

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ.  
ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

DOI: 10.6060/ivecofin.2023562.647

УДК: 004.353.254

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В ЯЧЕЙКЕ ЗНАКОМЕСТО  
ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ДИСПЛЕЯ БРАЙЛЯ И ИЗУЧЕНИЕ ЕЕ СВОЙСТВ****А.И. Самсонова, Е.С. Константинов**

Алёна Ивановна Самсонова, Евгений Сергеевич Константинов  
Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, 153000, Россия  
E-mail: alenyshka.2016.samsonova@mail.ru, jskonst@ya.ru

*В работе представлен результат исследования возможности использования ферромагнитной жидкости в качестве основного материала технологии для создания ячейки знакоместа дисплея Брайля. Приводится описание свойств ферромагнитной жидкости и ее преимуществ перед традиционными материалами, используемыми для создания дисплеев Брайля. В частности, отмечается более высокая чувствительность и быстрота реакции на сигналы. Рассматриваются экспериментальные исследования для последующего использования в прототипе дисплея Брайля на основе ферромагнитной жидкости, для подтверждения эффективности ее применения. Авторами исследования сделан вывод о перспективности применения ферромагнитной жидкости в качестве основного материала для ячеек знакоместа дисплеев Брайля. Таким образом, использование ферромагнитной жидкости в ячейке знакоместа для создания дисплея Брайля представляет собой перспективное направление развития технологий для людей с ограниченными возможностями зрения, а также может иметь широкий спектр применения в других областях технологий.*

**Ключевые слова:** ферромагнитная жидкость, дисплей Брайля, ячейка знакоместо, аппаратно-программный комплекс, разработка, моделирование.

**THE USE OF FERROMAGNETIC LIQUID IN A CELL IS FAMILIAR FOR CONSTRUCTING  
A BRAILLE DISPLAY AND STUDYING ITS PROPERTIES****A.I. Samsonova, E.S. Konstantinov**

Alena I. Samsonova, Evgeniy S. Konstantinov  
Ivanovo State University of Chemistry and Technology, 7 Sheremetevsky Ave., Ivanovo, 153000 Russia  
E-mail: alenyshka.2016.samsonova@mail.ru, jskonst@ya.ru

*The paper presents the study result of the possibility of using ferrofluid as the main material of technology for creating a Braille display familiarity cell. A description of ferrofluid properties and its advantages over traditional materials used to create Braille displays is given. There is a higher sensitivity and speed of response to signals. Experimental studies are considered for subsequent use in a Braille display prototype based on a ferromagnetic fluid, to confirm the effectiveness of its application. The authors of the study concluded that the use of ferromagnetic fluid is promising as the main material for cells of the familiarity of Braille displays. Thus, the use of a ferrofluid in a familiarity cell to create a Braille display is a promising direction in the development of technologies for people with visual impairments and can also have a wide range of applications in other technology areas.*

**Keywords:** ferrofluid, Braille display, familiarity cell, hardware and software complex, development, modeling.

**Для цитирования:**

Самсонова А.И., Константинов Е.С. Использование ферромагнитной жидкости в ячейке знакоместо для построения дисплея Брайля и изучение ее свойств. *Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством» [Ивэкофин]*. 2023. №02(56). С.89-95. DOI: 10.6060/ivecofin.2023562.647

**For citation:**

Samsonova A.I., Konstantinov E.S. The use of ferromagnetic liquid in a cell is familiar for constructing a Braille display and studying its properties. *Ivecofin*. 2023. N 02(56). С.89-95. DOI: 10.6060/ivecofin.2023562.647 (in Russian)

