

УДК 004.67, 608.2, 608.4, 519.25, 519.223

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОШИБОК ЗРИТЕЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ

© 2024 г. А. Т. Костоев<sup>1, \*</sup>, В. И. Цурков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия

\*e-mail: a.kostoev@inbox.ru

Поступила в редакцию 14.03.2024 г.

После доработки 31.03.2024 г.

Принята к публикации 13.05.2024 г.

Рассматриваются проблемы, связанные с исследованием возникновения систематических ошибок зрительного восприятия, проявляющихся в форме иллюзий. Уровень существующей техники демонстрирует недостаток технических средств и методов, направленных на исследование зрительного восприятия в условиях возникновения зрительных иллюзий. В связи с этим авторами предложены методология тестирования и автоматизированная система, позволяющая систематизировать процесс исследования зрительных иллюзий. На основе предложенной модели проведено исследование зрительной иллюзии пересечения (иллюзии Поггендорфа), возникающей при зрительном восприятии диагональной линии, частично проходящей за непрозрачным объектом. Изучалась зависимость систематических ошибок, возникающих при определении местоположения выходного отрезка относительно входного, от геометрических параметров и конфигураций фигур, вызывающих иллюзию.

**Ключевые слова:** зрительные иллюзии, геометрические иллюзии, иллюзия Поггендорфа, систематические ошибки восприятия, методология тестирования, автоматизированная система, систематизация процесса тестирования, моделирование процесса

DOI: 10.31857/S0002338824030128 EDN: UPLFNO

## AUTOMATION OF TESTING OF SYSTEMATIC ERRORS IN VISUAL PERCEPTION

A. T. Kostoev<sup>a, \*</sup>, V. I. Tsurkov<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Russian State University named after A.N. Kosygin, Moscow

<sup>b</sup> Federal Research Center «Computer Science and Control»

Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

\*e-mail: a.kostoev@inbox.ru

The article discusses the problems associated with the study of the occurrence of systematic errors in visual perception, manifested in the form of illusions. The level of existing technology demonstrates a lack of technical means and methods aimed at studying visual perception in conditions of the occurrence of visual illusions. In this regard, the authors proposed a testing methodology and an automated system that allows us to systematize the process of studying visual illusions. Based on the proposed model, a study of the visual illusion of intersection was carried out (Poggendorff illusion), which occurs when the visual perception of a diagonal line partially passing behind an opaque object. The dependence of systematic errors that arise when determining the location of the output segment, relative to the input, on the geometric parameters and configurations of figures causing the illusion was studied.

**Keywords:** visual illusions, geometric illusions, Poggendorff illusion, systematic errors of perception, testing methodology, automated system, systematization of the testing process, process modeling

**Введение.** 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. [1–4].

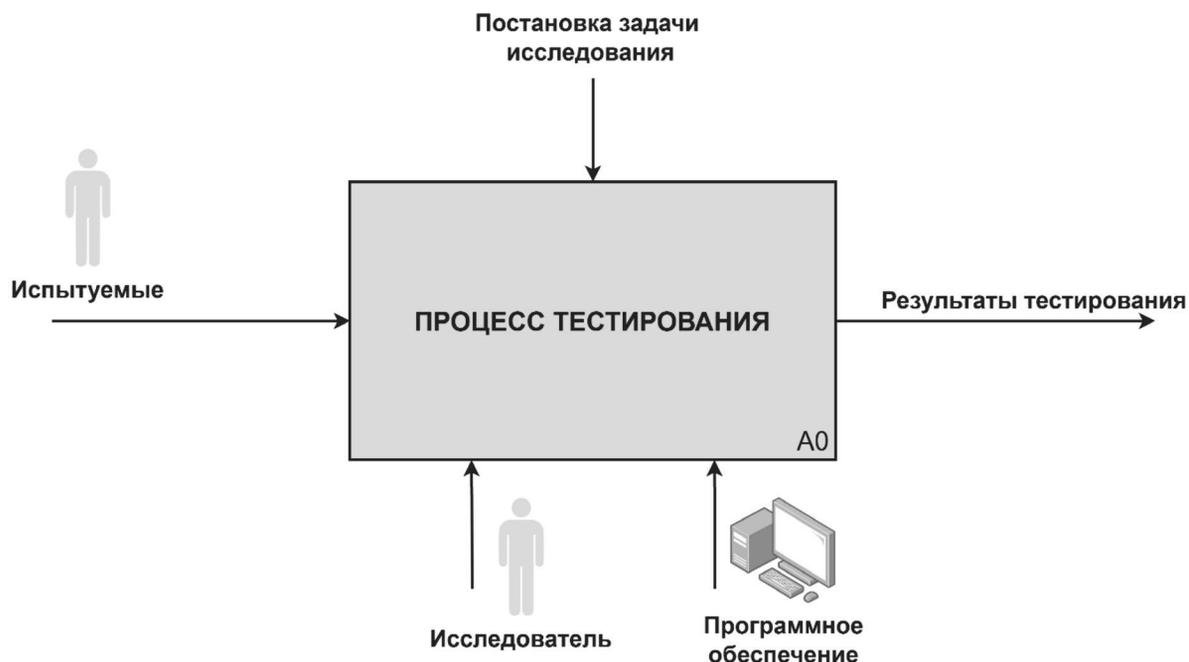


Рис. 1. Процесс тестирования зрительного восприятия.

Известно, что восприятие человеком зрительной информации – сложный процесс, подверженный различным ошибкам и искажениям. Особый интерес для исследователей представляют зрительные иллюзии [5], выходящие за границы обычных ошибок восприятия. Иллюзии представляют собой систематические ошибки зрительного восприятия, не поддающиеся произвольной коррекции. Эти ошибки могут быть связаны как с физиологическими причинами зрительной системы человека, так и с психологическими особенностями [6–10]. Однако, как отмечает И.И. Шошина, «пока еще не сформулирована гипотеза, позволяющая исключить противоречия хотя бы в объяснении основных закономерностей зрительного искажения при восприятии даже простых геометрических фигур» [11].

В качестве одной из причин такого положения автор выделяет недостаточно надежную процедуру тестирования испытуемых, в связи с чем возникает необходимость в разработке методов количественного тестирования, дающих относительно высокую воспроизводимость результатов.

В работе [12] также подчеркивается значимость исследований, посвященных разработке средств компьютерной поддержки для автоматизированных психофизиологических экспериментов, направленных на изучение механизмов зрительного восприятия. Основное внимание уделяется аспектам синтеза и сохранения изображений-стимулов, их предъявлению наблюдателям, а также анализу ответов в специализированных программах. Авторы также представили ряд разработанных программных обеспечений (ПО) для проведения психофизиологических экспериментов.

Однако большинство разрабатываемых ПО в области исследований зрительного восприятия в настоящее время является лишь инструментом для решений 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.

Данная работа посвящена описанию предложенной модели тестирования систематических ошибок восприятия, воспроизводимость которой подтверждается исследованием зависимости систематических ошибок зрительного восприятия от геометрических параметров тест-объектов фигур, порождающих геометрические иллюзии.

**1. Моделирование процесса тестирования систематических ошибок восприятия.** Тестирование зрительного восприятия, направленное, в частности, на выявление величины систематиче-

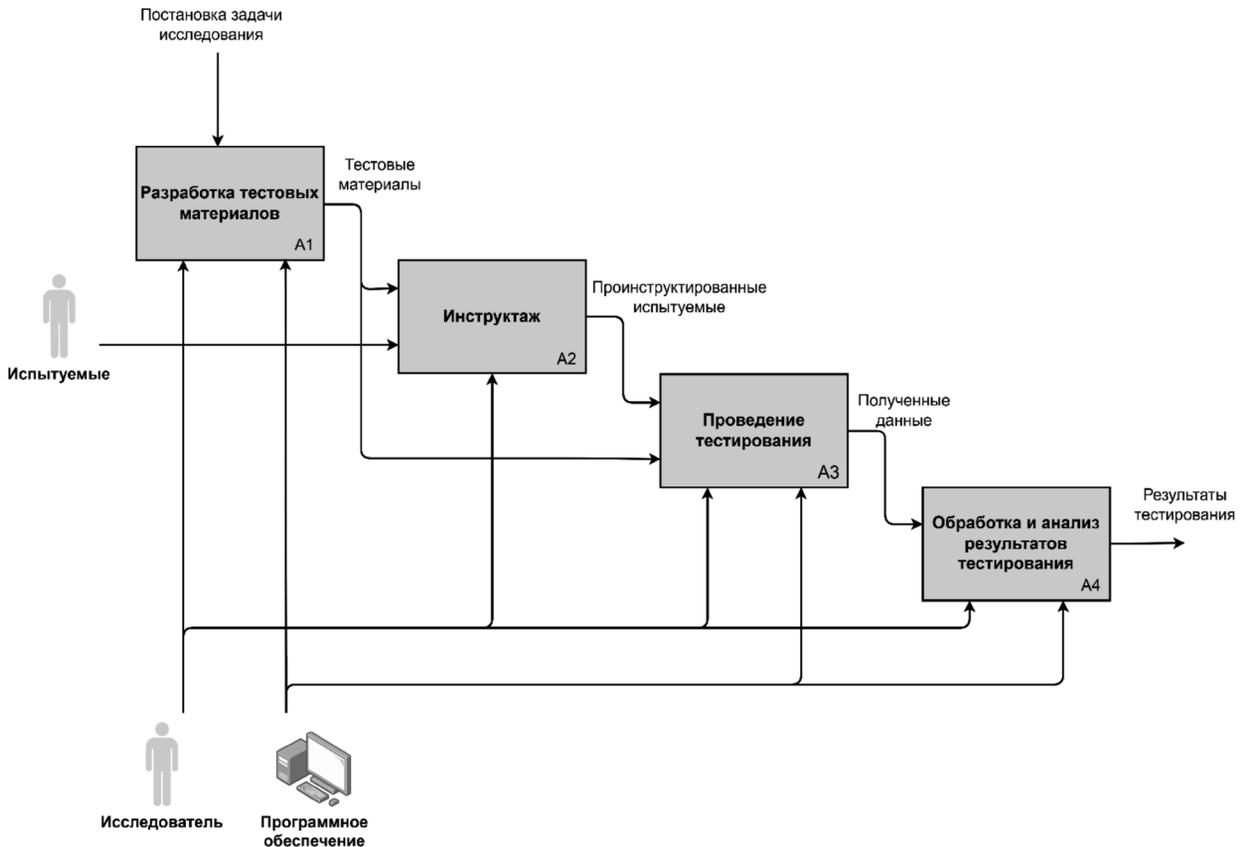


Рис. 2. Основные этапы процесса тестирования.

