

*Журнал «Научное обозрение. Технические науки»
зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ № ФС77-57440
выдано 27.03.2014.
ISSN 2500-0799*

**Двухлетний импакт-фактор РИНЦ – 0,695
Пятилетний импакт-фактор РИНЦ – 0,319**

*Учредитель, издатель и редакция:
ООО НИЦ «Академия Естествознания»,*

*Почтовый адрес: 101000, г. Москва, а/я 47
Адрес учредителя, издателя: 410056, г. Саратов,
ул. им. Чапаева В.И., д. 56
Адрес редакции: 410035, г. Саратов,
ул. Мамонтовой, д. 5*

**Founder, publisher and edition:
LLC SPC Academy of Natural History,**

**Post address: 101000, Moscow, p.o. box 47
Founder's, publisher's address: 410056, Saratov,
56 Chapaev V.I. str.
Editorial address: 410035, Saratov,
5 Mamontovoi str.**

*Подписано в печать 30.06.2025
Дата выхода номера 30.07.2025
Формат 60×90 1/8*

*Типография
ООО НИЦ «Академия Естествознания»,
410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, д. 5*

**Signed in print 30.06.2025
Release date 30.07.2025
Format 60×90 8.1**

**Typography
LLC SPC «Academy Of Natural History»
410035, Saratov, 5 Mamontovoi str.**

*Технический редактор Доронкина Е.Н.
Корректор Галенкина Е.С., Дудкина Н.А.*

*Распространяется по свободной цене
Тираж 1000 экз. Заказ НО 2025/3
Подписной индекс в электронном каталоге
«Почта России»: ПА518
© ООО НИЦ «Академия Естествознания»*

Журнал «НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ» выходил с 1894 по 1903 год в издательстве П.П. Сойкина. Главным редактором журнала был Михаил Михайлович Филиппов. В журнале публиковались работы Ленина, Плеханова, Циолковского, Менделеева, Бехтерева, Лесгафта и др.

Journal «Scientific Review» published from 1894 to 1903. P.P. Soykin was the publisher. Mikhail Filippov was the Editor in Chief. The journal published works of Lenin, Plekhanov, Tsiolkovsky, Mendeleev, Bekhterev, Lesgaft etc.



М.М. Филиппов (M.M. Philippov)

С 2014 года издание журнала возобновлено
Академией Естествознания

**From 2014 edition of the journal resumed
by Academy of Natural History**

Главный редактор: М.Ю. Ледванов
Editor in Chief: M.Yu. Ledvanov

Редакционная коллегия (**Editorial Board**)

А.Н. Курзанов (**A.N. Kurzanov**)

Н.Ю. Стукова (**N.Yu. Stukova**)

М.Н. Бизенкова (**M.N. Bizenkova**)

Н.Е. Старчикова (**N.E. Starchikova**)

Т.В. Шнуровозова (**T.V. Shnurovovozova**)

НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ • ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

SCIENTIFIC REVIEW • TECHNICAL SCIENCES

www.science-education.ru

2025 г.



***В журнале представлены научные обзоры,
статьи проблемного
и научно-практического характера***

***The issue contains scientific reviews,
problem and practical scientific articles***

СОДЕРЖАНИЕ

Технические науки

СТАТЬИ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВЛАГОПЕРЕНОСА В НАСЫЩЕННОЙ И НЕНАСЫЩЕННОЙ ЗОНАХ НАСЫПНОЙ ПЛОТИНЫ ПРИ АНИЗОТРОПНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГРУНТА	
<i>Качаев А.Е., Брыль С.В.</i>	5
СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РИСКОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА	
<i>Павлидис В.Д., Лукиных А.А., Жадгиров А.А.</i>	11
ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТЕРЬ ПАКЕТОВ В WI-FI-СЕТЯХ	
<i>Ананченко И.В., Добровольский Д.К.</i>	16

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

ВАЛОРИЗАЦИЯ ПИВНОЙ ДРОБИНЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ	
<i>Бурак Л.Ч., Сапач А.Н.</i>	22

СТАТЬИ

РАЗРАБОТКА ИИ-АССИСТЕНТА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЕДИНОМУ НАЦИОНАЛЬНОМУ ТЕСТИРОВАНИЮ	
<i>Баишыков Р.В., Макабаев М.К., Ключева Е.Г., Коккоз М.М.</i>	32
РАЗРАБОТКА ВЕБ-РЕСУРСА ДЛЯ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ОБУЧЕНИЯ ТЕМЕ «МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ» В ШКОЛЬНОМ КУРСЕ ФИЗИКИ	
<i>Матис М.А., Беленкова И.В.</i>	38
РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОДУЛЯ ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЙ ОПЕРАТОРА СТАНКА С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ	
<i>Чкалова М.В., Петерс А.Е.</i>	44