## ВВЕДЕНИЕ

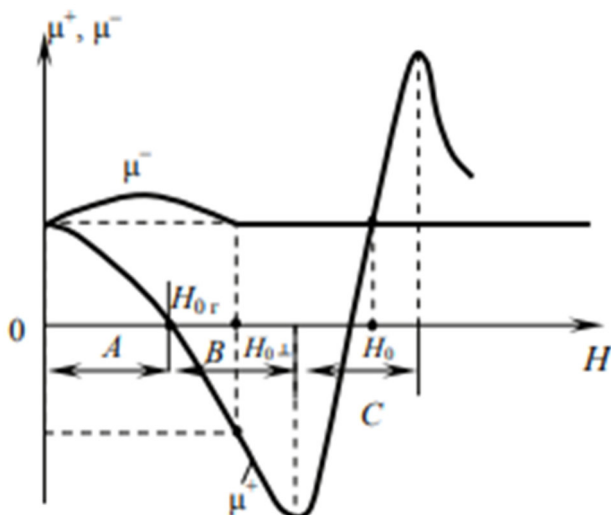
Ферромагнитная жидкость (ФЖ) – это коллоидная смесь наночастиц магнитных веществ, таких как металлические ферромагнитные частицы, имеющих размер от 10 до 20 нм, находящихся в расплавленном магнитном матриксе, распределенных в жидкости на микро- и наномасштабах. В зависимости от состава и размера частиц, ФЖ могут проявлять различные магнитные свойства, такие как магнитная восприимчивость, которая достигает  $10^6$ - $10^7$  см/моль, что позволяет ей легко реагировать на магнитное поле, магнитная вязкость, которая определяет скорость изменения магнитного момента частицы при воздействии на нее магнитного поля, магнитная анизотропия и т.д. ФЖ также обладает высокой электропроводностью и термической стабильностью, что делает ее устойчивой к высоким температурам и обеспечивает ее долговечность. В настоящее время, ферромагнитная жидкость имеет широкий потенциал для использования в различных областях, включая медицину, электронику, робототехнику и многие другие. Она может быть использована, например, для создания "жидких линз", которые могут изменять форму и фокусировать свет, что может применяться в оптических системах. Также, ферромагнитная жидкость может использоваться для создания различных типов датчиков и актуаторов.

Целью данной работы является изучение свойств ферромагнитной жидкости и ее использование в ячейке знакоместо для построения дисплея Брайля. Конкретные задачи работы включают в себя:

- изучение основных свойств ферромагнитной жидкости;
- изучение процессов изменения свойств ферромагнитной жидкости под воздействием электромагнитного поля;
- разработка ячейки знакоместо на основе ферромагнитной жидкости;
- проведение экспериментов для оценки эффективности работы дисплея Брайля на основе ферромагнитной жидкости.

Одним из наиболее интересных и перспективных применений ферромагнитной жидкости является ее использование в технологии построения дисплеев для незрячих людей, которые отображают символы Брайля на поверхности. Ферромагнитная жидкость в таких дисплеях используется для создания магнитных пикселей, которые могут быть управляемыми магнитными полями. Магнитная вязкость определяет скорость изменения формы точек при изменении направления магнитного поля. Исследования показали, что магнитная вязкость ФЖ может изменяться под воздействием различных факторов, таких как температура, сила магнитного поля, давление и т.д. Например, устройства на основе ФЖ могут иметь разрешение до 1000 точек на дюйм, что в 10 раз выше, чем у традиционных дисплеев Брайля на основе пьезоэлектрических элементов. Это позволяет создавать дисплеи с более высокой четкостью и более точным отображением текста, что делает их более доступными для людей с нарушениями зрения. Такие дисплеи обладают высокой разрешающей способностью и могут отображать буквы, цифры и другие символы, что делает их весьма полезными для незрячих людей.

Как показали экспериментальные исследования [15], метод реализующее устройство позволяют повысить точность определения диэлектрической проницаемости ФМЖ 15–20 % и концентрации ФМЧ 16–21 % за счет учета в измерениях мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости ФМЖ, взаимодействие линейно поляризованной жидкости происходит в присутствии постоянного магнитного поля, направление вектора, напряженности которого совпадает с направлением распространения электромагнитных волн. В результате такого взаимодействия при Н0 в зоне А (рис. 1) наблюдается явление поворота плоскости поляризации (эффект Фарадея) электромагнитной волны. По результатам проведенных экспериментальных исследований [15-18] была подтверждена возможность использования ферромагнитной жидкости в качестве материала для создания ячеек знакоместо дисплея Брайля.



