования;
3. Предварительная обработка экспериментальных данных;
4. Статистическая обработка и анализ результатов.

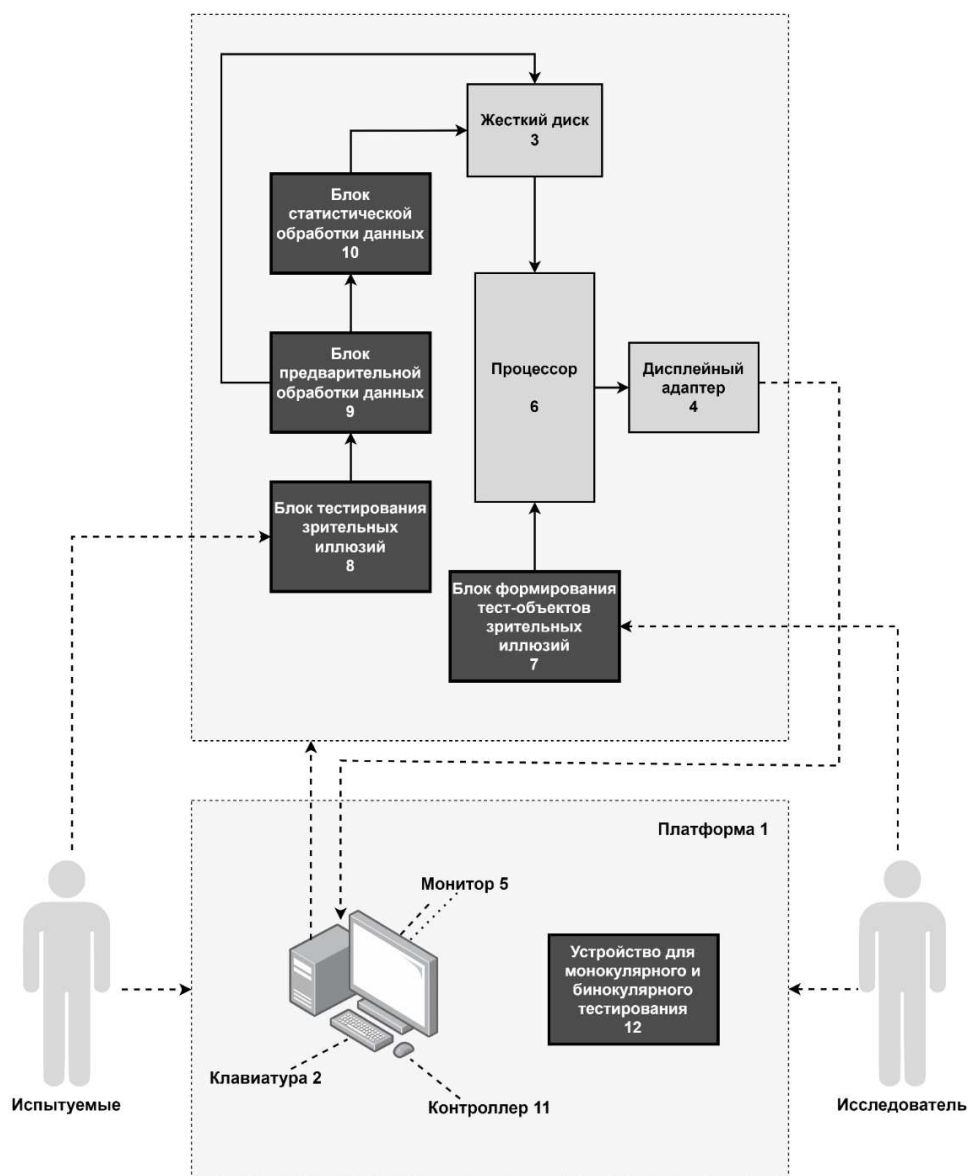


Рис. 6. Автоматизированная система тестирования

Техническим результатом предложенной системы является повышение эффективности тестирования зрительного восприятия испытуемых и сокращение временных затрат исследователя. Данный результат достигается за счет расширения функциональных возможностей системы путем добавления технических и программных средств, позволяющих проводить тестирование зрительного восприятия испытуемых в условиях возникновения иллюзий, и обеспечивает возможность осуществления монокулярного и бинокулярного наблюдения испытуемым в зависимости от задач исследователя.

При этом система позволяет проводить тестирование как индивидуально с каждым испытуемым отдельно на одном ПК, так и с группой испытуемых в специально оборудованных помещениях, заранее подготовленных для тестирования. Для удобства второго типа тестирований разработаны методы и системы, использующие локальную сеть [8].

Система является гибкой и расширяемой, предполагается возможность подключения дополнительных модулей для исследования различного классов иллюзий. В частности, в данной работе используются программные модули на основе

ПО, представленного в работах [9-11]. В дальнейшем также предполагается использование методов разработки геораспределенных систем [5].

Основные результаты третьей главы опубликованы в работах [2, 5, 6-11]