ских ошибок в восприятии при различных условиях, можно представить как информационный процесс. На общей контекстной диаграмме, изображенной на рис. 1, обозначены входы, выходы, механизмы и элементы управления, задействованные в процессе тестирования. Участниками данного 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 (рис. 2): разработка тестовых материалов, инструктаж, проведение тестирования, обработка и анализ результатов тестирования.

Указанные этапы отражают основные функции процесса и являются также декомпозируемыми, за исключением второго этапа, заключающегося в проведении инструктажа для испытуемых.

Первый этап представляет собой разработку тестовых материалов (рис. 3).

1. Выбор объекта исследования. Согласно поставленной задаче, исследователем осуществляется выбор иллюзии для дальнейшего изучения.

2. Формирование референтных и тестовых стимулов. На основе объекта исследования и поставленной задачи формируются тест-объекты для проведения тестирований, включающие референтные и тестовые стимулы.

3. Определение изменяющихся параметров референтных стимулов. В зависимости от задачи на этапе разработки определяются регулируемые параметры тест-объектов иллюзии, от которых находится значение систематической ошибки, возникающей у испытуемых при определении тестовых стимулов.

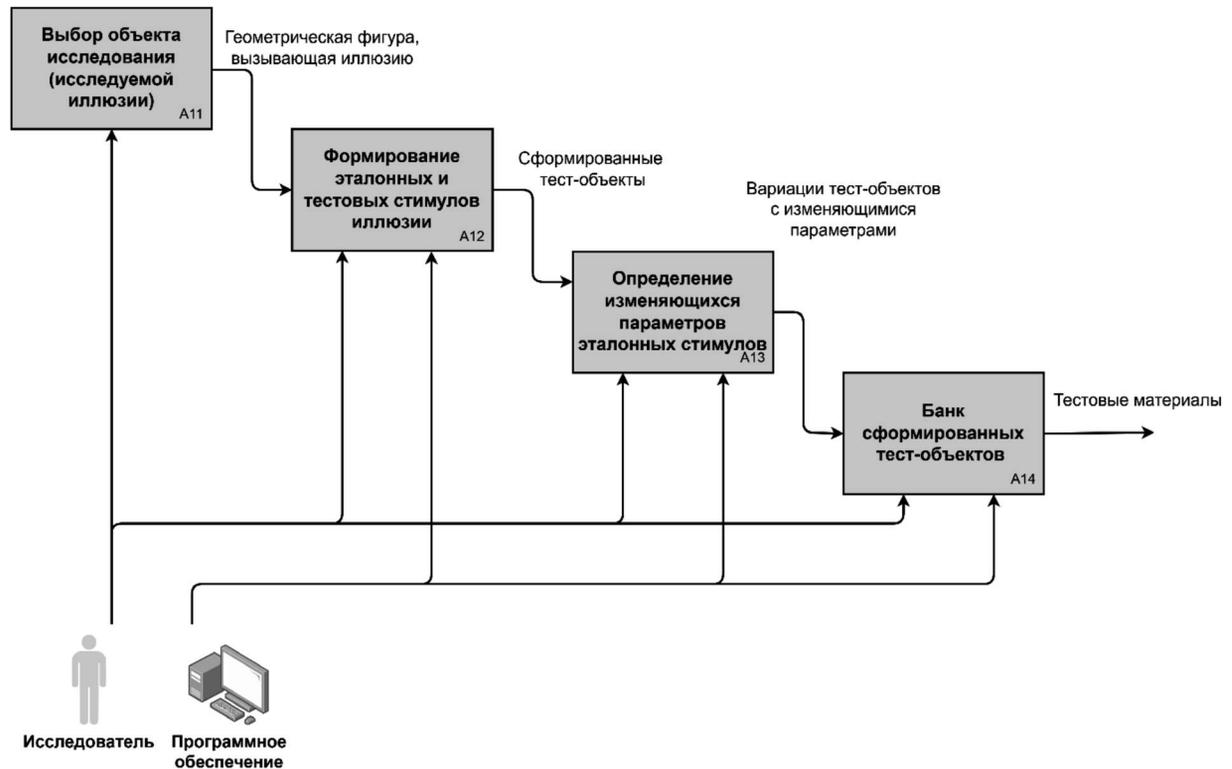


Рис. 3. Этап разработки тестовых материалов.

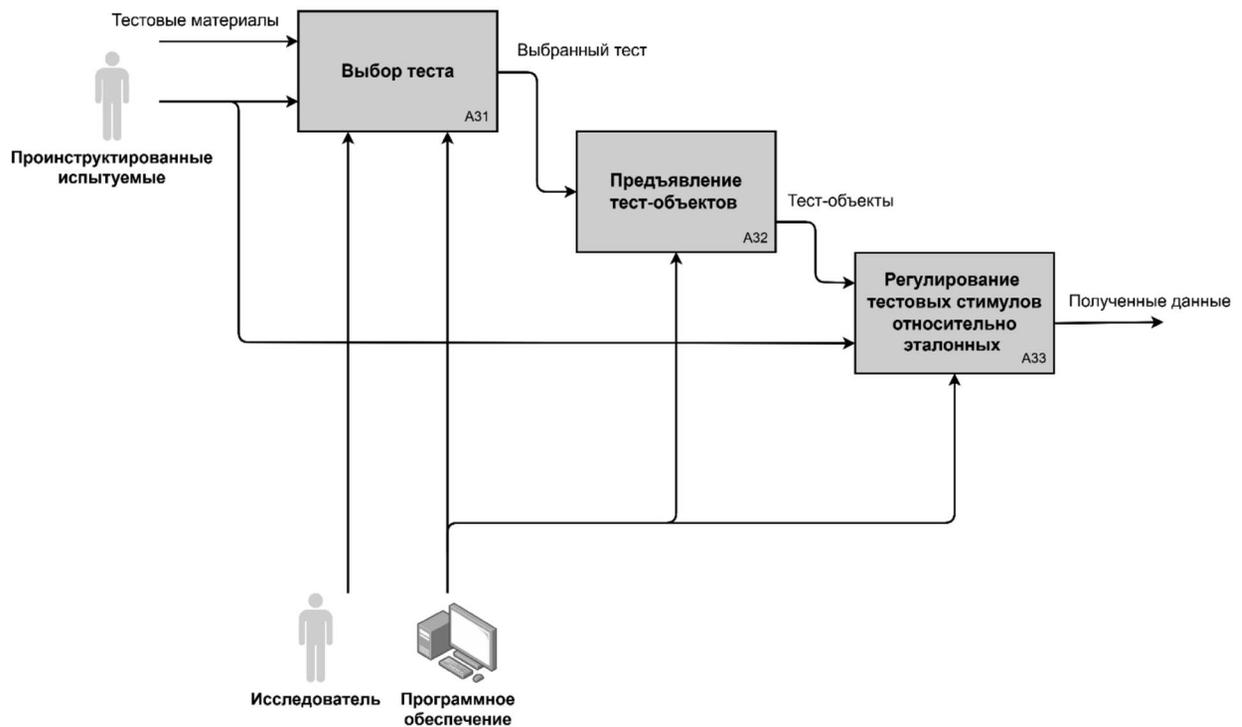


Рис. 4. Этап проведения тестирования.

4. Банк сформированных тест-объектов. На выходе из функции, отвечающей за разработку тестовых материалов, формируем тестовые материалы для проведения тестирований.

Тестовые материалы, полученные на первом этапе процесса, позволяют перейти ко второму этапу, на котором исследователь дает инструкции для испытуемых, демонстрирует работу

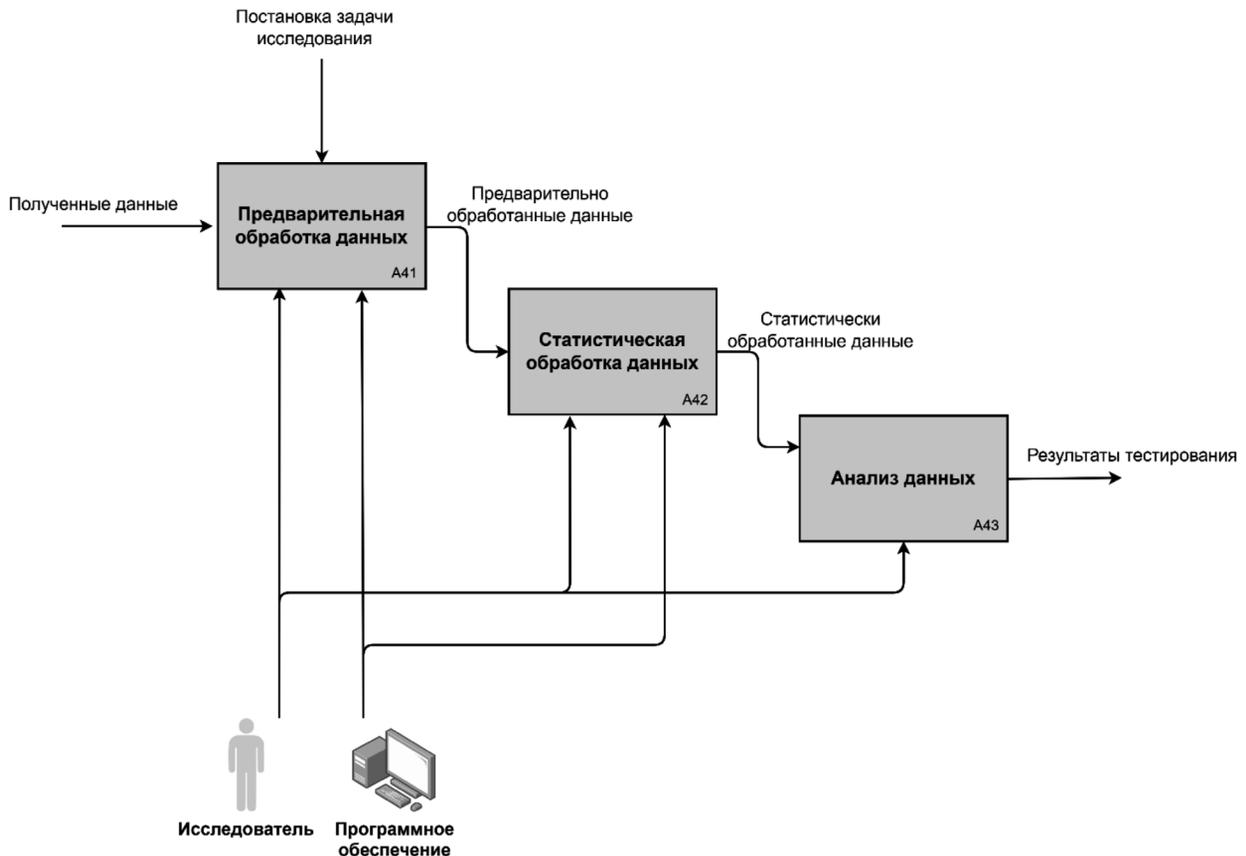


Рис. 5. Обработка и анализ результатов тестирования.