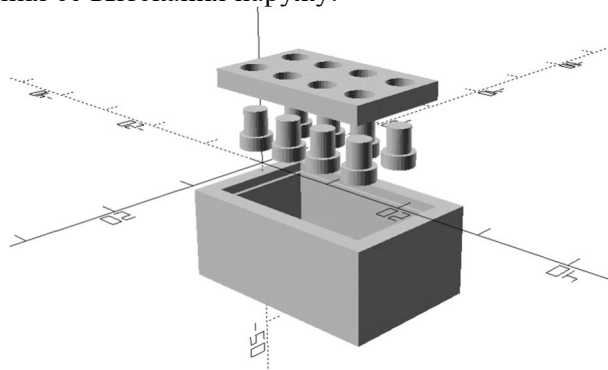
**Рисунок 1. Зависимости нормированных магнитных проницаемостей левополяризованной и правополяризованной волн  $\mu^+$  и  $\mu^-$  от напряженности постоянного магнитного поля  $H_0$**   
**Figure 1. Dependences of the normalized magnetic permeability of the left-polarized and right-polarized waves  $\mu^+$  and  $\mu^-$  on the strength of the constant magnetic field  $H_0$**

Использование технологии построения дисплея на основе ферромагнитной жидкости — это инновационный подход к обеспечению доступа к информации для незрячих людей. Эта технология имеет достаточно низкую стоимость и относительно проста в использовании, что делает ее доступной для широкой аудитории. Дисплей Брайля является важным устройством для людей с ограниченными возможностями зрения, которые нуждаются в специальном средстве для работы с текстовыми документами и другими информационными ресурсами [1]. Брайлевская строка или строка вывода текста является ключевым элементом дисплея, необходимым для отображения текстовых документов и другой информации в режиме реального времени. Дисплеи Брайля могут быть портативными или стационарными, и могут использоваться для чтения книг, просмотра веб-страниц, редактирования текста и других операций с текстовой информацией. Кроме того, дисплеи Брайля могут быть использованы для обучения чтению и письму детей с ограниченными возможностями зрения. Для этого используются специальные программы, которые помогают детям осваивать язык Брайля и научиться читать, и писать [2-5]. Однако, несмотря на все преимущества, дисплеи Брайля имеют некоторые ограничения. В частности, они обычно довольно дорогие, что может стать препятствием для многих людей с ограниченными возможностями зрения. В исследованиях было показано, что дисплеи Брайля на основе

ФЖ имеют более быстрое время отклика, чем дисплеи на основе пьезоэлектрических элементов. Это значительно улучшает скорость чтения для пользователей. Ферромагнитные жидкости представляют собой суспензии магнитных наночастиц в жидком носителе. Дисплеи Брайля на основе ФЖ состоят из ячеек знакомест, в которых магнитные наночастицы ферромагнитной жидкости располагаются между двумя электродами, создавая таким образом выпуклые и вогнутые точки в зависимости от направления магнитного поля. При применении электрического напряжения к электродам направление магнитного поля меняется, что приводит к изменению формы точек и, следовательно, к появлению тактильного ощущения для человека.

Дисплей состоит из ячеек Брайля, которые представляют собой пластину с дренажными отверстиями, через которые формируется символ. Каждый символ состоит из 8 точек, расположенных в 2 вертикальных рядах, которые могут быть поднятыми или опущенными. Если точки подняты, то прикосновение пальцев к ячейке дает возможность читать соответствующий символ Брайля. Каждый символ в языке Брайля представляется комбинацией точек, которые подняты (выпуклы) или опущены (вогнуты) в определенной последовательности.

Для разработки ячейки знакоместо было выполнено построение трехмерной модели (рис. 2), которая состоит из трех основных компонентов: корпуса, кнопок и крышки. Корпус представляет собой емкость, заполненную ферромагнитной жидкостью. Он служит для удержания жидкости внутри ячейки и предотвращения ее вытекания наружу.