Физико-математические науки

СТАТЬЯ

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАСПОЗНАВАНИЯ РУССКОЙ РЕЧИ НА ЧИСТЫХ И ЗАШУМЛЕННЫХ АУДИОДАННЫХ	
<i>Тукаев В.Р., Беляева М.Б.</i>	50

CONTENTS

Technical sciences

ARTICLES

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF MOISTURE TRANSFER
IN THE SATURATED AND UNSATURATED ZONES
OF AN EMBARRASSED DAM WITH ANISOTROPIC
PERMEABILITY OF SOIL

Kachaev A.E., Bryl S.V. 5

STOCHASTIC MODEL FOR RISK ASSESSMENT OF MAIN
GAS PIPELINE OPERATION

Pavlidis V.D., Lukinykh A.A., Zhadgirov A.A. 11

APPLICATION OF MACHINE LEARNING FOR PREDICTING
PACKET LOSS IN WI-FI NETWORKS

Anantchenko I.V., Dobrovolskii D.K. 16

REVIEW

VALORIZATION OF BREWER'S GRAINS AND PROSPECTS
FOR USE IN FOOD PRODUCTION

Burak L.Ch., Sapach A.N. 22

ARTICLES

DEVELOPMENT OF AN AI ASSISTANT FOR PREPARATION
FOR THE UNIFIED NATIONAL TESTING

Bashlykov R.V., Makabaev M.K., Klyueva E.G., Kokkoz M.M. 32

DEVELOPMENT OF A WEB RESOURCE FOR METHODOLOGICAL
SUPPORT FOR TEACHING THE TOPIC "EARTH'S MAGNETIC FIELD"
IN A SCHOOL PHYSICS COURSE

Matis M.A., Belenkova I.V. 38

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT DECISION SUPPORT
MODULE FOR COMPUTER NUMERICAL CONTROL MACHINE
OPERATOR

Chkalova M.V., Peters A.E. 44

Physical and mathematical sciences

ARTICLE

EVALUATION OF RUSSIAN SPEECH RECOGNITION QUALITY
ON CLEAN AND NOISY AUDIO DATA

Tukaev V.R., Belyaeva M.B. 50

СТАТЬИ

УДК 626-315.3

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВЛАГОПЕРЕНОСА
В НАСЫЩЕННОЙ И НАСЫЩЕННОЙ ЗОНАХ НАСЫПНОЙ
ПЛОТИНЫ ПРИ АНИЗОТРОПНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГРУНТА****Качаев А.Е., Брыль С.В.***ФГБНУ ВНИИ «Радуга», Радужный, e-mail: doctor_cement@mail.ru*

Цель исследования заключается в разработке математического описания влагопереноса в насыщенной и ненасыщенной зонах насыпной плотины с учетом анизотропности грунта. В статье рассмотрены случаи анизотропности грунта для насыпных плотин на примерах гидротехнических сооружений с плоским дренажем, который является примером анизотропного грунта для конструкции насыпной плотины. Представлены коэффициенты фильтрации в горизонтальной и вертикальной плоскостях для изотропных и анизотропных материалов грунтов. На основании существующих к настоящему времени исследований в вопросе фильтрации влаги через анизотропный грунт разработана математическая модель влагопереноса в насыщенной и ненасыщенной зонах плотины с учетом анизотропности грунта (с учетом поправочного коэффициента, учитывающего анизотропию грунта при деформации во влажном состоянии). Выполнено сравнение результатов математического моделирования (численно рассчитанные профили потенциала влаги в плотине) с существующими результатами гидротехнических сеток, описывающих фильтрационные процессы в грунтовых плотинах с анизотропным (непроницаемым) дренажем. Получено и представлено выражение для определения эмпирической зависимости времени наступления кривых депрессий от профилей соответствующих потенциалов влаги в грунте плотины. Согласно методике, которая использовалась при математическом моделировании влагопереноса в плотине, графически установлено распределение расчетных и экспериментальных профилей потенциалов влаги, определенных численными методами решения дифференциального уравнения изменения объема. Полученные результаты исследования могут быть использованы при проектировании плотин из анизотропных грунтов.