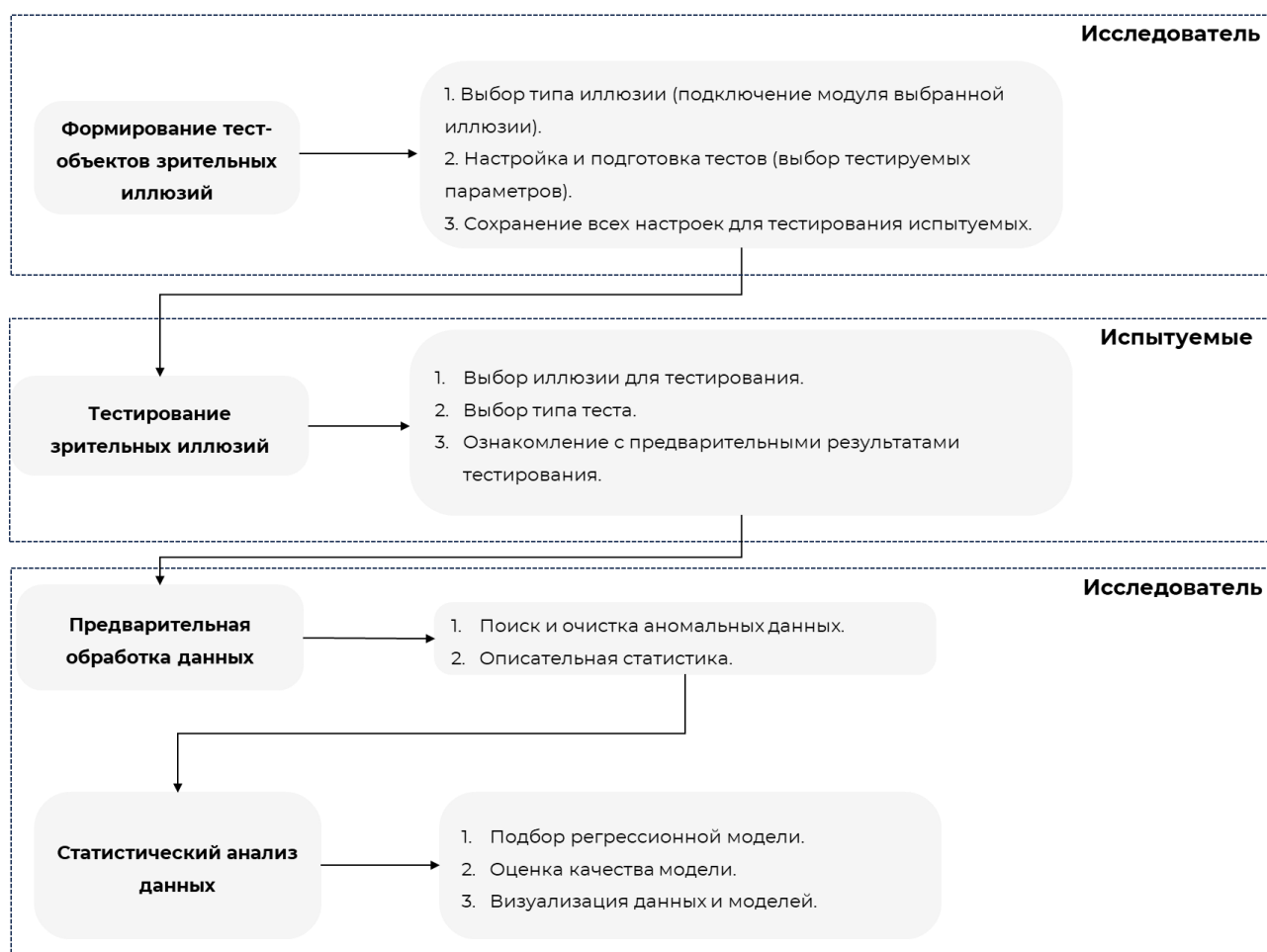


Рис. 7. Программно реализуемые блоки системы тестирования

В четвертой главе на основе предложенной методологии и разработанной системы проведено исследование зрительных иллюзий Поггендорфа, Мюллера-Лайера и Вунда-Фика. На Рис. 8 представлена схема, демонстрирующая эффект зрительной иллюзии пересечения прямой (иллюзии Поггендорфа), проходящей за непрозрачной полосой. Иллюзия проявляется в субъективно неправильном определении коллинеарного продолжения выходного отрезка прямой относительно входного на определенную величину ΔL .

Значение $L_{\text{реф}}$ – расстояние между входной точкой прямой, примыкающей к полосе, и выходной точки, являющейся коллинеарным продолжением прямой, выходящей за полосу. Значение $L_{\text{тест}}$ – расстояние между входной точкой прямой, примыкающей к полосе, и выходной точки, субъективно смещенной относительно коллинеарности прямой. При этом ошибка смещения ΔL определяется следующим выражением:

$$\Delta L = L_{\text{реф}} - L_{\text{тест}}.$$

Известно, что иллюзия Поггендорфа зависит от геометрических параметров ширины W полосы и угла α наклона прямой. При этом иллюзия наиболее сильно

проявляется при предъявлении тест-объекта в горизонтальном и вертикальном положении полосы. Однако необходимо понять, является ли ошибка смещения статистически значимой при любой конфигурации поворота тест-объекта (Рис. 9) и какие модели наиболее точно описывают зависимости иллюзии от геометрических параметров тест-объекта.

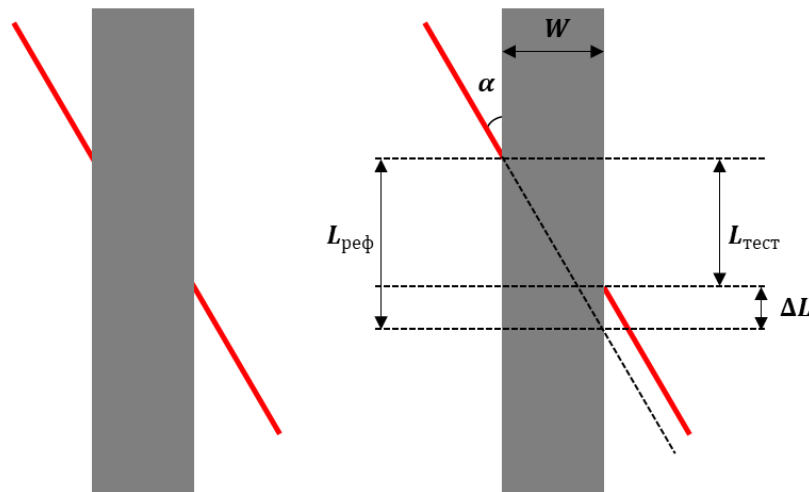


Рис. 8. Схема зрительной иллюзии пересечения (иллюзии Поггендорфа)

Таким образом, общая структура постановки задачи исследования иллюзии Поггендорфа заключается в определении статистической зависимости ΔL от параметров W , α и φ .

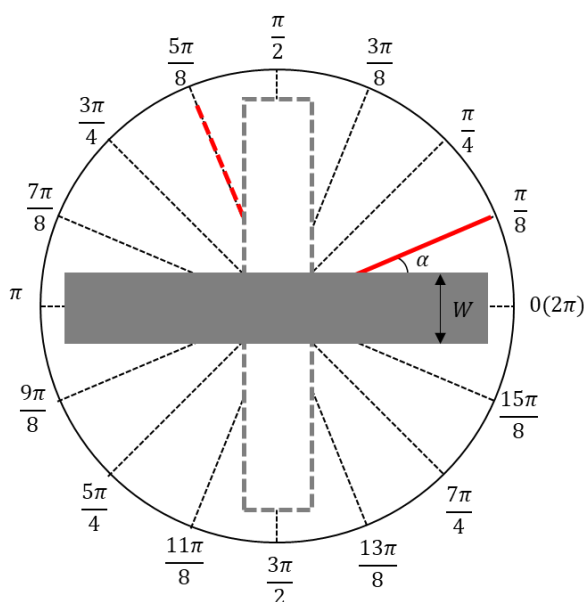


Рис. 9. Диапазон вариаций угла поворота φ для иллюзии Поггендорфа

Для демонстрации эффекта иллюзии Мюллера-Лайера выбраны относительно простые геометрические фигуры – окружности (Рис. 10). Иллюзия проявляется в неправильной оценке расстояния $S_{\text{реф}}$ между внешними краями первой и второй окружности относительно расстояния $S_{\text{тест}}$ между внутренними краями второй и третьей окружности. Ошибка расстояния ΔS определяется следующим выражением:

$$\Delta S = S_{\text{реф}} - S_{\text{тест}} ,$$

где $S_{\text{тест}}$ определяется в экспериментах путем перемещения правой окружности испытуемым.

Предметом исследования данной иллюзии является зависимость ошибки расстояния ΔS от геометрических параметров G . Референтное расстояние $S_{\text{реф}}$ и диаметр окружностей D являются основными геометрическими параметрами, оказывающими влияние на величину зрительной иллюзии.

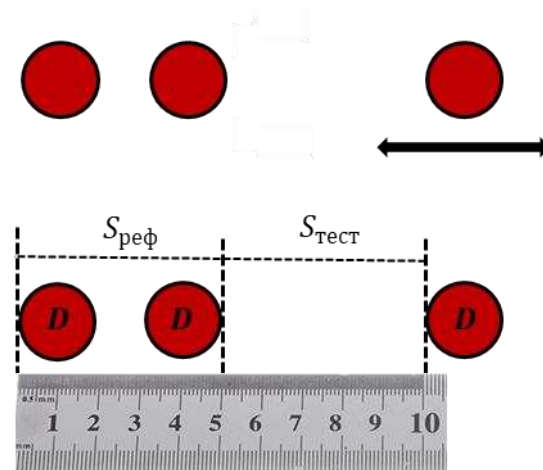


Рис. 10. Иллюзия расстояния между краями окружностей (иллюзия Мюллера-Лайера)

Также для проверки гипотезы о существовании ошибок расстояния ΔS при любых конфигурациях тест-объекта необходимо исследовать влияние ориентационных характеристик на иллюзию.