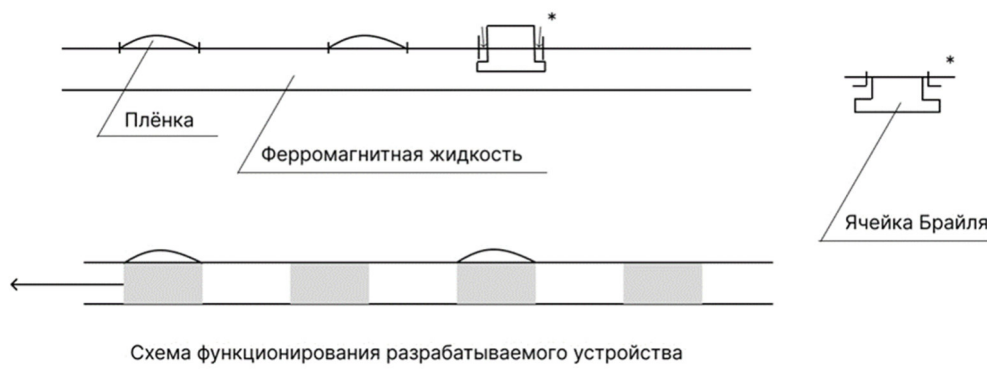
**Рисунок 2. 3D модель ячейки (знакоместо)**  
**Figure 2. 3D model of the cell (character cell)**

Кнопки представляют собой тонкие металлические пластины, которые установлены на дне корпуса. Они используются для формирования символов Брайля. Крышка служит для защиты кнопок и корпуса от внешних воздействий и удерживается на месте с помощью магнитов или других методов крепления. Для построения модели ячейки использовалось программное обеспечение OpenSCAD [14], которое является открытой

системой автоматического проектирования (САПР), позволяющей создавать трехмерные объекты с использованием параметрического подхода. В системе OpenSCAD используется метод моделирования - конструктивная сплошная геометрия, который позволяет получить модель с высокой точностью вычисления физических свойств. Построение трехмерной модели ячейки заключается в пошаговом выполнении булевых операций, таких как объединение, вычитание и пересечение. Таким образом, модель ячейки Брайля может быть создана в OpenSCAD с помощью комбинации различных операций.

Для обеспечения высокой производительности дисплеев Брайля на основе данной технологии необходимо обеспечить быстрое и точное изменение формы точек при изменении направления магнитного поля для этой цели была разработана структурная схема функционирования

устройства (рис. 3). Увеличения скорости изменения формы точек является управление магнитной вязкостью ФЖ под воздействием электромагнитного поля. Ферромагнитная жидкость в ячейке знакоместа дисплея Брайля может изменять свою форму и свойства под действием электромагнитного поля. Для достижения этого необходимо подавать на жидкость определенные значения напряжения. Исследования показывают, что для изменения формы жидкости и создания выпуклых или вогнутых выпуклостей на поверхности дисплея Брайля, необходимо приложить напряжение в диапазоне от 0,1 до 1 Вольта. При этом, чем больше напряжение, тем более ярко выраженный эффект можно получить. Характеристики электромагнитного поля, необходимого для изменения формы ферромагнитной жидкости в ячейке знакоместа, также могут варьироваться в зависимости от свойств самой жидкости.



**Рисунок 3. Структурные схемы разрабатываемого устройства**  
**Figure 3. Block diagrams of the device under development**

Например, для жидкости на основе магнитных частиц размером 10 нм и плотностью  $1,3 \text{ г/см}^3$ , требуется создание электромагнитного поля с индукцией 50 мТл и частотой 50 Гц. Для достижения эффекта изменения формы и свойств ферромагнитной жидкости в ячейке знакоместа дисплея Брайля, необходимо учитывать как значения напряжения, так и характеристики электромагнитного поля, что может быть учтено в процессе разработки соответствующей системы управления.