системы и знакомит с правилами прохождения тестов. После чего испытуемые приступают непосредственно к самому тестированию.

На этапе проведения тестирования (рис. 4) испытуемые, прошедшие инструктаж, осуществляют выбор теста. На основе данного выбора предъявляются сформированные тест-объекты с референтными и тестовыми стимулами. Тестовые стимулы регулируются испытуемыми, согласно задаче исследования и полученным инструкциям, при этом данные каждого теста сохраняются и структурируются по каждому испытуемому.

Последним этапом процесса является обработка и анализ результатов тестирования (рис. 5). Этап включает предварительную обработку данных, статистическую обработку данных и анализ.

Предварительная и статистическая обработка данных осуществляется ПО и включает:

- поиск и очистку заведомо ошибочных значений пропусков, выбросов и других несоответствий, которые могут исказить результаты анализа;
- методы описательной статистики: вычисление средних значений, медианы, стандартного отклонения и других мер центральной тенденции и разброса данных;
- первичную визуализацию данных, позволяющую лучше понять их структуру и распределения для дальнейшего анализа и выявления закономерностей.

Анализ статистически обработанных данных, осуществляемый исследователем, включает методы корреляционного и регрессионного анализа, а также статистические тесты для проверки гипотез и определения статистически значимых различий между группами данных.

**2. Проектирование системы тестирования.** Важным шагом для разработки системы является функциональное моделирование процесса. На начальном этапе необходимо определить роли пользователей системы и их функциональные возможности.

Из раскрытого в разд. 1 процесса тестирования выделены два вида пользователей системы: испытуемые и исследователь. Графическое представление функциональных требований к системе, моделирующих способы взаимодействия пользователей с системой, представлено диа-

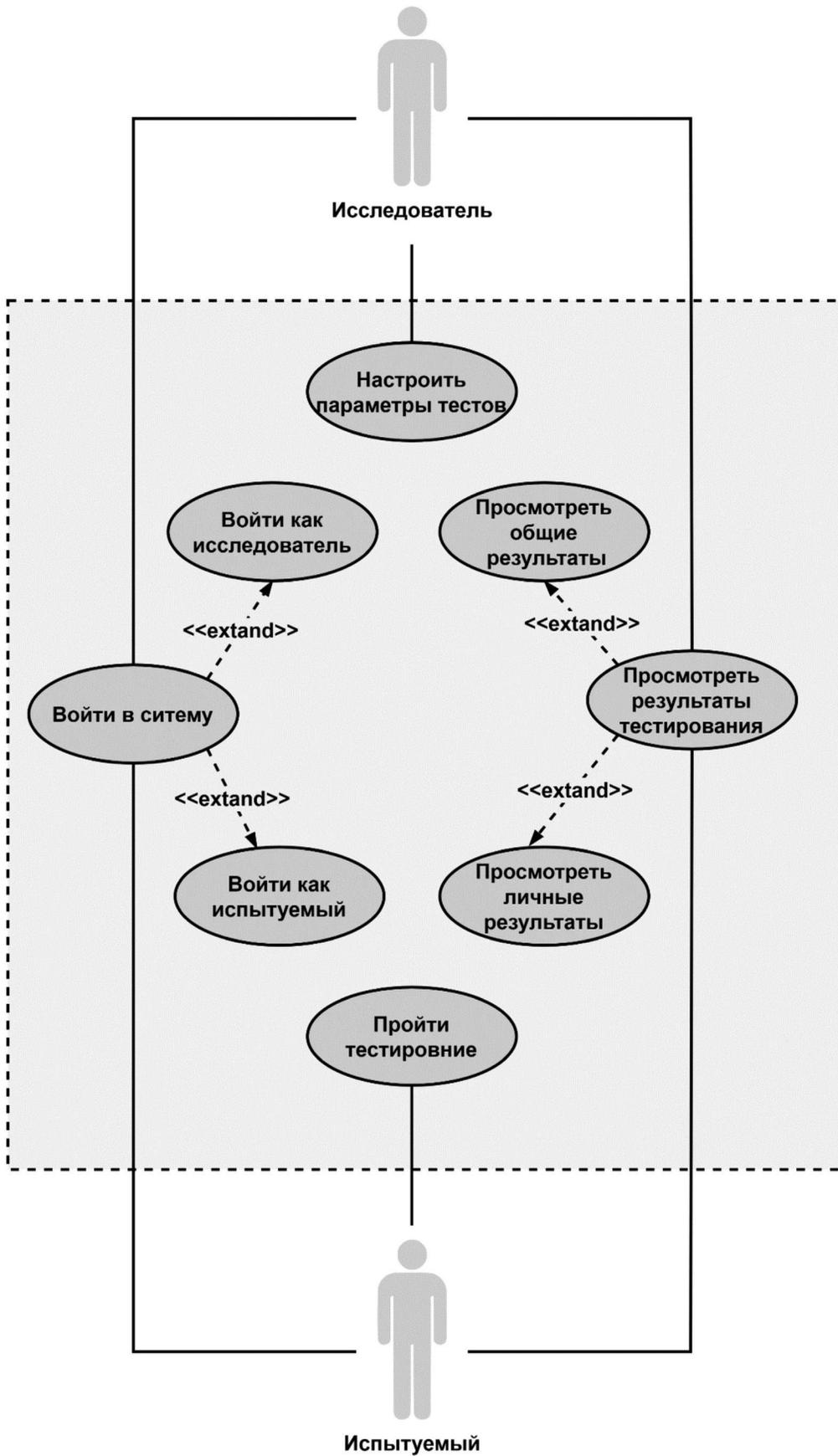


Рис. 6. Обобщенная UML-диаграмма вариантов использования.

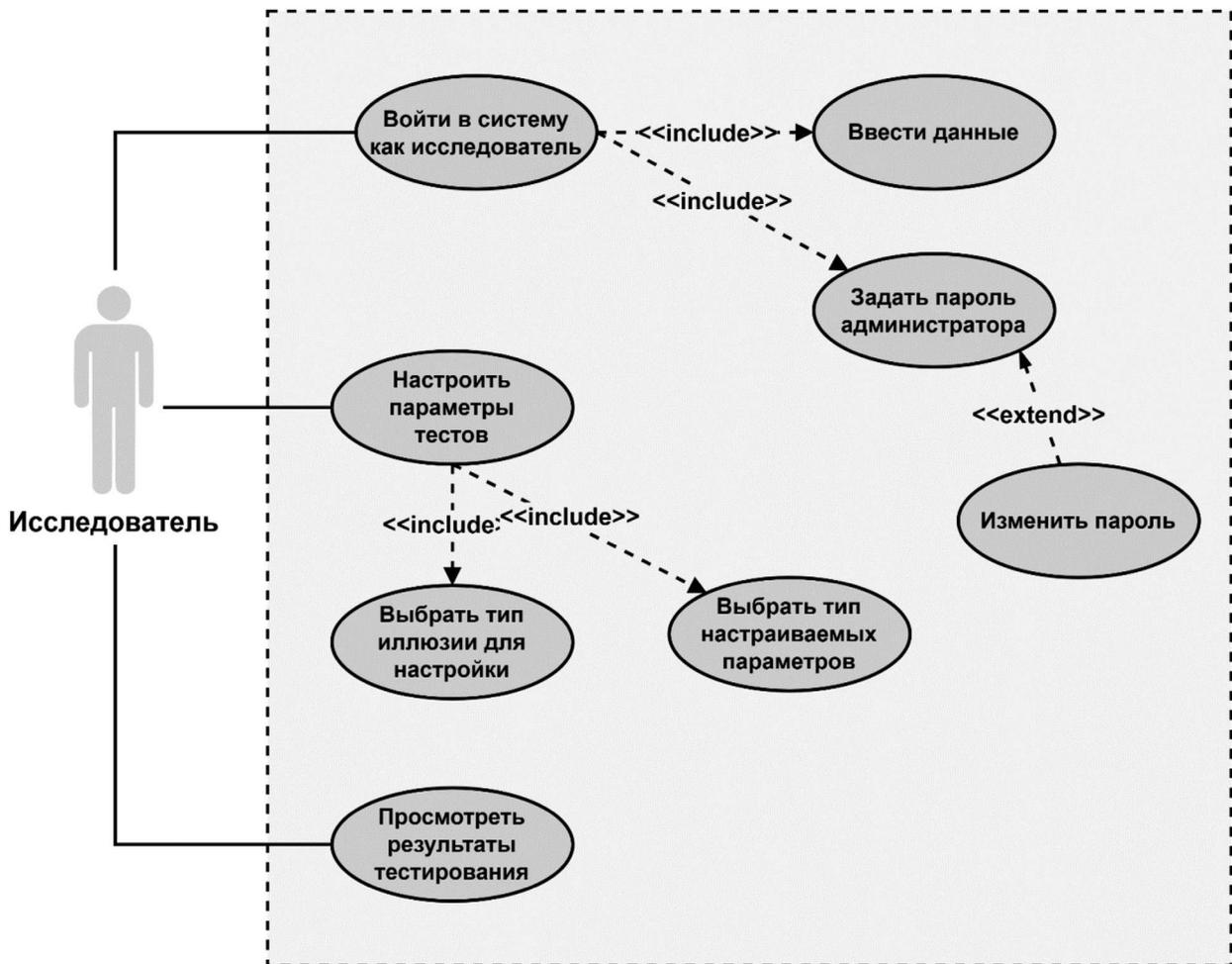


Рис. 7. UML-диаграмма вариантов использования исследователя.

граммами UML (англ. unified modeling language – унифицированный язык моделирования). На рис. 6 схематически изображена обобщенная UML-диаграмма вариантов использования.