Таким образом, общая структура постановки задачи исследования иллюзии Мюллера-Лайера заключается в определении статистической зависимости ΔS от параметров $S_{\text{реф}}$, D и φ .

Вертикально-горизонтальная иллюзия (иллюзия Вунда-Фика) проявляется в субъективно неверной интерпретации длины вертикального отрезка, относительно горизонтального такой же длины (Рис. 11). При попытках уравнять длину $l_{\text{верт}}$ вертикального отрезка с длиной $l_{\text{гор}}$ горизонтального возникает систематическая ошибка Δl , представляющая разницу между длиной отрезков:

$$\Delta l = l_{\text{гор}} - l_{\text{верт}} ,$$

где $l_{\text{верт}}$ является значением регулируемого испытуемым отрезка.

В контексте данной иллюзии исследуется влияние геометрических параметров G на величину ошибки Δl , связанной с искажённой оценкой вертикальной линии. В качестве таких параметров рассматриваются: местоположение P вертикальной линии, относительно горизонтальной; угол наклона α вертикальной линии.

Аналогично рассмотренным выше иллюзиям осуществляется проверка гипотезы о существовании ошибок длины Δl при любых конфигурациях угла φ поворота тест-объекта.

Таким образом, общая структура постановки задачи исследования иллюзии Вунда-Фика заключается в определении статистической зависимости Δl от параметров P , α и φ .

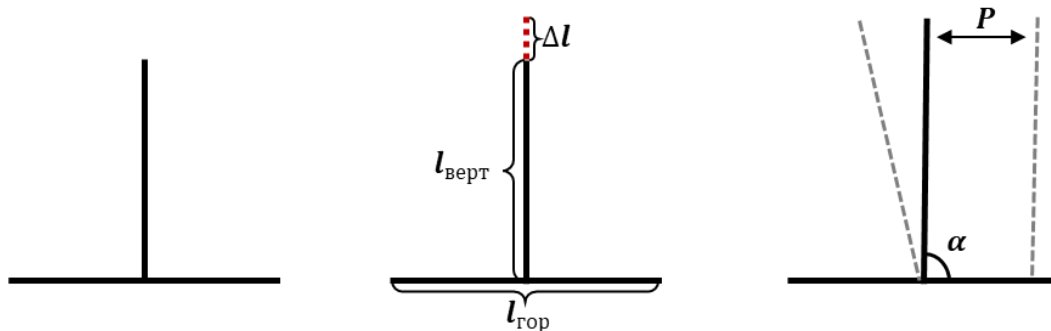


Рис. 11. Схема ошибки, возникающей при переоценке вертикальной линии, относительно горизонтальной (иллюзия Вунда-Фика)

Основные гипотезы исследования. Для каждой представленной иллюзии осуществляется проверка статистических гипотез о значимости моделей их зависимостей от геометрических параметров G . Также для выявления взаимосвязи ориентационных характеристик зрительного восприятия выдвинуты общие для всех геометрических иллюзий гипотезы:

- 1) H_1 : геометрические иллюзии возникают при любом ориентационном положении тест-объекта;
- 2) H_2 : геометрические иллюзии зависят от угла φ поворота тест-объекта, данная зависимость имеет тригонометрический характер.

Разработка тестовых материалов и измерительная процедура. При проведении экспериментов (тестирований) с иллюзией Поггендорфа испытуемым предъявляются тест-объекты с определенными параметрами ширины W полосы, угла α наклона входного отрезка прямой и угла φ поворота всей тестовой конструкции. При этом выходной отрезок заранее располагается выше линии коллинеарного продолжения входного отрезка. Испытуемый перемещает выходной отрезок до тех пор, пока для его субъективного восприятия входной и выходной отрезки не станут фрагментами одной прямой.

Для первой серии тестирования зрительного восприятия на величину ошибок смещения ΔL сформированы 15 тест-объектов: 1) 6 тест-объектов с изменяющимися параметрами W при фиксированных параметрах $\alpha = \pi/4$ и $\varphi = \pi/2$; 2) 9 тест-объектов с изменяющимися параметрами α при фиксированных параметрах $W = 20$ мм и $\varphi = \pi/2$.

Для второй серии тестирования, направленной на определение статистической зависимости ошибки смещения ΔL от угла φ поворота всей тестовой конструкции, сформировано 16 тест-объектов с изменяющимися параметрами φ . Значение углов поворота φ варьируется в диапазоне $[0; 2\pi]$ с шагом $\pi/8$ при фиксированных параметрах $\alpha = [\pi/2; \pi/4; \pi/6]$ и $W = 20$ мм.

При проведении экспериментов с иллюзией Мюллера-Лайера испытуемым предъявляются тест-объекты с определенными параметрами референтного расстояния $S_{\text{реф}}$ между внешними краями первых двух окружностей, диаметра D окружностей и угла φ поворота всей тестовой конструкции. При предъявлении тест-объекта расстояние $S_{\text{тест}}$ значительно превышает референтное $S_{\text{реф}}$. Испытуемый перемещает третью окружность до тех пор, пока его субъективное восприятие референтного и тестового расстояния не станет одинаковым.

Для первой серии тестирования зрительного восприятия на величину ошибок расстояния ΔS сформированы 12 тест-объектов: 1) 7 тест-объектов с изменяющимися параметрами $S_{\text{реф}}$ при фиксированном параметре $D = 10$ мм и $\varphi = \pi/2$; 2) 5 тест-объектов с изменяющимися параметрами D при фиксированном параметре $S_{\text{реф}} = 35$ мм и $\varphi = \pi/2$.

Для второй серии тестирования, направленной на определение статистической зависимости ошибки расстояния ΔS от угла φ поворота всей тестовой конструкции, сформировано 16 тест-объектов с изменяющимися параметрами φ . Значение углов поворота φ варьируется в диапазоне $[0; 2\pi]$ с шагом $\pi/8$ при фиксированных параметрах $S_{\text{реф}} = 35$ мм и $D = 10$ мм.

При проведении экспериментов с иллюзией Вунда-Фика испытуемым на экране монитора предъявляются тест-объекты с определенными параметрами местоположения P вертикальной линии, угла α наклона вертикальной линии и угла φ поворота всей тестовой конструкции. При предъявлении тест-объектов на экране монитора, регулируемый отрезок значительно меньше горизонтального. Испытуемый настраивает длину тестового отрезка до субъективного равенства с референтным отрезком.

Для первой серии тестирования зрительного восприятия на величину ошибок длины Δl сформированы 12 тест-объектов: 1) 5 тест-объектов с изменяющимся параметром местоположения P вертикальной линии при фиксированных параметрах $\alpha = \pi/2$, $\varphi = \pi/2$; 2) 7 тест-объектов с изменяющимся параметром угла вертикальной линии: $\alpha = \pi/2$ при фиксированных параметрах $P = 0$, $\varphi = \pi/2$.

Для второй серии тестирования, направленного на определение статистической зависимости ошибки длины Δl от угла φ поворота всей тестовой конструкции, сформировано 16 тест-объектов с изменяющимися параметрами φ . Значение углов поворота φ варьируется в диапазоне $[0; 2\pi]$ с шагом $\pi/8$ при фиксированных параметрах $\alpha = \pi/2$, $P = 0$.

Характеристика испытуемых. В процессе исследования выборка испытуемых составила 272 человека (131 мужчина, 141 женщина): 1) для исследования иллюзии Поггендорфа протестировано 107 испытуемых (59 мужчин, 48 женщин); 2) для исследования иллюзии Мюллера-Лайера протестировано 85 испытуемых (40 мужчин, 45 женщин); 3) для исследования иллюзии Вунда-Фика протестировано 80 испытуемых (32 мужчины, 48 женщин).