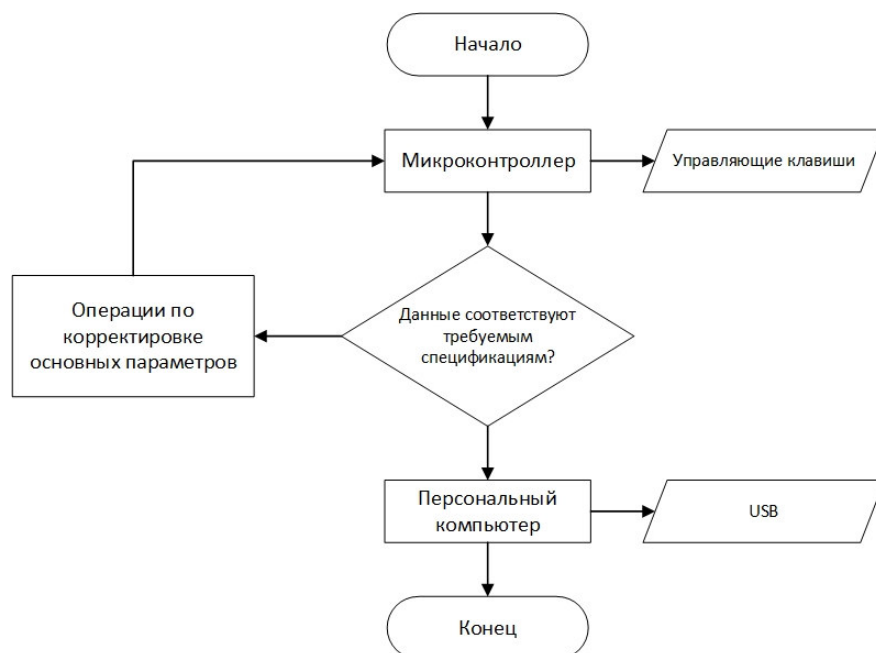
Для разработки аппаратно-программного комплекса был спроектирован алгоритм, который представляет собой блок-схему функционирования ключевых блоков разрабатываемого устройства. Планируется что устройство, будет позволять вводить и выводить информацию с помощью тактильных ячеек на специальном дисплее. Эти ячейки создаются за счет печати на плате катушек, которые создают слабое электромагнитное поле, изменяя форму ферромагнитной жидкости и образуя таким образом тактильную ячейку.

Одной из особенностей данного устройства является возможность увеличения количества тактильных ячеек за счет изменения размеров ячеек [6-7]. Это позволяет регулировать размер дисплея устройства под нужные габариты, что делает его более гибким в использовании. Для обработки и представления текстовой информации устройство соединяется с мобильными устройствами и работает на персональных компьютерах под управлением операционных систем Windows или Linux. Для оптимальной производительности рекомендуется использование компьютеров с оперативной памятью не менее 4ГБ и процессорами с тактовой частотой 3.3 ГГц или выше. Рекомендуется также использовать дисковую подсистему SSD. Аппаратно-программный комплекс включает в себя несколько блоков. Блок микроконтроллера является основным управляющим элементом устройства и отвечает за обработку и хранение информации, полученной от блока, отвечающего за верификацию данных. Блок верификации данных отвечает за проверку

правильности ввода данных, и в случае ошибки отправляет соответствующее сообщение на экран дисплея. Блок, передающий информацию в персональный компьютер, осуществляет передачу обработанных данных на компьютер пользователя, что позволяет сохранять и анализировать полученную информацию [8, 9]. Одной из главных задач разработанного устройства является обеспечение максимально комфортного и безопасного

использования для пользователей. Для этого предусмотрены следующие меры:

- Использование магнитного поля слабой интенсивности, что исключает негативное воздействие на здоровье пользователя;
- Разработка удобного и интуитивно понятного интерфейса, что позволяет пользователям быстро и легко освоить работу с устройством.



**Рисунок 4. Алгоритм функционирования аппаратно-программного комплекса**  
**Figure 4. Functioning algorithm of the hardware and software complex**

Таким образом, разработанное устройство представляет собой технологию, которая позволяет получить большее количество информации с помощью дисплея за счет увеличения количества тактильных ячеек и изменения размеров дисплея под нужные габариты. Кроме того, устройство может использоваться совместно с мобильными устройствами, что расширяет сферу его применения. Преимущества разработанного устройства заключаются в его удобстве и функциональности. Устройство может быть использовано на маломощных ПК, что позволяет получить доступ большему числу пользователей [10-13].