Данная диаграмма в общем виде отображает варианты применения (сценарии), акторов (ролей, взаимодействующих с системой) и отношения между ними.

Базовые сценарии: «Войти в систему» (для исследователя и испытуемого), «Настроить параметры тестов» (для исследователя), «Пройти тестирование» (для испытуемого) и «Просмотреть результаты тестирования» (для исследователя и испытуемого).

В начале взаимодействия с системой осуществляется непосредственно вход в саму систему. Система предлагает пользователю два варианта входа: «Войти как исследователь» или «Войти как испытуемый». Данные сценарии являются расширением варианта использования «Войти в систему», при этом для указанных типов пользователей сформированы свои функциональные возможности взаимодействия с системой.

Вариант использования «Войти как исследователь» предоставляет функционал работы, связанный с разработкой тестовых материалов («Настроить параметры тестов») и с просмотром результатов тестирования («Просмотреть общие результаты тестирования»). В случае сценария «Войти как испытуемый» предоставляется возможность сценариев «Пройти тестирование» и «Просмотреть личные результаты».

Вариант использования «Войти как исследователь» обеспечивает функционал работы, связанный с разработкой тестовых материалов («Настроить параметры тестов») и с просмотром результатов тестирования («Просмотреть общие результаты тестирования»). В случае сценария «Войти как испытуемый» предлагает возможность сценариев «Пройти тестирование» и «Просмотреть личные результаты».

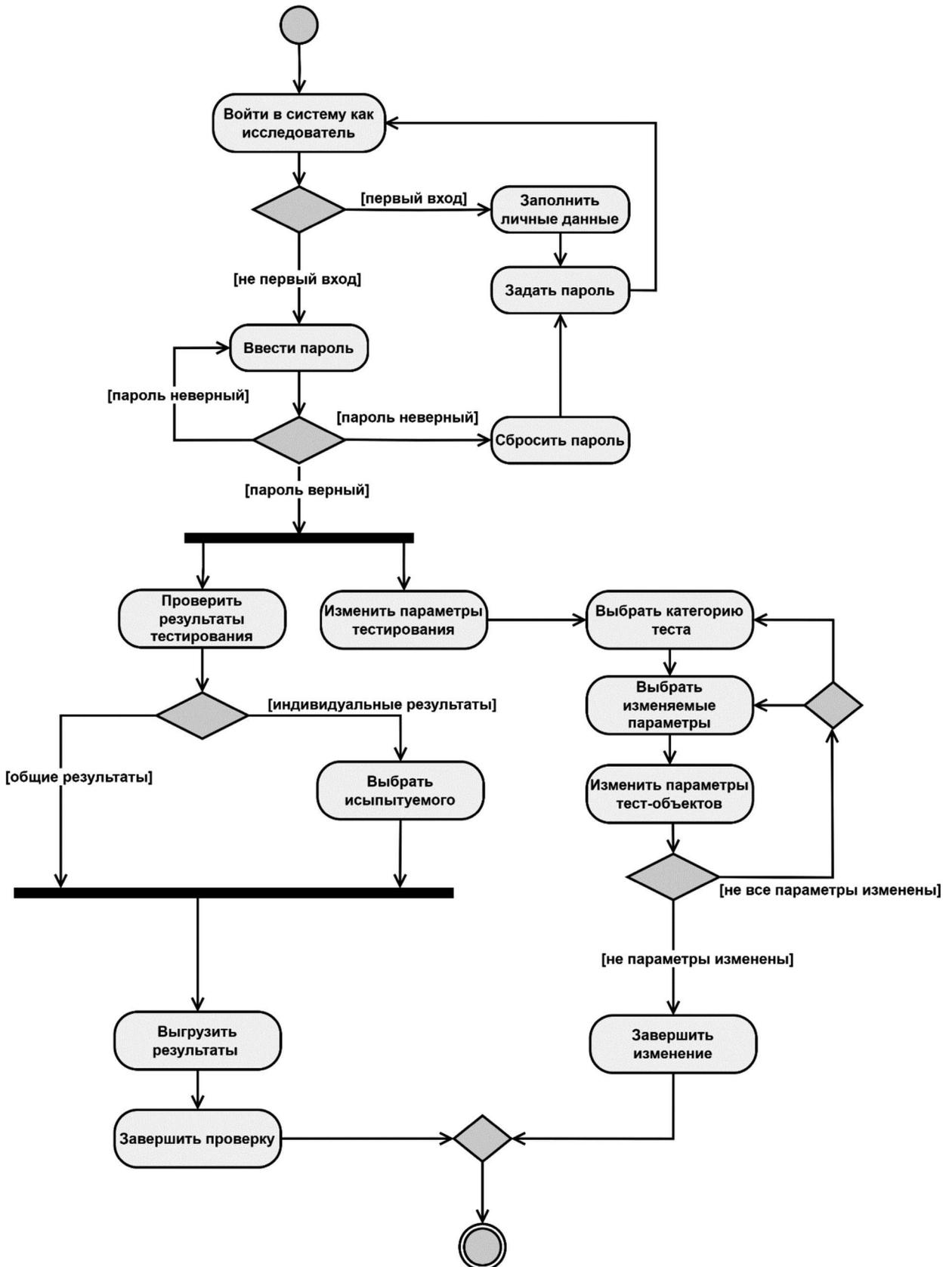


Рис. 8. UML-диаграмма деятельности исследователя.

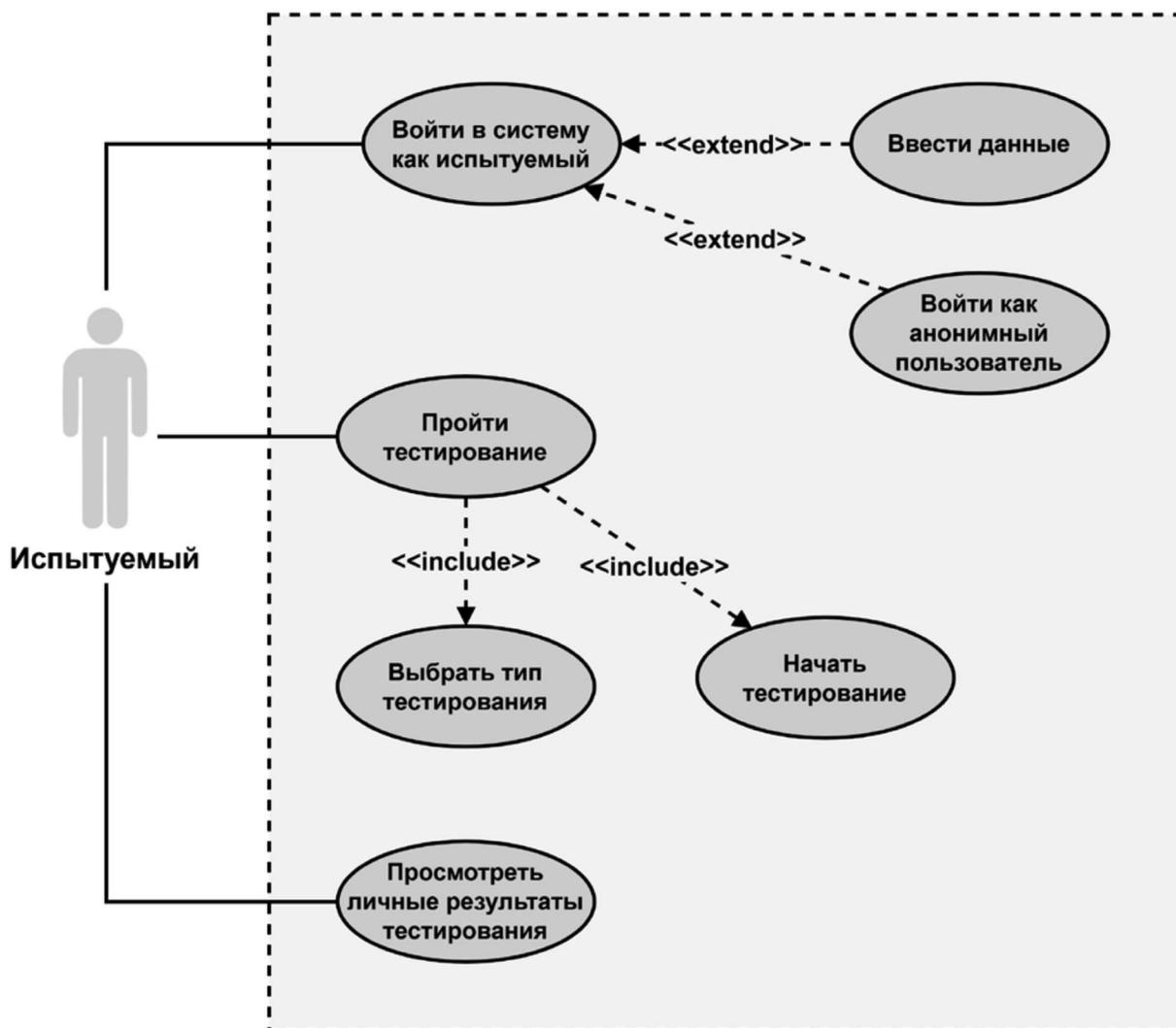


Рис. 9. UML-диаграмма вариантов использования испытуемого.

Для уточнения и дополнения обобщенной модели вариантов использования на рис. 7–10 представлены UML-диаграммы вариантов отдельно как для исследователя, так и для испытуемого.

2.1. И с с л е д о в а т е л ь. Сценарий «Войти в систему как исследователь» включает следующие варианты использования: «Вести данные» и «Задать пароль администратора» (рис. 7). При первом входе исследователь заполняет личные данные и задает пароль для ограничения доступа к системе для других типов пользователей. При последующем входе в систему исследователь вводит свои личные данные (фамилию, имя, отчество) и пароль, после чего система предоставляет полный доступ к функционалу системы.

Функционал системы для исследователя дает возможность настройки параметров тестов. Исследователю предлагаются варианты использования «Выбрать тип иллюзии для настройки» и «Выбрать тип настраиваемых объектов». Для данных вариантов обеспечивается включение дополнительных модулей ПО, предназначенных для тестирования иллюзий. При этом в зависимости от задач исследования и подключенных модулей выбор типа иллюзий для настройки и типа настраиваемых параметров может расширяться путем разработки новых модулей. Также исследователю доступны результаты тестирования как отдельных испытуемых, так и всей выборки испытуемых в целом.