Пол и возраст не являлись целевыми факторами анализа, так как цель исследования – выявление статистической зависимости иллюзии от геометрических параметров тест-объектов. В связи с этим для получения репрезентативной выборки процентное соотношение мужчин (48.16%) и женщин (51.84%) было приближено к равному, при этом возраст испытуемых варьировался от 18 до 55 лет для тестирований по иллюзии Поггендорфа и от 18 до 28 лет для иллюзий Мюллера-Лайера и Вунда-Фика. Эксперименты в форме тестирования проводились за персональным компьютером в естественных условиях, бинокулярно. В процессе тестирования испытуемый принимал наиболее комфортное положение для работы за персональным компьютером.

Статистическая обработка и анализ данных. Обработка первичных данных осуществляется системой тестирования автоматически и представляет усреднение экспериментальных значений ΔI_i по n пробам ($n = 5$) выполнения одного и того же задания в одинаковых условиях для каждого испытуемого, т.е. параметры тест-объектов в рамках одного типа теста повторялись на протяжении всего эксперимента. При этом на данной стадии осуществляется поиск заведомо ошибочных значений ΔI и их замена, согласно статистическим стандартам, на средние по соседним значениям:

$$\Delta I_i = \frac{\Delta I_{i-1} + \Delta I_{i+1}}{2}.$$

Далее осуществляется поиск средних ошибок $\overline{\Delta I}$ и стандартных отклонений σ от среднего по всей выборке испытуемых согласно каждому типу теста:

$$\overline{\Delta I} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta I_i, \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta I_i - \overline{\Delta I})^2}.$$

Полученные данные сортируются и формируются в табличном формате для дальнейшей обработки и анализа. Таким образом, по результатам проведения статистической обработки данных конечными значениями для анализа являются зависимая переменная $\overline{\Delta I}$ (исследуемый процесс), изменяющаяся под влиянием независимого параметра G (фактор, регрессор).

Для описания полученных данных тестирований использовались методы корреляционно-регрессионного анализа данных. Аппроксимация статистических зависимостей и поиск коэффициентов уравнений регрессий осуществлялись методом наименьших квадратов:

$$\sum_{i=1}^n (\overline{\Delta I}_i - f(G_i, \theta))^2 \rightarrow \min,$$

где $\overline{\Delta I}_i$ – экспериментальные значения, полученные при тестировании, $f(G, \theta)$ – аппроксимирующая функция с параметрами $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$, $f(G_i, \theta)$ – модельные (расчетные значения).

Для оценки силы и направления линейной связи применяется линейный коэффициент корреляции Пирсона:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})(\overline{\Delta I}_i - \overline{\overline{\Delta I}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\overline{\Delta I}_i - \overline{\overline{\Delta I}})^2}},$$

где

$$\bar{G} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_i, \quad \overline{\overline{\Delta I}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \overline{\Delta I}_i.$$

Для оценки силы нелинейных связей используется индекс корреляции R , определяемый как

$$R = \sqrt{1 - \frac{SS_e}{SS}} = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{\Delta L}_i - f(G_i, \theta))^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{\Delta L}_i - \bar{\bar{\Delta L}})^2}}.$$

Также на основе F -критерия Фишера выполняется проверка статистической гипотезы о значимости уравнения регрессии. Эмпирическое значение критерия определяется формулой:

$$F_{\text{эмп}} = \frac{R^2}{1 - R^2} \frac{(n - m - 1)}{m},$$

где R^2 – коэффициент детерминации, n – количество наблюдений, m – количество параметров при переменной G .

Критическое значение $F_{\text{крит}}$ задается по известным статистическим таблицам, где k_1 – число независимых переменных в уравнении, а $k_2 = n - m - 1$ представляет разницу наблюдений и количества оцениваемых параметров в модели.

Результаты тестирования. На Рис. 12-14 представлены результаты исследования иллюзии Поггендорфа. Зависимость $\bar{\Delta L}$ от W описывается линейным уравнением вида (Рис. 12а):

$$\bar{\Delta L} = 0.39W + 0.05.$$

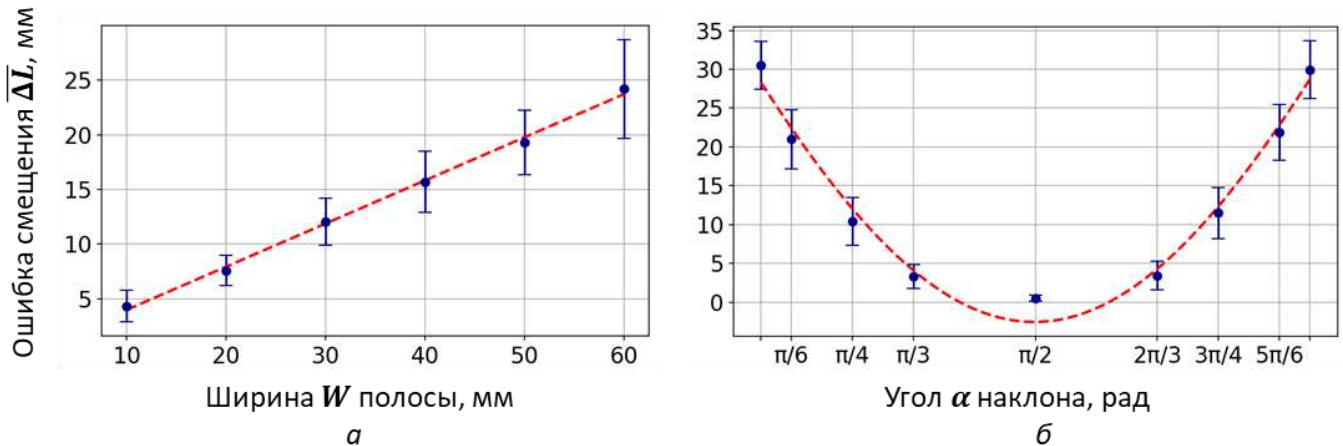


Рис. 12. Зависимость ошибки смещения $\bar{\Delta L}$ от:
а) ширины W полосы; б) угла α наклона входного отрезка

Рассчитанный коэффициент корреляции $r = 0.9986$ свидетельствует о практически функциональной связи между $\bar{\Delta L}$ и W . Ошибка смещения $\bar{\Delta L}$ прямо пропорционально зависит от W : увеличение ширины полосы приводит к росту величины ошибки смещения. Коэффициент детерминации $R^2 = 0.9973$ указывает на то, что $\bar{\Delta L}$ на 99.73% зависит от W . Проверка статистической гипотезы о значимости полученного уравнения по F -критерию Фишера свидетельствует об адекватности построенной модели регрессии: $F_{\text{эмп}} = 1477.48 > F_{\text{крит}} = 21.20$ (при $\alpha = 0.01$, $k_1 = 1$, $k_2 = 4$).

Зависимость $\overline{\Delta L}$ от α демонстрирует нелинейный характер поведения иллюзии и описывается следующим тригонометрическим уравнением (Рис. 12б):

$$\overline{\Delta L} = 50.30 \sin(\alpha + 9.42) + 47.77.$$

Построенная модель зависимости на 97.79% объясняется изменением угла α ($R^2 = 0.9779$, $R = 0.9889$), т.е. $\overline{\Delta L}$ возрастает при увеличении остроты угла наклона прямой: чем острее угол α относительно полосы, тем «ярче» выражена ошибка смещения $\overline{\Delta L}$. Уравнение, описывающее зависимость $\overline{\Delta L}$ статистически значимо: $F_{\text{эмп}} = 309.74 > F_{\text{крит}} = 12.25$ (при $\alpha = 0.01$, $k_1 = 1$, $k_2 = 7$).