Наш проект также включает создание программного обеспечения для управления устройством и обработки вводимой и выводимой информации. Это программное обеспечение будет иметь графический интерфейс пользователя и будет предоставлять возможность настройки параметров устройства, например, размера ячеек, частоты обновления, цветовой схемы и т.д. Оно также будет обеспечивать возможность подключения к мобильным устройствам и передачи тек-

стовой информации на устройство для отображения. Для управления ячейкой Брайля необходима электроника. Для этого была использована плата Arduino Uno, которая может контролировать до 12 ячеек Брайля. Arduino Uno оснащена микроконтроллером ATmega328P и имеет цифровые входы и выходы, а также аналоговые входы и выходы, которые могут использоваться для управления ячейками Брайля.

Код для управления ячейкой Брайля был написан на языке программирования Python и загружен на плату Arduino. Для управления ячейкой Брайля используется библиотека BrailleDisplay, которая позволяет отображать символы на ячейке Брайля. Библиотека обеспечивает возможность управления ячейками Брайля, включая отображение символов, скроллинг и прокрутку текста.

Полученная трехмерная модель ячейки Брайля была распечатана с помощью 3D-принтера. Для этого использовался PLA-пластик, который хорошо подходит для создания деталей, так как имеет высокую прочность и легко обрабатывается. Было распечатано несколько ячеек Брайля, которые затем были собраны в единую конструкцию.

После того, как ячейки Брайля были собраны в единую конструкцию, было необходимо проверить их работоспособность. Для этого была написана программа на языке Python, которая генерировала случайные символы и отображала их на ячейке Брайля. Также были написаны программы для отображения текстовых документов на ячейке Брайля и для управления скроллингом и прокруткой текста. В итоге была создана работающая модель ячейки Брайля, которая может использоваться для чтения текстовых документов и другой информации. Эта модель может быть использована людьми с ограниченными возможностями зрения в качестве специального средства для работы с информационными ресурсами.

#### ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Из исследования свойств ферромагнитной жидкости для использования в ячейке знакоместа дисплея Брайля показывают, что это новый и перспективный материал, который обладает рядом уникальных свойств. Результаты работы позволяют сделать вывод о том, что ферромагнитная жидкость может быть эффективно использована для построения дисплея Брайля. Это было продемонстрировано в эксперименте, где созданный дисплей был в состоянии передавать брайлевские символы с высокой точностью и скоростью. Также было обнаружено, что свойства ферромагнитной жидкости могут быть изменены под воздействием электромагнитного поля. Отрицательное влияние на ее свойства проявляется при напряжении более 12 В, что может привести к потере качества отображения на дисплее. Однако,

несмотря на эти ограничения, ферромагнитная жидкость все еще представляет собой перспективный материал для использования в дисплее Брайля, благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая чувствительность к магнитному полю и возможность быстрой и точной передачи брайлевских символов. Это может улучшить жизнь людей с ограниченными возможностями зрения и дать им больше возможностей для обучения и коммуникации в современном мире. Применение ферромагнитной жидкости в качестве основного материала для ячеек знакоместа дисплеев Брайля имеет потенциал для достижения значительной экономической эффективности. Одним из главных преимуществ использования ферромагнитной жидкости является ее низкая стоимость производства по сравнению с традиционными материалами, такими как металлы и полимеры. Кроме того, использование ферромагнитной жидкости позволяет создавать более компактные и легкие ячейки знакоместа, что также снижает стоимость производства и транспортировки устройств. Более высокая чувствительность и быстрота реакции на сигналы также позволяет уменьшить количество деталей, необходимых для производства дисплея Брайля, что снижает затраты на производство и сборку.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare no conflict of interest.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ермолаев М.Б., Хомякова А.А., Белова А.Д., Серкова Ю.А. Разработка алгоритма интеллектуальной поддержки принятия решений на базе системного подхода. *Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством» [Ивэкофин]*. 2022. № 01(51). С.138-146. DOI: 10.6060/ivecofin.2022511.594.
2. Барабанова Е.А., Гранкин С.С., Шапошникова Н.И. Многоязычное устройство вывода информации для людей с проблемами зрения. *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета*. 2016. № 4 (65). С. 110-120.
3. Гуторова Н.В., Дашкевич И.П., Зелинская В.А. Азбука Брайля для незрячих – ключ к грамотности и независимости. *В сб. научных публикаций «Актуальные проблемы инклюзии: качество жизни, безбарьерная среда, образование без границ»*. М.: Московский государственный университет дизайна и технологии. 2016. С. 127-130.
4. Бобко Р.А., Чепинский С.А. Модель конструкции мультистрочного дисплея Брайля. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2020. Т. 20. № 5. С. 761-766. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-5-761-7663.
5. Сайт «Доступная Страна». <https://dostupnaya-strana.ru/>.