Для детализации особенностей алгоритмической и процедурной реализации выполняемых системой операций и ее взаимодействия с исследователем разработана также UML-диаграмма деятельности исследователя (рис. 8). Диаграмма отражает последовательность операций про-

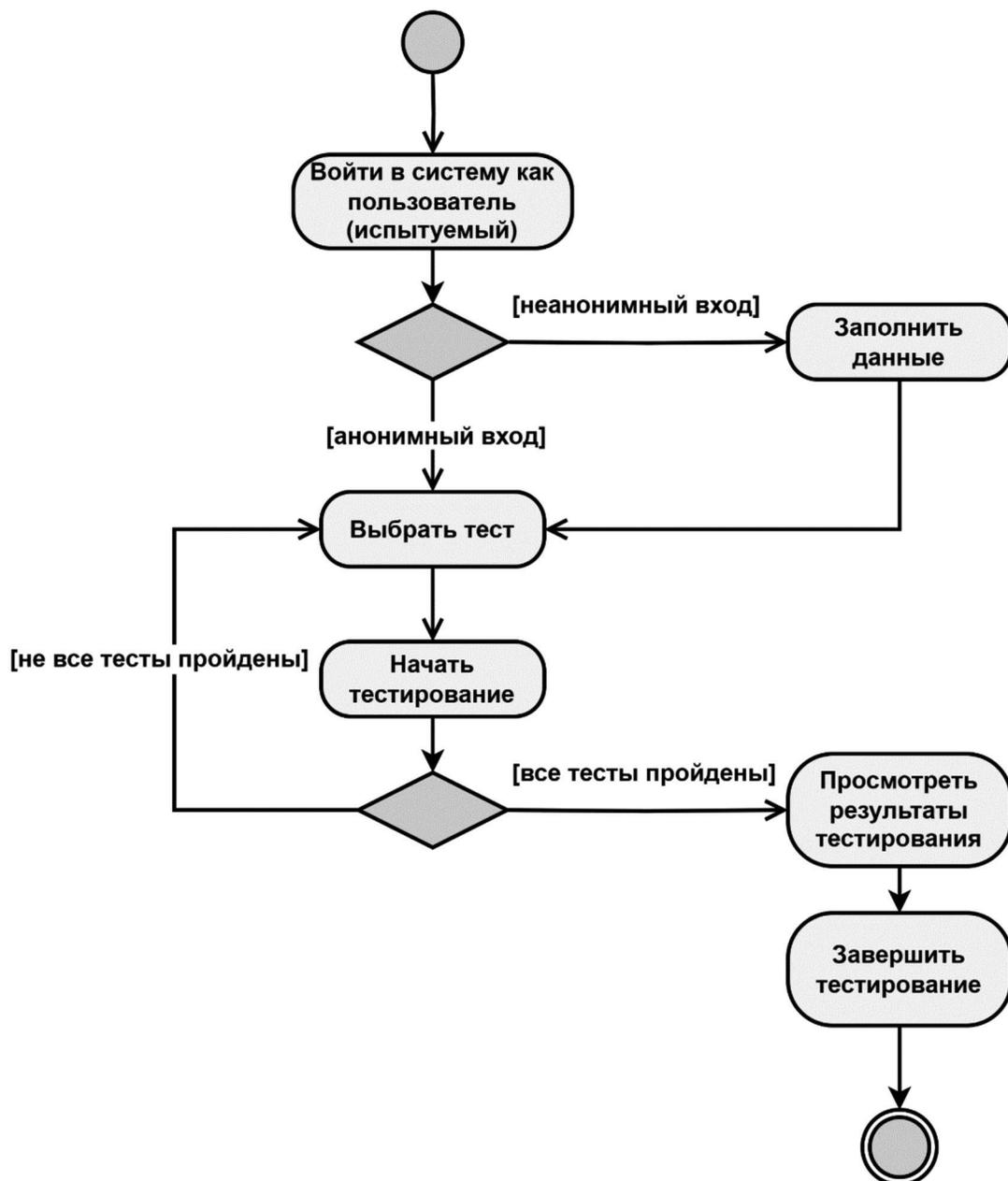


Рис. 10. UML-диаграмма деятельности испытуемого.

цесса взаимодействия системы и исследователя и возможные для него варианты исполнения процесса.

2.2. И с п ы т у е м ы й. Сценарий варианта использования «Войти в систему как испытуемый» является расширением для вариантов «Ввести данные» и «Войти как анонимный пользователь» (рис. 9). Испытуемому предлагается выбрать один из вариантов, после чего система сохраняет информацию о нем в базе данных. В случае анонимного входа испытуемому присваивается анонимное имя и порядковый ID анонимного пользователя.

Функционал системы для исследователя позволяет испытуемому пройти тестирование и посмотреть первичные результаты личных тестов. Сценарий «Пройти тестирование» включает варианты использования «Выбрать тип тестирования» и «Начать тестирование». Тип тестирования испытуемый выбирает согласно инструкциям исследователя.

Последовательность операций и взаимодействия испытуемого с системой представлены на рис. 10.

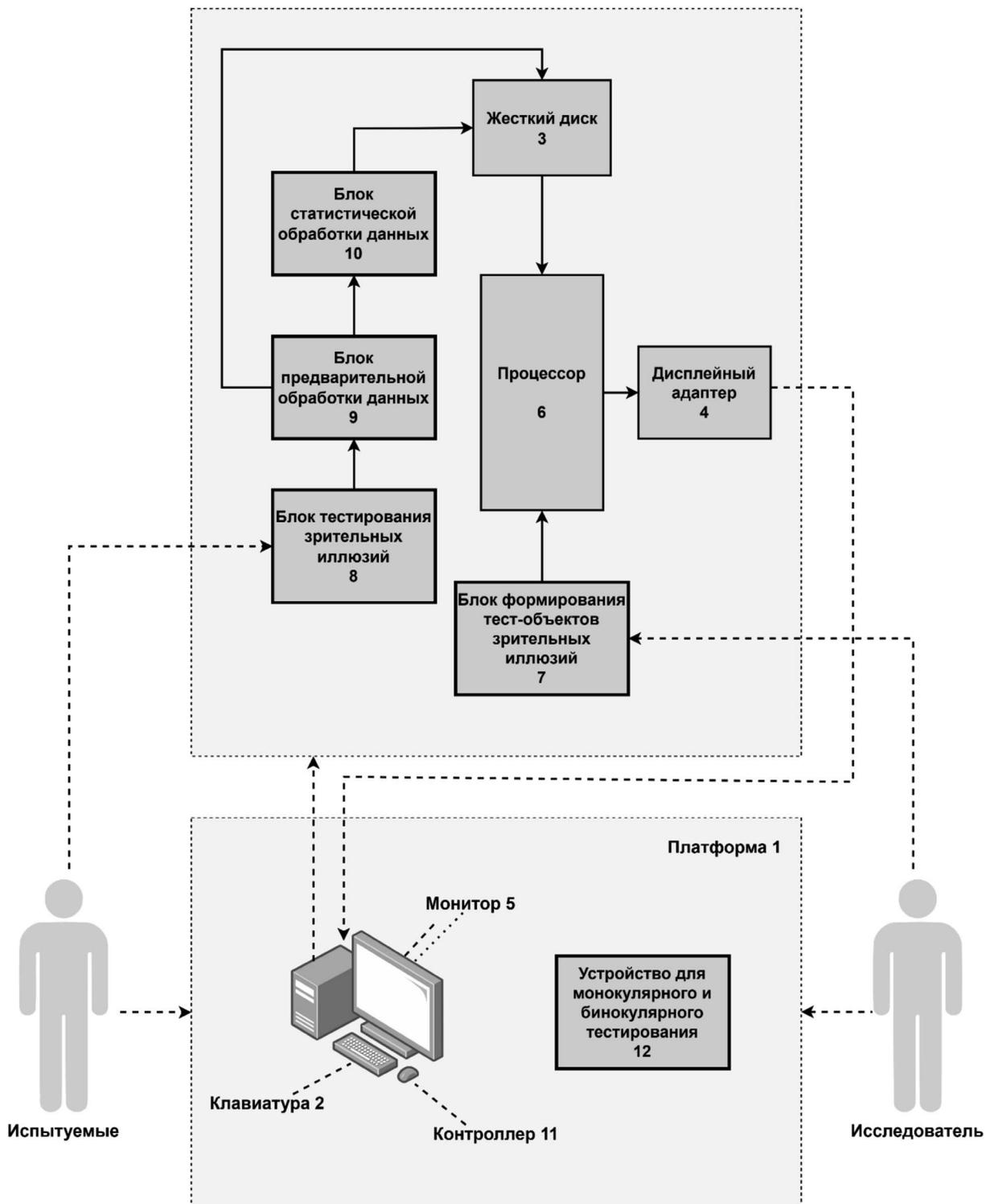


Рис. 11. Структурная схема автоматизированной системы тестирования.

**3. Система тестирования.** На основе представленной в предыдущих разделах методологии проектирования процесса тестирования предлагается использование автоматизированной системы, позволяющей осуществлять тестирование зрительного восприятия испытуемых в условиях возникновения иллюзий [13]. Данная система может быть применена для исследования различного класса зрительных иллюзий.

На рис. 11 представлена структурная схема автоматизированной системы тестирования систематических ошибок зрительного восприятия.

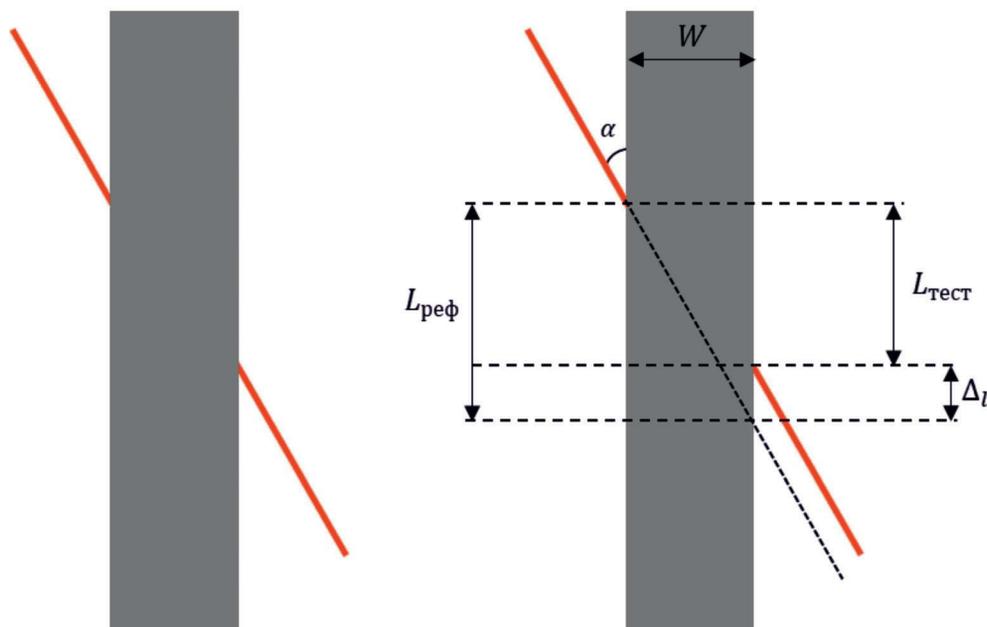


Рис. 12. Схема зрительной иллюзии пересечения (иллюзии Поггендорфа).