На Рис. 13 отображена зависимость $\overline{\Delta L}$ от φ при различных углах α наклона линии. Приведённые результаты показывают, что $\overline{\Delta L}$ существенно зависит φ . Данная зависимость демонстрирует $\pi/2$ -периодику, где ярко выражены экстремумы величины ошибки (4 max и 4 min).

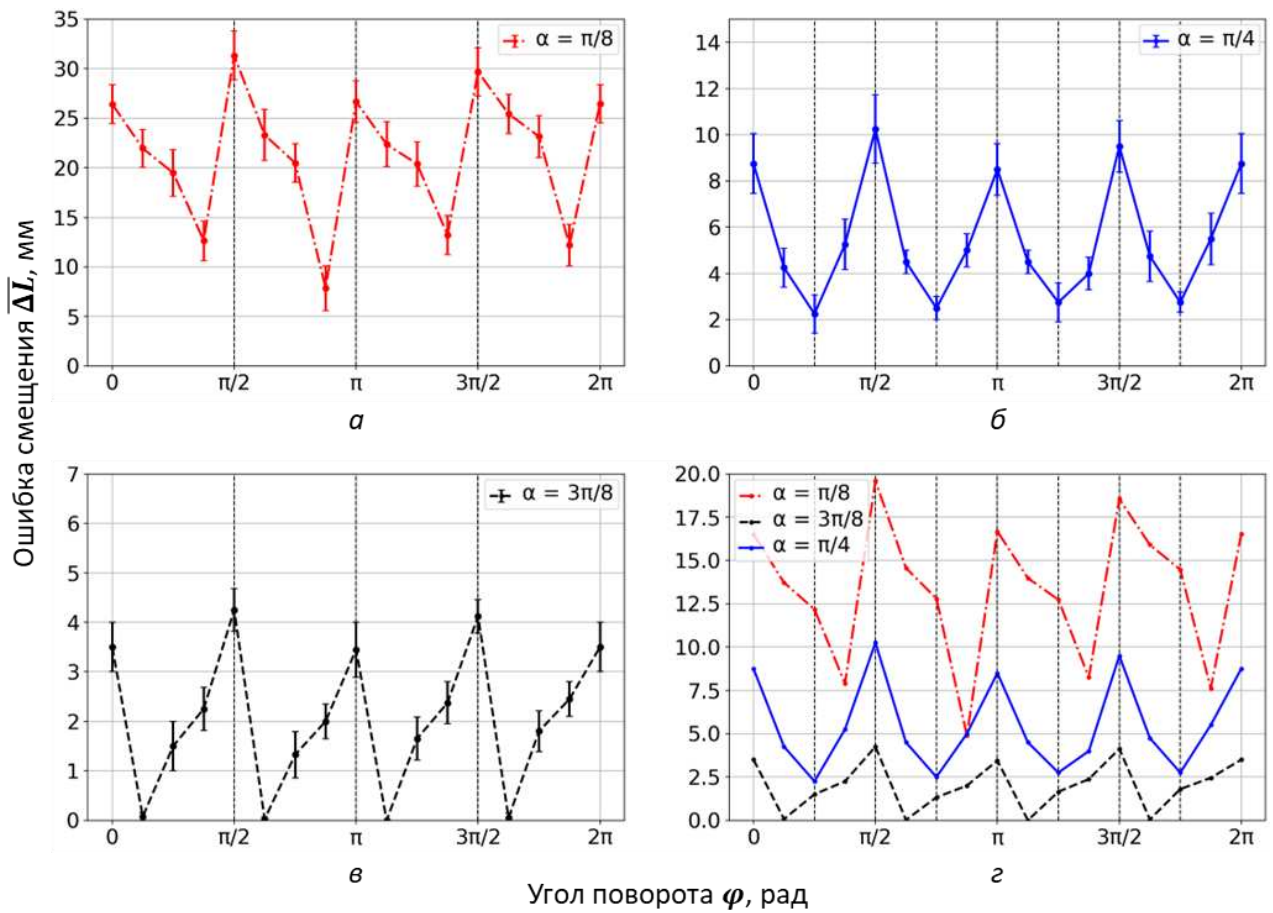


Рис. 13. Зависимости ошибки смещения $\overline{\Delta L}$ от угла φ поворота тест-объекта при различных α : а) $\alpha = \pi/8$; б) $\alpha = \pi/4$; в) $\alpha = 3\pi/8$; г) $\alpha = [\pi/8; \pi/4; 3\pi/8]$

Периодика $\overline{\Delta L}$ наблюдается в диапазоне $[0; \pi/2]$, т.е. в соответствии с угловыми четвертями координатной плоскости. Точки максимумов фиксируются на границах этих периодов, когда поворот тест-объекта достигает значения φ , при котором полоса принимает горизонтальное и вертикальное положение. При этом в вертикальном положении полосы $\overline{\Delta L}$ выше, чем в горизонтальном. Внутри каждого периода фиксируется также точка минимума, характеризующая ситуацию, когда

горизонтальное и вертикальное положение принимает прямая. Поэтому, в отличие от максимумов, минимумы иллюзии меняют своё положение в зависимости от заданного значения угла α между прямой и полосой.

При этом зависимость $\overline{\Delta L}$ от φ при среднем значении параметре $\alpha = \pi/4$ описывается следующим тригонометрическим уравнением (Рис. 14):

$$\overline{\Delta L} = 3.37 \sin(3.96\varphi + 1.75) + 5.34.$$

Индексы $R = 0.9594$ и $R^2 = 0.9205$ свидетельствуют об адекватности построенной регрессионной модели. Статистическая значимость уравнения также подтверждается F -критерием:

$$F_{\text{эмп}} = 173.68 > F_{\text{крит}} = 8.68 \text{ (при } \alpha = 0.01, k_1 = 1, k_2 = 15 \text{)}.$$

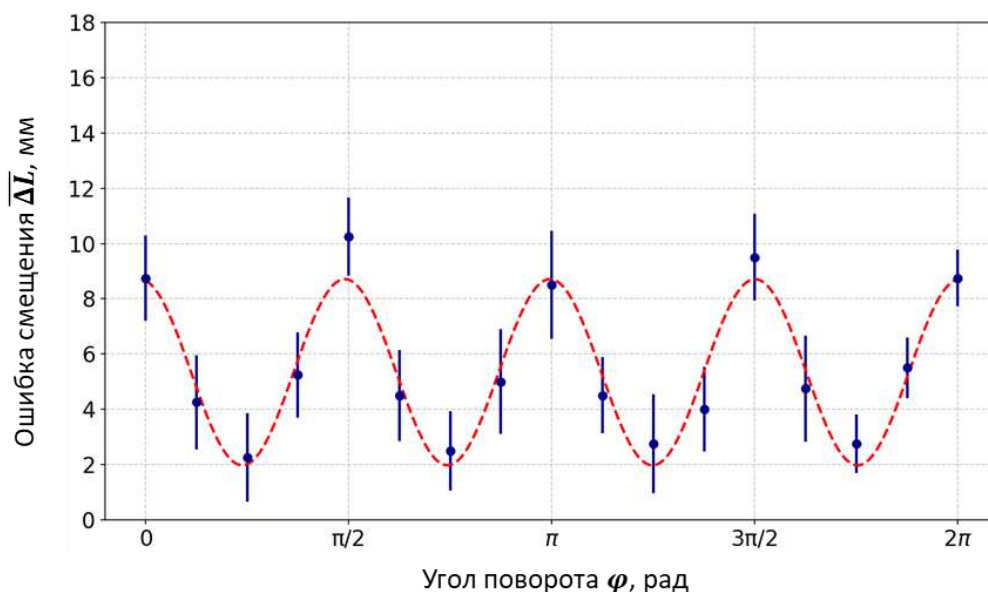


Рис. 14. Тригонометрическая регрессионная модель зависимости ошибки смещения $\overline{\Delta L}$ от угла поворота φ тест-объекта