#### REFERENCES

1. Ermolaev M.B., Khomyakova A.A., Belova A.D., Serkova Yu.A. Development of an intelligent decision support algorithm based on a systematic approach. *Ivecofin*. 2022. N 01(51). P.138-146. DOI: 10.6060/ivecofin.2022511.594. (in Russian).
2. Barabanova E.A., Grankin S.S., Shaposhnikova N.I. A multilingual output device for people with vision problems. *Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*. 2016. N 4 (65). P. 110-120. (in Russian).
3. Gutorova N.V., Dashkevich I.P., Zelinskaya V.A. Braille for the blind is the key to literacy and independence. A collection of scientific publications «Actual problems of inclusion: quality of life, barrier-free environment, education without borders». Moscow: Moscow State University of Design and Technology. 2016. P. 127-130. (in Russian).
4. Bobko R.A., Chepinsky S.A. Design model of a multi-line Braille display. *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics, and optics*. 2020. Vol. 20. N 5. P. 761-766. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-5-761-7663. (in Russian).
5. Website "Accessible Country". <https://dostupnaya-strana.ru/>. (in Russian).



6. **Крюкова Ю.А.** Реализация проекта «Мир на кончиках пальцев». В сб. статей «Актуальные проблемы социогуманитарного образования». Екатеринбург: ИД «Ажур». 2016. С. 122-125.
7. **Astrakhantseva I.A., Astrakhantsev R.G., Mitin A.V.** Randomized C/C++ dynamic memory allocator. *Journal of Physics: Conference Series*: 2. Moscow. 2021. P. 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/2001/1/012006. EDN POZQDG.
8. **Bobkov S., Galiaskarov E., Astrakhantseva I.** The use of cellular automata systems for simulation of transfer processes in a non-uniform area. *CEUR Workshop Proceedings*. Moscow: 2021. 42. EDN WZKNHE.
9. **Mizgirev L., Galiaskarov E., Astrakhantseva I., Bobkov S., Astrakhantsev R.** Transfer learning for road-based location classification of non-residential property. *CEUR Workshop Proceedings*. Moscow: 2021. 03. EDN NQTBDE.
10. **Бобков С.П., Астраханцева И.А.** Использование вероятностных клеточных автоматов для моделирования течения жидкости. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2022. № 2(70). С. 47-54. DOI: 10.6060/snt.20227002.0006. EDN ZMAHGM.
11. **Бобков С.П., Астраханцева И.А.** Применение агентного подхода для моделирования процессов теплопроводности. *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. 2022. № 2. С. 58-66. DOI: 10.17588/2072-2672.2022.2.058-066. EDN RWGSSW.
12. **Rafael C. Gonzalez, Richard Eugene Woods, Steven L. Eddins.** Digital Image Processing Using MATLAB. Dorsing Kindersley. 2004. 620 p.
13. Сайт «OpenSCAD». <http://openscad.org/about.html>.
14. **Котов И.О., Чернышов В.Н.** СВЧ-метод и устройство определения электрофизических параметров ферромагнитных жидкостей на базе критичного волновода. *Вестник ТГТУ*. 2010. Том 16. № 2. С.303-313.
15. **Федюнин П.А., Дмитриев Д.А.** Волноводные методы неразрушающего контроля параметров и свойств материалов в прикладной электродинамике: монография. Тамбов: Тамб. высш. воен. авиац. инженер. уч-ще радиоэлектроники (воен. ин-т). 2006. 406 с.