Автоматизированная система тестирования содержит следующие компоненты:

- 1) платформу, представляющую площадку для расположения испытуемого и его дальнейшего прохождения тестирования;
- 2) персональный компьютер (ПК), установленный на платформе, включает клавиатуру для ввода данных, контроллер (компьютерная мышь) и монитор;
- 3) устройство для монокулярного и бинокулярного тестирования [14], также установленное на платформе, является отличительным признаком предложенной системы относительно аналогов [15].

При этом на схеме изображены основные компоненты, используемые в ПК: жесткий диск для хранения данных, дисплейный адаптер для преобразования получаемой информации в визуальные элементы и процессор. Кроме того, система от аналогов [15] отличается тем, что содержит блоки, осуществляющие через ПО взаимодействие с основными компонентами ПК: формирование тест-объектов зрительных иллюзий, тестирование зрительных иллюзий, предварительную и статистическую обработки данных.

Технический результат приведенной системы – повышение эффективности тестирования зрительного восприятия испытуемых. Данный результат достигается за счет расширения функциональных возможностей системы путем добавления технических средств, позволяющих проводить тестирование зрительного восприятия кандидатов в условиях возникновения иллюзий, а также возможность осуществления монокулярного и бинокулярного наблюдения испытуемым в зависимости от задач исследователя.

Предложенная система является расширяемой, и в дальнейшем предполагается использование методов разработки геораспределенных систем [16].

**4. Исследование иллюзии Поггендорфа.** Изложено использование рассмотренной в разд. 1–3 методологии и разработанной системы на примере исследования зрительной иллюзии пересечения (иллюзии Поггендорфа), относящейся к классу геометрических [5].

4.1. **П о с т а н о в к а з а д а ч и и с с л е д о в а н и я.** Согласно предложенной модели (рис. 1–5) первоначальным этапом выступает постановка задачи исследования. Данная работа продолжает исследование, представленное в [17, 18].

Объектом исследования служит упомянутая иллюзия Поггендорфа. Предметом исследования – зависимость ошибок смещения от геометрических параметров тест-объектов [17–20]. Цель исследования заключается в выявлении статистических зависимостей ошибок смещения, порождаемых иллюзией.

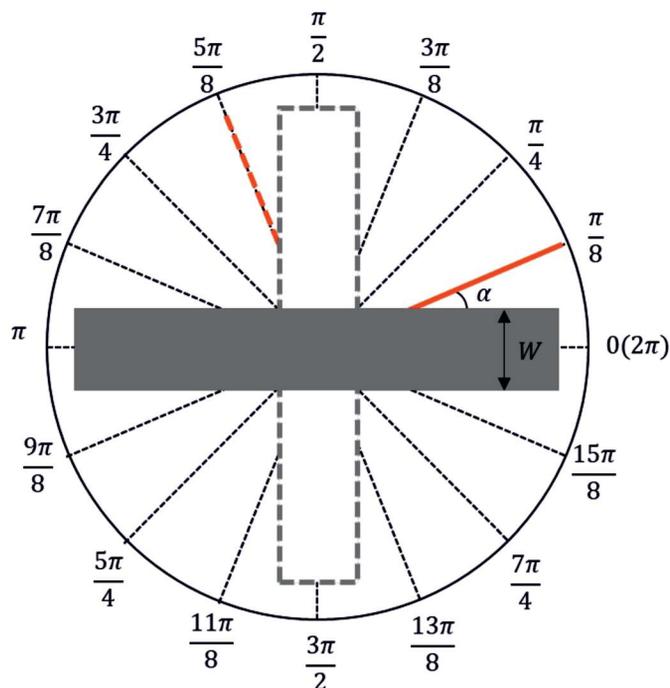


Рис. 13. Диапазон вариаций угла поворота  $\varphi$ .

Рассмотрим подробнее объект и предмет исследования. На рис. 12 изображена схема, демонстрирующая эффект зрительной иллюзии пересечения прямой за непрозрачной полосой. Эффект иллюзии проявляется в субъективно неправильном определении коллинеарного продолжения выходного отрезка прямой относительно входного на определенную величину  $\Delta L$ .

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

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

Известно, что ошибки смещения  $\Delta L$  зависят от геометрических параметров тест-объектов [5, 7]: от ширины полосы  $W$  и угла наклона прямой  $\alpha$ . Также выявлено [17, 18], что на величину ошибки смещения  $\Delta L$  влияют ориентационные характеристики всей тестовой конструкции (рис. 13).

Для определения зависимостей ошибки смещения  $\Delta L$  от геометрических параметров и определения наиболее адекватных моделей зависимости необходимо провести дополнительные исследования с большей выборкой испытуемых, основываясь на предложенной методологии тестирования.

Общая структура постановки задачи исследования заключается в определении:

- статистической зависимости ошибки смещения  $\Delta L$  от параметров ширины  $S$  полосы;
- статистической зависимости ошибки смещения  $\Delta L$  от параметров угла наклона  $\alpha$  прямой;
- статистической зависимости ошибки смещения  $\Delta L$  от параметров поворота  $\varphi$  тест-объектов.

4.2. Разработка тестовых материалов. Следующим этапом исследования является разработка тестовых материалов (рис. 3). Тестовые материалы разрабатываются согласно общей структуре постановки задачи исследования. В качестве тест-объектов для количественного тестирования зрительного восприятия испытуемых используют фигуры, вызывающие эффект иллюзии Поггендорфа.

Испытуемым предъявляются тест-объекты с определенными параметрами ширины полосы  $W$ , угла наклона входного отрезка прямой  $\alpha$  и угла поворота всей тестовой конструкции  $\varphi$

(рис. 12, 13). При этом выходной отрезок заранее располагается значительно выше относительно коллинеарности входного. Испытуемый перемещает выходной отрезок до тех пор, пока для его субъективного восприятия входной и выходной отрезки не станут фрагментами одной прямой. Для проведения тестирования необходимо сформировать тест-объекты с различными геометрическими параметрами, указанными при постановке задачи.

Для первой серии тестирования зрительного восприятия на величину ошибок смещения  $\Delta L$  сформированы следующие тест-объекты:

– 6 тест-объектов с изменяющимися параметрами  $W = [10; 20; 30; 40; 50; 60 \text{ мм}]$ , при фиксированном параметре  $\alpha = 45^\circ$  (для определения статистической зависимости ошибки смещения от значений ширины полосы),

– 9 тест-объектов с изменяющимися параметрами  $\alpha = [22.5; 30; 45; 60; 90; 120; 135; 150; 157.5^\circ]$  (для определения статистической зависимости ошибки смещения от значений угла наклона прямой).

Для второй серии тестирования, направленного на определение статистической зависимости ошибки смещения  $\Delta L$  от угла поворота  $\varphi$  всей тестовой-конструкции (рис. 13), сформировано 16 тест-объектов с изменяющимися параметрами  $\varphi$ . Значение углов поворота  $\varphi$  варьируются в диапазоне  $[0; 2\pi]$  с шагом  $\pi/8$ .

Для формирования обозначенных тест-объектов и количественной регистрации ошибок смещения разработано ПО [21], позволяющее в зависимости от выбранного типа тестирования предъявлять тест-объекты на экране монитора. Измерительная процедура ошибки смещения  $\Delta L$  производится автоматически в зависимости от сокращения или увеличения расстояния между «входом» линии – концом видимой части входного отрезка и ее «выходом» – началом видимой части выходного отрезка. Данное ПО является подключаемым модулем в блоках 7–10, обозначенных на схеме автоматизированной системы (рис. 11)

4.3. **И н т р у к т а ж.** Следующим этапом исследования является проведение инструктажа испытуемых.

Объяснение правил тестирования. В процессе тестирования испытуемому необходимо принять наиболее комфортную позу для работы за ПК. Экран монитора должен находиться на расстоянии примерно 40–50 см от глаз испытуемого. Правильность и условия проведения тестирования оказывают влияние на чистоту эксперимента.

Объяснение технической части тестирования. Испытуемому демонстрируется техническая часть тестирования, заключающаяся в выравнивании выходного отрезка относительно входного по указанной выше методике.

4.4. **П р о в е д е н и е т е с т и р о в а н и я.** Данный этап предполагает проведение тестирования на определенной выборке испытуемых, прошедших инструктаж. Всего в процессе исследования иллюзии Поггендорфа было протестировано 107 испытуемых (59 мужчин, 48 женщин).

В первой серии тестирования, направленной на выявление статистической зависимости ошибки смещения  $\Delta L$  от параметров ширины полосы  $W$  и угла наклона прямой  $\alpha$ , участвовали 67 испытуемых. Во второй серии тестирования, ориентированной на определение статистической зависимости ошибки смещения  $\Delta L$  от параметров угла поворота тестовой конструкции  $\varphi$ , участвовали 40 испытуемых.

Пол и возрастная динамика не имела целевого значения, так как цель исследования – выявление статистической зависимости иллюзии от геометрических параметров тест-объектов. В связи с этим для получения репрезентативной выборки процентное соотношение мужчин (55.1%) и женщин (44.9%) было относительно небольшим, при этом возраст испытуемых варьировался от 18 до 55 лет.

Тестирования проводились на ПК в естественных условиях, бинокулярно без использования вспомогательных средств. В случае исследований психофизиологических механизмов целесообразно применять дополнительные инструменты. Для подобных исследований в системе тестирования предлагается использование устройства для монокулярного и бинокулярного исследования [14].