На Рис. 15 и 16 представлены результаты тестирований иллюзии расстояния между краями окружностей. При увеличении $S_{\text{реф}}$ между внешними краями первых двух окружностей ошибка $\overline{\Delta S}$ возрастает до определенного значения, после чего значения $\overline{\Delta S}$ статистически не отличаются друг от друга, данная зависимость хорошо аппроксимируется сигмоидой (Рис. 15а):

$$\overline{\Delta S} = \frac{12.27}{1 + e^{-0.18(S_{\text{реф}} - 26.36)}}.$$

Полученная модель также является статистически значимой на уровне значимости 0.01 критерия Фишера: $F_{\text{эмп}} = 96.16 > F_{\text{крит}} = 16.26$. Данная зависимость на 95.06% обусловлена влиянием расстояния $S_{\text{реф}}$ ($R^2 = 0.9506$).

Зависимость $\overline{\Delta S}$ от параметра D имеет прямую пропорциональную зависимость линейного вида (Рис. 15б):

$$\overline{\Delta S} = 1.29D - 5.28.$$

Линейная связь достаточно убедительная и на 96.47% объясняется изменением диаметра окружностей ($R^2 = 0.9647$), при этом $F_{\text{эмп}} = 81.90 > F_{\text{крит}} = 34.12$ (при $\alpha = 0.01, k_1 = 1, k_2 = 3$), что показывает значимость модели.

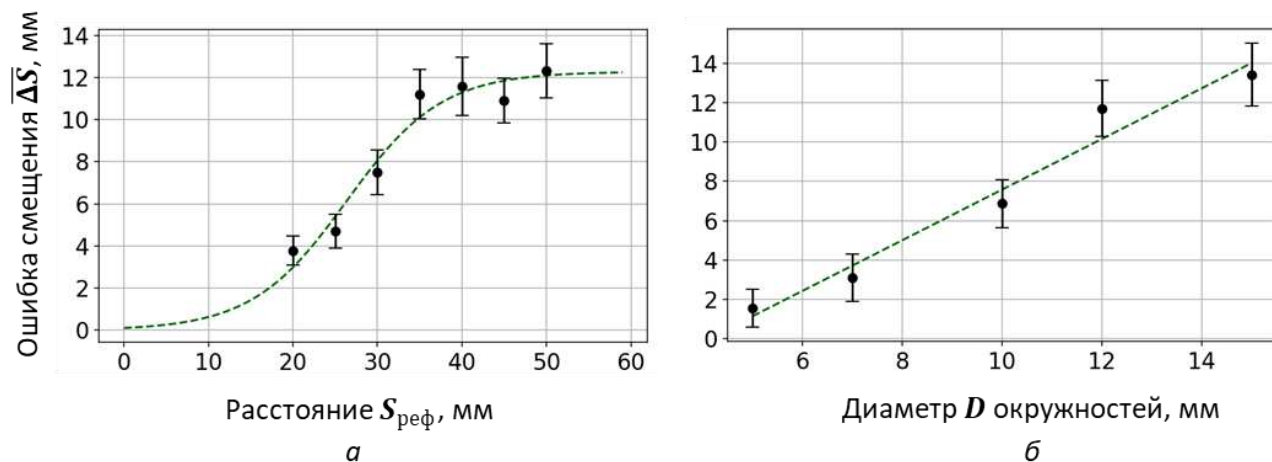


Рис. 15. Зависимость ошибки расстояния $\overline{\Delta S}$ от:
а) расстояния $S_{\text{реф}}$; б) диаметра D окружностей

Результаты второй серии тестирования также свидетельствуют о тригонометрической зависимости ошибки расстояния $\overline{\Delta S}$ от угла φ поворота тест-объекта иллюзии Мюллера-Лайера (Рис. 16). Данная зависимость описывается синусоидой:

$$\overline{\Delta S} = 1.703 \sin(4.030\varphi + 1.571) + 8.893.$$

Построенная модель зависимости на 82.96% объясняется изменением угла φ ($R^2 = 0.8296$). Статистическая значимость уравнения подтверждается F -критерием: $F_{\text{эмп}} = 73.05 > F_{\text{крит}} = 8.68$ (при $\alpha = 0.01, k_1 = 1, k_2 = 15$).

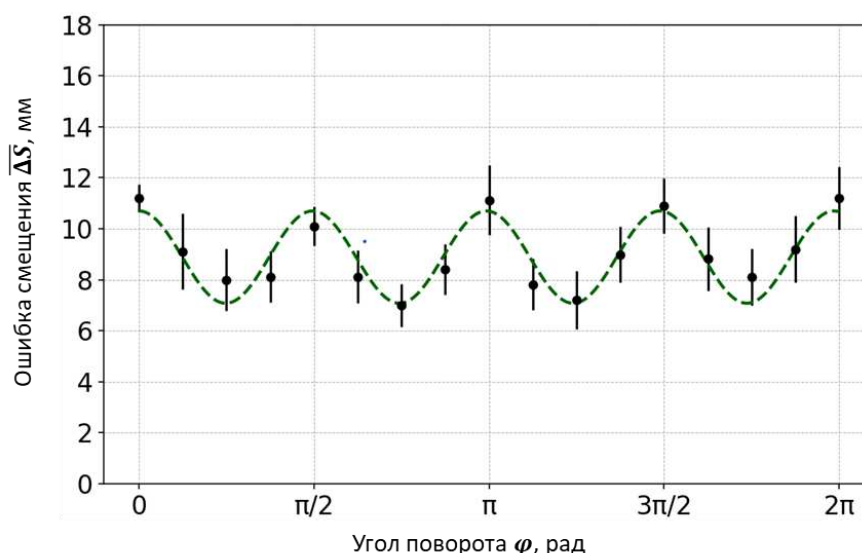


Рис. 16. Тригонометрическая регрессионная модель зависимости ошибки смещения $\overline{\Delta S}$ от угла поворота φ тест-объекта.

Результаты тестирования вертикально-горизонтальной иллюзии также подтверждают влияние геометрических параметров на величину ошибок $\overline{\Delta l}$. На Рис. 17а представлен график зависимости ошибки $\overline{\Delta l}$ от местоположения P

вертикальной линии относительно горизонтальной. Настоящий результат свидетельствует о нелинейной зависимости иллюзии и описывается квадратичным уравнением следующего вида:

$$\overline{\Delta l} = -0.0095P^2 - 0.02P + 14.1971.$$

Ошибка $\overline{\Delta l}$ уменьшается при перемещении к краям вертикального отрезка, т.е. по мере приближения вертикального отрезка к центру горизонтальной линия воспринимается как более длинная, что увеличивает иллюзию, нелинейная связь между ошибкой $\overline{\Delta l}$ местоположения P вертикальной линии подтверждается высоким коэффициентом детерминации $R^2 = 0.908$. При этом $F_{\text{эмп}} = 29.46 > F_{\text{крит}} = 10.13$ (при $\alpha = 0.01, k_1 = 1, k_2 = 3$), что подтверждает значимость модели.