16. Котов И.О. Методические основы проектирования первичных измерительных преобразователей состава и свойств жидких сред на отрезках металлических волноводов. Общая классификация. М.: Деп. Центральный справочно-информационный фонд МО РФ. 17.11.2008. № В6943.
17. **Котов И.О.** Измерение диалектической проницаемости жидких сред по критической длине волны. В сб. «Наука и устойчивое развитие общества. Наследие В.И. Вернадского» 3-й Межд. конференции. Тамбов: ТГТУ. 2008. С. 193–195.
6. **Kryukova Yu.A.** Implementation of the project "World at your fingertips". *A collection of articles «Actual problems of socio-humanitarian education»*. Yekaterinburg: Publishing House "Azhur". 2016. P. 122-125. (in Russian).
7. **Astrakhantseva I.A., Astrakhantsev R.G., Mitin A.V.** Randomized C/C++ dynamic memory allocator. *Journal of Physics: Conference Series*: 2. Moscow. 2021. P. 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/2001/1/012006. EDN POZQDG.
8. **Bobkov S., Galiaskarov E., Astrakhantseva I.** The use of cellular automata systems for simulation of transfer processes in a non-uniform area. *CEUR Workshop Proceedings*. Moscow: 2021. 42. EDN WZKNHE.
9. **Mizgirev L., Galiaskarov E., Astrakhantseva I., Bobkov S., Astrakhantsev R.** Transfer learning for road-based location classification of non-residential property. *CEUR Workshop Proceedings*. Moscow: 2021. 03. EDN NQTBDE.
10. **Bobkov S.P., Astrakhantseva I.A.** Using probabilistic cellular automata to simulate fluid flow. *Modern science-intensive technologies. Regional application*. 2022. N 2(70). P. 47-54. DOI: 10.6060/snt.20227002.0006. EDN ZMAHGM. (in Russian).
11. **Bobkov S.P., Astrakhantseva I.A.** Application of the agent approach for modeling heat conduction processes. *Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2022. N2. P. 58-66. DOI: 10.17588/2072-2672.2022.2.058-066. EDN RWGSSW. (in Russian).
12. **Rafael C. Gonzalez, Richard Eugene Woods, Steven L. Eddins.** Digital Image Processing Using MATLAB. Dorsing Kindersley. 2004. 620 p.
13. Website "OpenSCAD". <http://openscad.org/about.html>. (in Russian).
14. **Kotov I.O., Chernyshov V.N.** Microwave method and device for determining the electrophysical parameters of ferromagnetic fluids based on a critical waveguide. *Bulletin of TSTU*. 2010. Vol. 16. N 2. P.303-313. (in Russian).
15. **Fedyunin P.A., Dmitriev D.A.** Waveguide methods of non-destructive testing of parameters and properties of materials in applied electrodynamics: monograph. Tambov: Tambov higher military aviation engineer School of Radio Electronics (Military Institute). 2006. 406 p. (in Russian).
16. Kotov I.O. Methodological bases for designing primary measuring transducers of the composition and properties of liquid media on segments of metal waveguides. General classification. M.: Deposited by the Central Reference and Information Fund of the Ministry of Defense of the Russian Federation. 11.17.2008. N B6943. (in Russian).
17. **Kotov I.O.** Measurement of the dialectical permeability of liquid media according to the critical wavelength. *Materials of 3 International conference «Science and sustainable development of society. Legacy of V.I. Vernadsky»*. Tambov: TSTU. 2008. P. 193-195. (in Russian).

Поступила в редакцию 08.04.2023  
Принята к опубликованию 22.04.2023

Received 08.04.2023  
Accepted 22.04.2023