4.5. **О б р а б о т к а д а н н ы х.** После проведения тестирования ПО автоматически осуществляет сбор первичных данных отдельно для каждого испытуемого по трем типам теста: тестирование при варьировании параметров ширины полосы  $W$ , параметров угла наклона  $\alpha$

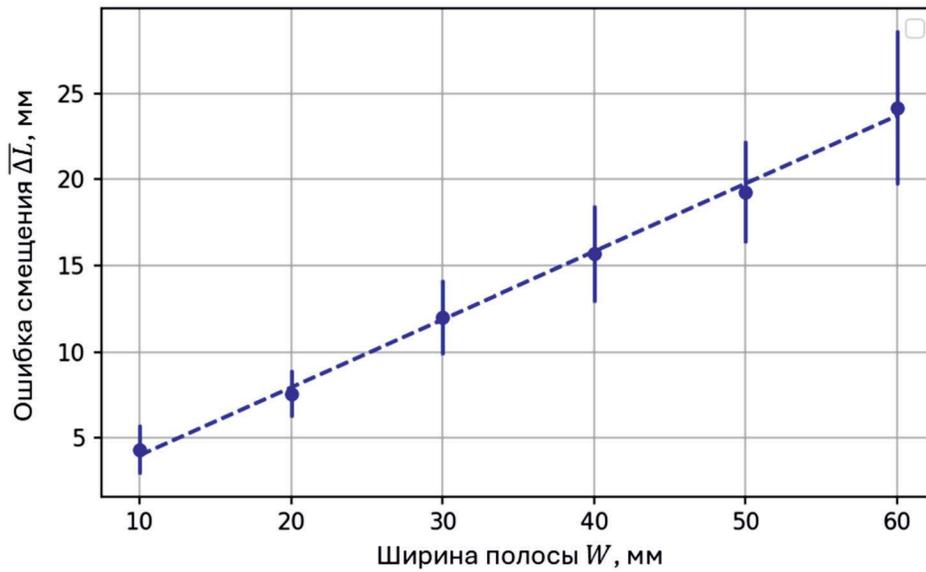


Рис. 14. График зависимости ошибки смещения  $\overline{\Delta L}$  от ширины полосы.

Таблица 1. Форма записи количественной регистрации ошибки смещения  $\Delta L$  от геометрических параметров  $G$  по выборке  $n$

№ п/п	$G_1$	$G_2$	...	$G_k$
1	$\Delta L_{11}$	$\Delta L_{12}$	...	$\Delta L_{1k}$
...	...	...	...	...
$i$	$\Delta L_{i1}$	$\Delta L_{i2}$	...	$\Delta L_{ik}$
...	...	...	...	...
$n$	$\Delta L_{n1}$	$\Delta L_{n2}$	...	$\Delta L_{nk}$
$\Delta L$	$\overline{\Delta L}_1$	$\overline{\Delta L}_2$	...	$\overline{\Delta L}_n$
$S$	$S_1$	$S_2$	...	$S_n$

Таблица 2. Усредненные эмпирические данные  $\overline{\Delta L}$ , зависящие от параметра

№ п/п	$\overline{\Delta L}$	$G$
1	$\overline{\Delta L}_1$	$G_1$
2	$\overline{\Delta L}_2$	$G_2$
...	...	...
$i$	$\overline{\Delta L}_i$	$G_i$
...	...	...
$n$	$\overline{\Delta L}_n$	$G_n$

и поворота тестовой конструкции  $\varphi$ . Для дальнейшего удобства обозначим указанные параметры общей переменной  $G$ .

Предварительная обработка первичных данных осуществляется также ПО и представляет усредненные значения по  $n$  пробам ( $n = 5$ ) выполнения одного и того же задания в одинаковых условиях, т.е. параметры тест-объектов в рамках одного типа тестирования повторялись на протяжении всего тестирования. При этом на данной стадии осуществляется поиск заведомо ошибочных значений  $\Delta L$  и их замена, согласно статистическим стандартам, на средние по соседним значениям:

$$\Delta L_i = \frac{\Delta L_{i-1} + \Delta L_{i+1}}{2}.$$

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

$$\overline{\Delta L} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta L_i,$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta L_i - \overline{\Delta L})^2}.$$

Данные сортируются и формируются в табличном формате для дальнейшей обработки и анализа (табл. 1).

Таким образом, по результатам проведения предварительной и статистической обработки данных конечными значениями для анализа являются зависимая переменная  $\overline{\Delta L}$  (исследуемый процесс), изменяющаяся под влиянием независимого параметра  $G$  (фактор, регрессор) (табл. 2).

4.6. Анализ полученных данных и результаты исследования. Статистически обработанные числовые данные первой серии тестирования представлены в табл. 3, 4. На рис. 14, 15 рассмотрены соответствующие таблицам графики зависимостей ошибок смещения  $\overline{\Delta L}$  от значений ширины полосы  $W$  и угла наклона  $\alpha$ .

Приведенные данные позволяют сделать предположение о том, что ошибка смещения  $\overline{\Delta L}$  возрастает с увеличением ширины полосы  $W$  (рис. 14). Эта зависимость описывается линейной функцией вида  $y = ax + b$ . Для аппроксимации статистических зависимостей и поиска коэффициентов уравнения использовался метод наименьших квадратов:

$$S = \sum_{i=1}^n (y - y_i)^2 \rightarrow \min.$$

Уравнение, описывающее зависимость ошибки смещения, имеет следующий вид:

$$y = 0.39x + 0.04.$$

Для оценки тесноты линейной связи используем линейный коэффициент корреляции Пирсона  $r_{xy}$ :

$$r_{xy} = \frac{cov_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}}^{\frac{1}{2}},$$

где

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

– средние значения выборок  $\overline{\Delta L}$  и  $W$  соответственно.

Коэффициент корреляции  $r_{xy} = 0.9986$ , что свидетельствует о сильной линейной связи между ошибкой смещения  $\overline{\Delta L}$  и шириной полосы  $W$ . Ошибка смещения  $\overline{\Delta L}$  имеет прямую пропорциональную зависимость относительно ширины полосы  $W$ : расширение полосы влечет за собой увеличение ошибок смещений.

Коэффициент детерминации  $R^2$ , определяемый как квадрат коэффициента корреляции  $R^2 = r_{xy}^2 = 0.9973$ , указывает на то, что ошибка смещения  $\overline{\Delta L}$  на 99.73% зависит от значения ширины полосы  $W$ .

Проверим статистическую гипотезу об оценке значимости уравнения. Гипотеза  $H_0$ : ширина полосы  $W$  не влияет существенно на изменения ошибки смещения  $\overline{\Delta L}$ , модель незначима в целом.

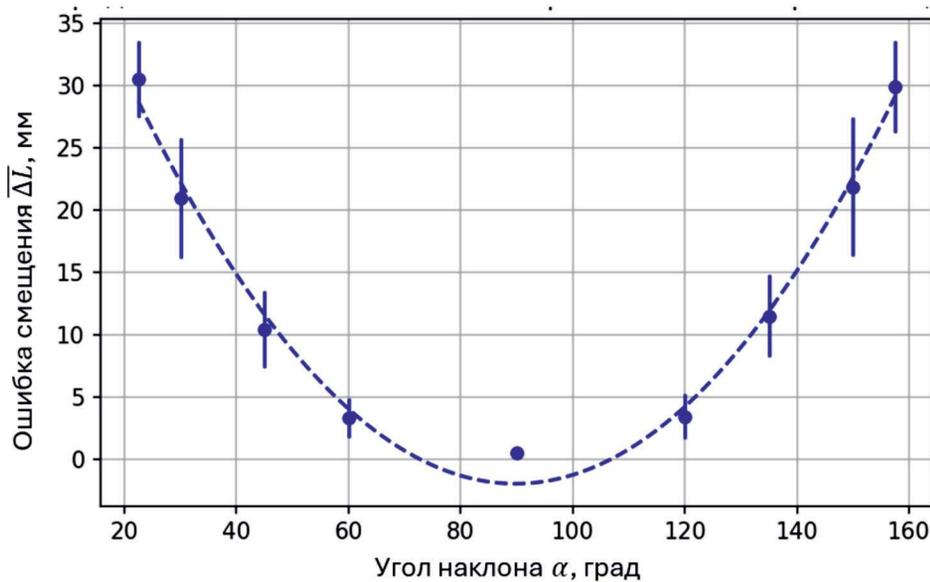


Рис. 15. График зависимости ошибки смещения  $\overline{\Delta L}$  от угла наклона  $\alpha$ .

Таблица 3. Числовые данные средних значений ошибок смещения  $\overline{\Delta L}$  по соответствующим параметрам ширины полосы  $W$

№ п/п	1	2	3	4	5	6
$W$	10	20	30	40	50	60
$\overline{\Delta L}$	4.34	7.58	12.02	15.69	19.29	24.19
$S$	1.44	1.37	2.15	2.81	2.97	4.50

Таблица 4. Числовые данные средних значений ошибок смещения  $\overline{\Delta L}$  по соответствующим параметрам угла наклона прямой  $\alpha$

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\alpha$ , град	22.5	30	45	60	90	120	135	150	157.5
$\overline{\Delta L}$	30.54	20.99	10.42	3.31	0.52	3.44	11.50	21.90	29.94
$S$	3.09	4.85	3.09	1.55	0.40	1.81	3.31	5.59	3.71

Оценка значимости уравнения осуществляется на основе  $F$ -критерия Фишера. Эмпирическое значения критерия определяется формулой

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

Критическое значение  $F_{\text{эмп}}$  (при  $\alpha = 0.01$ ,  $k_1 = 1$ ,  $k_2 = 4$ ) задается по известным статистическим таблицам, где  $k_1$  – число независимых переменных в уравнении, а  $k_2 = n - 2$  разница наблюдений и количества оцениваемых параметров в модели. Гипотеза  $H_0$  принимается при  $F_{\text{эмп}} \leq F_{\text{крит}}$ . Рассчитанное значение  $F_{\text{эмп}} = 1477.48 > F_{\text{крит}} = 21.20$ , что позволяет опровергнуть гипотезу и сделать вывод о статистической значимости, полученной модели.