На Рис. 17б приведен график зависимости ошибки $\overline{\Delta l}$ от угла наклона α вертикальной линии относительно горизонтальной. Полученный результат свидетельствует о нелинейной зависимости иллюзии и описывается тригонометрическим уравнением:

$$\overline{\Delta l} = 1.41\sin(-2.60\alpha + 8.44) + 16.71.$$

Ошибка $\overline{\Delta l}$ увеличивается при отклонении α от вертикального положения, т.е. при отклонении угла наклона от $\pi/2$ иллюзия увеличивается, нелинейная связь между ошибкой $\overline{\Delta l}$ и углом наклона α вертикальной линии подтверждается высоким коэффициентом детерминации $R^2 = 0.9729$. Проверка статистической гипотезы о значимости найденного уравнения по F -критерию Фишера также свидетельствует об адекватности построенной модели: $F_{\text{эмп}} = 179.76 > F_{\text{крит}} = 16.26$ (при $\alpha = 0.01, k_1 = 1, k_2 = 5$).

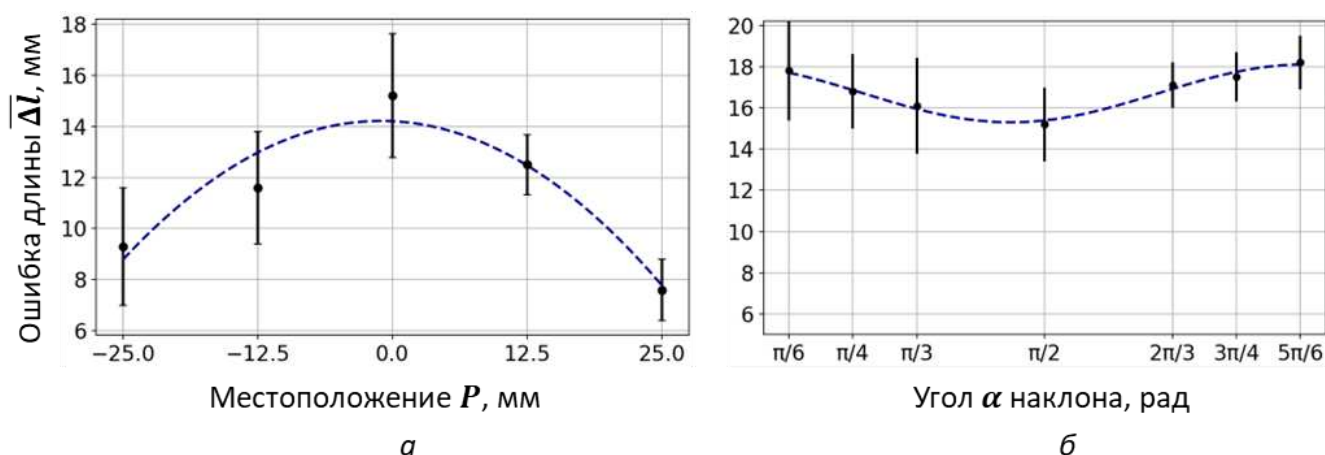


Рис. 17. Зависимость ошибки длины $\overline{\Delta l}$ от:
а) местоположения P ; б) угла α наклона вертикали

Результаты второй серии тестирования также подтверждают выдвинутые гипотезы о тригонометрической зависимости геометрической иллюзии от угла поворота тест-объекта (Рис. 18).

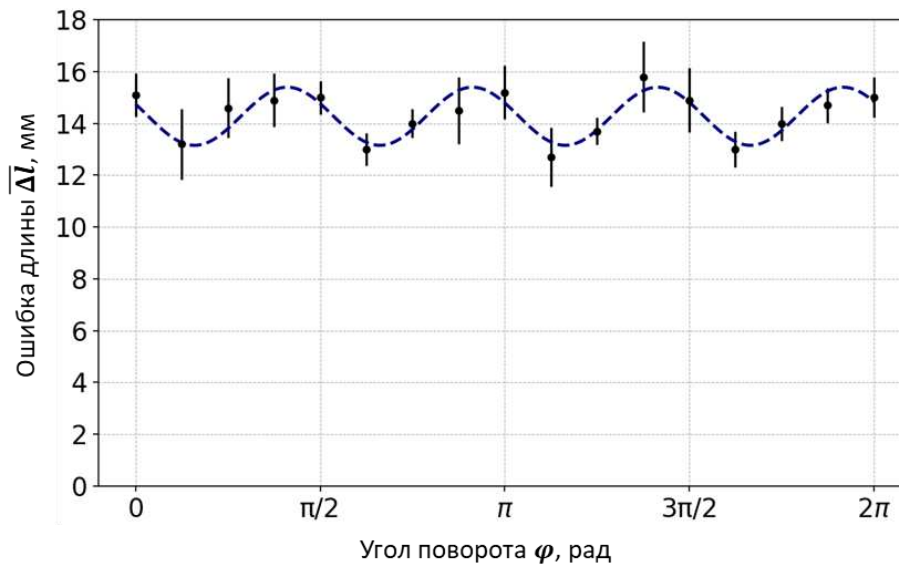


Рис. 18. Тригонометрическая регрессионная модель зависимости ошибки длины $\overline{\Delta l}$ от угла поворота φ тест-объекта

Зависимость ошибки длины $\overline{\Delta l}$ от φ описывается следующим тригонометрическим уравнением:

$$\overline{\Delta l} = 1.121 \sin(3.984\varphi - 3.570) + 14.275.$$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0.7761$ свидетельствует об адекватности построенной регрессионной модели. Статистическая значимость уравнения также подтверждается F -критерием:

$$F_{\text{эмп}} = 52.00 > F_{\text{крит}} = 8.68 \text{ (при } \alpha = 0.01, k_1 = 1, k_2 = 15\text{)}.$$

Общие закономерности. Проведённое исследование подтвердило влияние ориентационного фактора в формировании систематических ошибок зрительного восприятия при предъявлении геометрических иллюзий. Для всех трёх типов иллюзий выявлена статистически значимая зависимость величины ошибки $\overline{\Delta l}$ от угла поворота φ тест-объекта в плоскости экрана (Рис. 19).

В каждом случае зависимость ошибки от угла φ оказалась тригонометрической по своей природе, что проявилось в виде периодических колебаний с характерной $\pi/2$ -периодичностью. Такие колебания сопровождаются чередованием максимумов и минимумов ошибок, что указывает на фазовую чувствительность зрительной системы к положению тест-объекта в пространстве. Экстремумы выражены при горизонтальном и вертикальном положении ключевых элементов иллюзии, что обусловлено особенностями ориентировочной организации поля зрения.

На основании полученных данных были подтверждены две исходные гипотезы исследования:

1) **H₁:** Геометрические иллюзии возникают при любом ориентационном положении тест-объекта. Это указывает на устойчивость феномена зрительных искажений независимо от поворота стимула;

2) **H₂:** Геометрические иллюзии зависят от угла поворота, причём характер зависимости имеет тригонометрическую форму. Это свидетельствует о

систематическом влиянии ориентации объекта на процессы визуального анализа пространственных отношений.

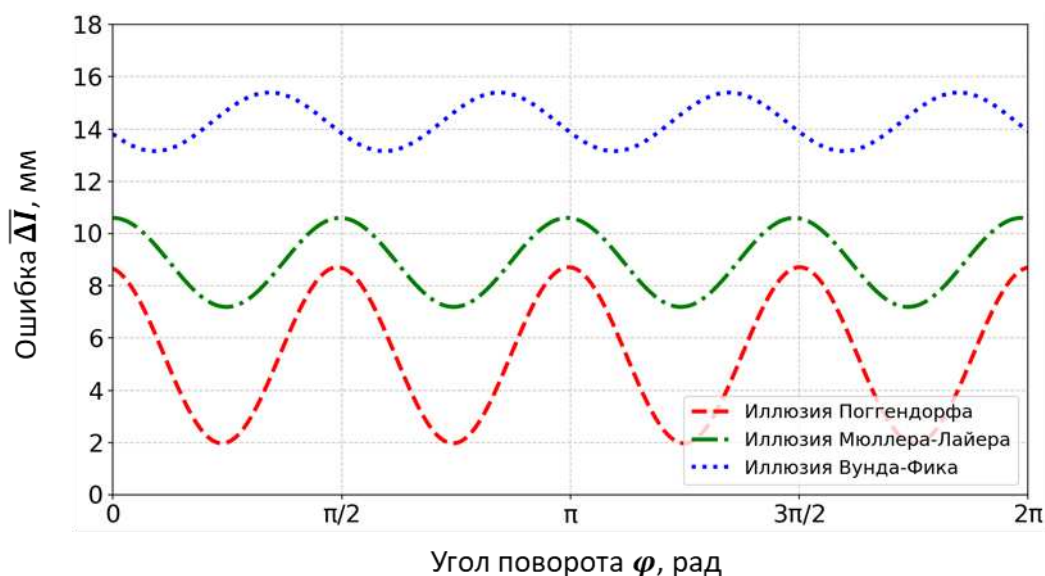


Рис. 19. Общий график зависимостей величин ошибок ΔI в трёх типах иллюзий от угла φ поворота тест-объектов.

Таким образом, ориентационные характеристики зрительных стимулов представляют собой универсальный модифицирующий фактор, влияющий на величину систематических зрительных искажений, и должны учитываться при моделировании, диагностике и прогнозировании зрительного восприятия.

Основные результаты четвертой главы опубликованы в работах [1-4, 12-16].

В заключении представлены **основные результаты и выводы диссертационного исследования:**

1. Процесс тестирования систематических ошибок зрительного восприятия представлен как информационный процесс, основанный на формализованных методах функционального моделирования систем и процессов.

2. Предложена универсальная методология проведения тестирования. В рамках данной методологии разработаны и описаны алгоритмы взаимодействия участников процесса с системой.

3. Спроектирована автоматизированная система тестирования для исследования различных иллюзий в рамках единой методики. Система позволяет проводить эксперименты как индивидуально с каждым испытуемым, так и с большой группой одновременно. Система также автоматизирует сбор и обработку данных, формируя полученные данные в удобный для исследователей вид.

4. Работа системы подтверждена проведением исследования иллюзий Поггендорфа, Мюллера-Лайера и Вунда-Фика. Разработаны модули тестирования данных иллюзий, исследованы и описаны характеры зависимостей иллюзий от геометрических признаков, которые не противоречат существующим исследованиям, получены и обоснованы новые регрессионные модели зависимостей.

5. Проведены исследования новой модификации геометрических иллюзий Поггендорфа, Мюллера-Лайера и Вунда-Фика в условиях вращения всей тестовой

конструкции. Получены статистические зависимости величины данных иллюзий от угла поворота тест-объектов.

6. На основе полученных результатов выдвинуты и подтверждены гипотезы о тригонометрическом характере зависимостей геометрических иллюзий от ориентации тест-объекта: геометрические иллюзии возникают при любом ориентационном положении тест-объекта – их наличие устойчиво независимо от направления поворота; геометрические иллюзии зависят от угла поворота тест-объекта, и эта зависимость имеет тригонометрический характер, с повторяющейся периодикой и фазовыми сдвигами в зависимости от конфигурации элементов. Во всех случаях наблюдаются характерные максимум/минимум эффекты, повторяющиеся через $\pi/2$, что указывает на закономерную природу ошибок, связанную с ориентационной обработкой зрительной информации

7. Система является гибкой и расширяемой, предполагается возможность подключения дополнительных модулей для исследования различных классов иллюзий. Модель данной системы также подразумевает различные формы работы с ней, в том числе дистанционные. Дистанционная форма работы системы допускает как централизованную установку сервера, так и использование распределенных серверов системы.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Статьи из перечня ВАК и/или Scopus:

1. *Kostoev A.T., Tsurkov V.I.* Automation of testing systematic errors in visual perception //Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2024. – Vol. 63. – №. 3. – Pp. 462-478.
2. *Kostoev A. T., Tsurkov V. I.* Testing systematic errors of distances and lengths in geometric illusions //Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2025. – Т. 64. – №. 1. – С. 112-120.
3. *Rakcheeva T. A., Kostoev A. T.* Research of Orientation Characteristics of Visual Intersection Illusion // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Intern. Conf. of Young Scientists and Students «Topical Problems of Mechanical Engineering». ToPME 2019. Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012073.
4. *Костоев А. Т., Огородов Д. В., Данько Д. И.* Исследование геометрических факторов зрительной иллюзии, возникающей при оценке расстояний между краями объектов // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6(90). С. 46-55.
5. *Romanenkov A. M., Temnov A. A., Kostoev A. T.* Methods of Creating Fault-Tolerant Geographically Distributed Systems // Mathematical Statistician and Engineering Applications. 2022. V. 71. № 2. P. 168-176.

Патенты и свидетельства о регистрации программ:

6. *Горшков В. В. Костоев А.Т.* Система для тестирования зрительного восприятия в условиях возникновения иллюзий // Патент на изобретение RU 2786961 C1, 26.12.2022. Заявка № 2021120473 от 12.07.2021.
7. *Горшков В. В. Костоев А.Т.* Устройство для определения величины зрительных иллюзий // Патент на полезную модель RU 208910 U1, 21.01.2022.

8. Горшков В.В., Ниязова Б.Н., Костоев А.Т., Угурлуев Э.А. Способ и система для принятия решения о готовности компьютеров локальной вычислительной сети к работе // Патент на изобретение RU 2799736 С2, 11.07.2023.
9. Костоев А.Т., Николаева Е.А. Программа для тестирования зрительной иллюзии пересечения (иллюзии Поггендорфа) // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022683021, 30.11.2022.
10. Костоев А.Т., Николаева Е.А. Программа для тестирования зрительной иллюзии Мюллера-Лайера// Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022683022, 30.11.2022.
11. Костоев А.Т., Николаева Е.А. Программа для тестирования вертикально-горизонтальной иллюзии // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022683023, 30.11.2022.

Статьи в прочих изданиях:

12. Костоев А.Т. Горшков В.В. Постановка задачи оптимальной фильтрации параметров системы, вызывающей зрительную иллюзию Поггендорфа // Сборник научных трудов кафедры прикладной математики и программирования по итогам работы постоянно действующего семинара «Теория систем». – Москва, 2023. – С. 235-241.
13. Костоев А.Т., Данько Д.И., Фирсов Д.А. Исследование характеристик зрительной иллюзии расстояния между краями объектов // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности: матер. всеросс. науч. конф. молодых исследователей с междунар. участием. Москва, 2022. С. 116-121.
14. Ракчеева Т.А., Костоев А.Т. Исследование ориентационных факторов зрительной иллюзии пересечения // Сборник научных трудов постоянно действующего семинара «Теория систем». Москва, 2020. С. 108-114.
15. Ракчеева Т.А., Костоев А.Т. Геометрические факторы зрительной иллюзии Поггендорфа // Сборник научных трудов постоянно действующего семинара «Теория систем».. Москва, 2020. С. 115-118.
16. Костоев А.Т., Ракчеева Т.А. Исследование ориентационных характеристик зрительной иллюзии пересечения // XXXI Междунар. иннов. конф. молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения. Москва, 2020. С. 380-384.