На рис. 15 представлен график зависимости ошибок смещения  $\overline{\Delta L}$  от угла наклона  $\alpha$ . Полученные данные представляют собой нелинейную зависимость в параболической форме и описываются уравнением

$$\hat{y} = 0.01x^2 - 1.22x + 52.73.$$

Для оценки тесноты нелинейной связи используем индекс корреляции  $R$ , определяемый как

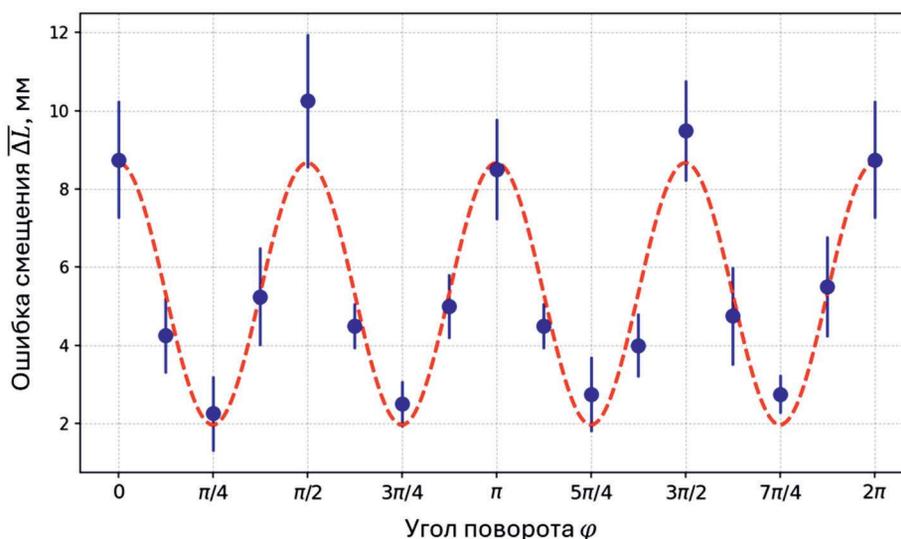


Рис. 16. График зависимости ошибки смещения  $\Delta L$  от угла поворота тест-объекта  $\varphi$ .

$$R = \sqrt{1 - \frac{SS_e}{SS}} = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}},$$

где  $y$  – расчетные значения зависимой переменной по нелинейной регрессии.

Построенная модель ошибки смещения  $\Delta L$  на 98.58% объясняется изменением угла  $\alpha$  наклона линии (индекс детерминации  $R^2 = 0.9858$ ), при этом существует практически функциональная зависимость ошибки  $\Delta L$  от параметра  $\alpha$  (индекс корреляции  $R = 0.9928$ ). Ошибка смещения  $\Delta L$  возрастает при увеличении остроты угла наклона прямой: чем острее угол  $\alpha$  относительно полосы, тем «ярче» выражена ошибка смещения  $\Delta L$ . Проверка статистической гипотезы о значимости полученного уравнения по  $F$ -критерию Фишера свидетельствует об адекватности модели:

$$F_{\text{эмп}} = 208.27 > F_{\text{крит}} = 13.74 \quad (\text{при } \alpha = 0.01, k_1 = 1, k_2 = 6).$$

Результаты второй серии тестирования (рис. 16), направленной на выявление зависимости ошибок смещения  $\Delta L$  относительно ориентации  $\varphi$  всей тестовой фигуры, позволяют сделать предположение о нелинейной периодической зависимости следующего вида:

$$y = A \cos(Bx + C) + D.$$

Используя метод наименьших квадратов, получили уравнение, описывающее статистическую зависимость  $\Delta L$  от  $\varphi$ :

$$\hat{y} = 3.367 \cos(3.964x + 1.745) + 5.341.$$

Тригонометрическая модель ошибки смещения  $\Delta L$  на 92.05% объясняется изменением угла поворота всей тестовой конструкции (индекс детерминации  $R^2 = 0.9205$ ), при этом рассчитанный индекс корреляции  $R = 0.9594$  указывает на сильную связь между ошибкой смещения  $\Delta L$  и углом поворота  $\varphi$ . Данная зависимость демонстрирует  $\pi/2$ -периодичность, где ярко выражены экстремумы ошибки смещения  $\Delta L$  (4 max и 4 min). Периодика иллюзии наблюдается в пределах значений  $\varphi [0; \pi/2]$ , т.е. в соответствии с угловыми четвертями координатной плоскости. Точки максимумов фиксируются на границах этих периодов, когда поворот тест-объекта достигает ориентации, при которой полоса принимает горизонтальное и вертикальное положения.

Внутри каждого периода фиксируется также точка минимума, характеризующая ситуацию, когда горизонтальное и вертикальное положения принимает прямая. Поэтому, в отличие от

максимумов, минимумы иллюзии меняют свое положение в зависимости от заданного значения угла  $\alpha$  между прямой и полосой.

Проверка статистической гипотезы о значимости найденного уравнения по  $F$ -критерию Фишера также свидетельствует об адекватности полученной модели:

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

**Заключение.** Отметим, что построенная система помогает в исследовании зрительных иллюзий, в частности предоставляет управление собранными данными во время проведения тестирования. Данная система также автоматизирует сбор и обработку данных, формируя полученные данные в удобный для исследователей вид. Система является гибкой и расширяемой, предполагается возможность подключения дополнительных модулей для исследования различного класса иллюзий. Модель данной системы также подразумевает различные формы работы с ней, в том числе дистанционные. Дистанционная работа системы допускает как централизованную установку сервера, так и использование распределенных серверов системы. Проблемы, связанные с построением распределенных автоматизированных научных систем, в частности, представлены в работе [16] и могут быть предметом дальнейшего исследования.

Применение системы позволило проанализировать иллюзию Поггендорфа и определить статистическую зависимость ошибок смещения от геометрических параметров тест-объектов. Ошибка смещения, порождаемая иллюзией, линейно зависит от ширины полосы: с увеличением ширины прямо пропорционально возрастает ошибка. Относительно угла наклона прямой ошибка нелинейна и повышается с увеличением остроты. Данные выводы подтверждают ранее полученные результаты [11, 17], что свидетельствует о воспроизводимости исследования, проведенного с помощью данной системы.

В продолжении работы [17] был изучен ориентационный параметр тест-объекта, влияющий на ошибку смещения. Выявлено, что иллюзия при среднем параметре ширины полосы и угла наклона прямой существует при любой конфигурации ориентационного параметра тест-объекта. При этом точки максимума в ошибке соответствуют горизонтальной и вертикальной ориентациями полосы, а точки минимума — горизонтальной и вертикальной ориентациями линии. Даная модель зависимости описывается уравнением нелинейной регрессии тригонометрического вида.

Полученные результаты могут иметь практическое применение в области дизайна одежды, оборудования и архитектурных элементов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барabanov P. E.* Психологические механизмы зрительного восприятия формы и пространства // Психология. Историко-критические обзоры и современные исследования. 2023. Т. 12. № 8А. С. 64–75.
2. *Бондарко В. М., Данилова М. В., Солнушкин С. Д., Чихман В. Н.* Моделирование зрительного восприятия с использованием нейрофизиологических механизмов // Тез. XXIV съезда физиологического общества им. И.П. Павлова. Санкт-Петербург: ООО «Издательство ВВМ», 2023.
3. *Винокур А. И.* Искусственный интеллект. Свойства зрительного восприятия и компьютерное зрение // Шаг в будущее: искусственный интеллект и цифровая экономика. Технологическое лидерство: взгляд за горизонт: IV Междунар. научного форума. М.: Государственный университет управления, 2021.
4. *Тумова М. А., Шошина И. И., Становая В. В., Гусейнова З. Т., Фернандес Т. П., Иванов М. В.* Показатели когнитивного функционирования и характеристики зрительной системы при шизофрении: кросс-секционное исследование // Психиатрия. 2023. Т. 21, № 3. С. 36–44.
5. *Толанский С.* Оптические иллюзии. М.: Мир, 1967.
6. *Горбунов, И. А., Мамаев А. Н.* Моделирование некоторых зрительных иллюзий на базе нейросетевых алгоритмов // Тр. VIII Всероссийск. конф. Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2023.
7. *Медведев Л. Н., Шошина И. И.* Количественная оценка влияния пола и типа межполушарной асимметрии на искажение зрительного восприятия фигуры Поггендорфа в модификации Джастроу // Физиология человека. 2004. Т. 30. № 5. С. 5–11.
8. *Медведев Л. Н., Шошина И. И.* Количественная оценка влияния пола и типа межполушарной асимметрии на искажение зрительного восприятия фигуры Поггендорфа в модификации Джастроу // Физиология человека. 2004. Т. 30. № 5. С. 5–11.
9. *Медведев Л. Н., Шошина И. И., Федорова Е. С.* Отражение в вызванном потенциале процессов зрительного восприятия фигуры Поггендорфа // Журн. высш. нервн. деятельности им. И.П. Павлова. 2011. Т. 61. № 1. С. 61–66.

10. *Романова-Африкантова, Н. И.* Сенсомоторная оценка зрительных иллюзий детьми дошкольного и младшего школьного возраста в сравнении со взрослыми // Человек в информационном обществе: матер. второй междунар. науч.-практ. конф. Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2023.
11. *Шошина И. И.* Влияние пола и возраста на зрительное искажение фигуры Поггендорфа (в модификации Джастроу) у правой и левой: Дис. ... канд. биол. наук : 03.00.13 : Томск, 2005. 133 с. РГБ ОД, 61:05-3/1355.
12. *Чихман В.Н., Солнушкин С.Д., Пронин С.В., Шелепин Ю.Е., Бондарко В.М.* Информационные технологии зрительного эксперимента // Экспериментальная психология в России: традиции и перспективы. 2010. С. 189–194.
13. *Горшков В. В. Костоев А.Т.* Система для тестирования зрительного восприятия в условиях возникновения иллюзий // Патент РФ на изобретение № 2786961 С1, 26.12.2022.
14. *Горшков В. В. Костоев А.Т.* Устройство для определения величины зрительных иллюзий // Патент РФ на полезную модель № 208910 У1, 21.01.2022.
15. *Айдоган Г. Сюло Р., Сюмер Х. и др.* Система определения зрительного восприятия // Патент РФ на изобретение № 2663639 С2, 07.08.2018.
16. *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.
17. *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.
18. *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.
19. *Булатов А., Бертулис А., Гутаускас А., Булатова Н.* Размеры стимула и выраженность зрительной иллюзии протяженности // Физиология человека. 2010. Т. 36. № 2. С. 50–63.
20. *Бондарко В. М., Бондарко Д. В., Чихман В. Н.* Зависимость иллюзии Оппель-Кундта от конфигурации составляющих линий // Экспериментальная психология. 2016. Т. 9. № 3. С. 27–40.
21. *Костоев А.Т., Николаева Е.А.* // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022683021, 30.11.2022.