Ключевые слова: гидротехническое сооружение, плотина, грунт, профиль, гидродинамическая сетка, потенциал влаги

**MATHEMATICAL DESCRIPTION OF MOISTURE TRANSFER
IN THE SATURATED AND UNSATURATED ZONES OF AN EMBARRASSED
DAM WITH ANISOTROPIC PERMEABILITY OF SOIL****Kachaev A.E., Bryl S.V.***All-Russian Research Institute "Raduga", Raduzhny,
e-mail: doctor_cement@mail.ru*

The aim of the study is to develop a mathematical description of moisture transfer in the saturated and unsaturated zones of an embankment dam taking into account the anisotropy of the soil. The article considers cases of soil anisotropy for embankment dams using examples of hydraulic structures with flat drainage, which is an example of anisotropic soil for the design of an embankment dam. The filtration coefficients in the horizontal and vertical planes for isotropic and anisotropic soil materials are presented. Based on the existing studies on the issue of moisture filtration through anisotropic soil, a mathematical model of moisture transfer in the saturated and unsaturated zones of the dam has been developed taking into account the anisotropy of the soil (taking into account the correction factor that takes into account the anisotropy of the soil during deformation in the wet state). The results of mathematical modeling (numerically calculated profiles of moisture potential in the dam) are compared with the existing results of hydraulic grids describing filtration processes in earth dams with anisotropic (impermeable) drainage. An expression is obtained and presented for determining the empirical dependence of the time of occurrence of depression curves on the profiles of the corresponding moisture potentials in the dam soil. According to the methodology used in mathematical modeling of moisture transfer in the dam, the distribution of calculated and experimental profiles of moisture potentials determined by numerical methods for solving the differential equation of volume change is graphically established. The obtained research results can be used in the design of dams from anisotropic soils.

Keywords: hydraulic structure, dam, soil, profile, moisture potential, hydrodynamic grid

Введение

Фильтрационный поток через насыпную (грунтовую) плотину является одним из важнейших показателей надежности и экономической эффективности гидротехнического сооружения (ГТС). При проектировании или эксплуатации (реконструкции) ГТС необходимо обладать чис-

ленными данными о силах механического воздействия фильтрационного потока на объект гидротехнического назначения [1, с. 17], положении депрессионной кривой в профиле плотины, химическом составе грунтов и воды и др. [2, с. 33]. Решение комплексных задач по определению показателей фильтрации через тело пло-

тины сводится к использованию гидромеханических, численных, аналоговых и гидравлических методов [3, с. 374].

На сегодняшний день такие решения получены для случаев изотропных фильтрационных свойств грунтов, как наиболее идеальных типов грунтов, для которых имеется понятное и точное математическое описание [3, с. 54; 4, с. 112]. В практике расчетов фильтрационных показателей работы грунтовых плотин зачастую приходится иметь дело с анизотропностью грунтов. Поэтому математическое описание задач влагопереноса из одной зоны плотины в другую с учетом анизотропности грунтов является актуальной темой научного исследования.

Математическая задача о влагопереносе в теле плотины может быть решена как для изотропного грунта, если коэффициент анизотропии такого грунта невелик, то есть при рассмотрении таких конструкций плотин, в основании которой используются горизонтально укатанные слои, в том числе и из разнородных материалов. Для таких конструкций плотины коэффициент фильтрации грунта в горизонтальном направлении $k_{\phi}^{\Gamma} = (2-3) k_{\phi}^B$ (где k_{ϕ}^B – коэффициент фильтрации грунта в вертикальном направлении [3, с. 374–375; 5, с. 172].

Анизотропные свойства грунтов насыпных плотин необходимо тщательно изучать на основании не только геологических проб, но и математических моделей поведения грунта при влагопереносе. В модели изотропных грунтов могут при этом вноситься поправки на основании эмпирически полученных кривых депрессий, характерных именно при фильтрации влаги через анизотропные грунтовые материалы.

Цель исследования – разработка математического описания (модели) влагопереноса в насыщенной и ненасыщенной зонах насыпной плотины с учетом анизотропности грунта. При этом результаты математического моделирования – профили потенциалов влаги – необходимо сравнить (верифицировать) с существующими гидродинамическими сетками для плотин из изотропных и анизотропных грунтов.

Материалы и методы исследования

Различные исследования в области фильтрационных способностей грунтовых плотин [6–8] устанавливают канонический вид гидродинамических сеток для однородных плотин изотропной и анизотропной структуры ($k_{\phi}^{\Gamma} = k_{\phi}^B$). На рис. 1 представлена грунтовая плотина с плоским дренажем. На рис. 1 рассмотрены два случая: а) поведение грунта плотины при изотропной проницаемости; б) поведение грунта плотины при анизотропной проницаемости (с анизотропным дренажем) [3, с. 375].

Следует отметить, что при изотропной проницаемости плотины $k_{\phi}^{\Gamma} = k_{\phi}^B$, а при анизотропной проницаемости $k_{\phi}^{\Gamma} = 10 k_{\phi}^B$ [5, с. 171]. Следовательно, проницаемость грунтовых плотин в горизонтальном направлении при движении влаги по кривой депрессии от верхнего бьефа к нижнему при использовании различных анизотропных материалов может составлять на порядок больше значения k_{ϕ}^{Γ} . Такая ситуация фильтрации влаги через грунтовую плотину показана на рис. 1, б. Именно результаты этой гидродинамической сетки будем использовать при верификации результатов проведенного математического моделирования вопроса исследования.

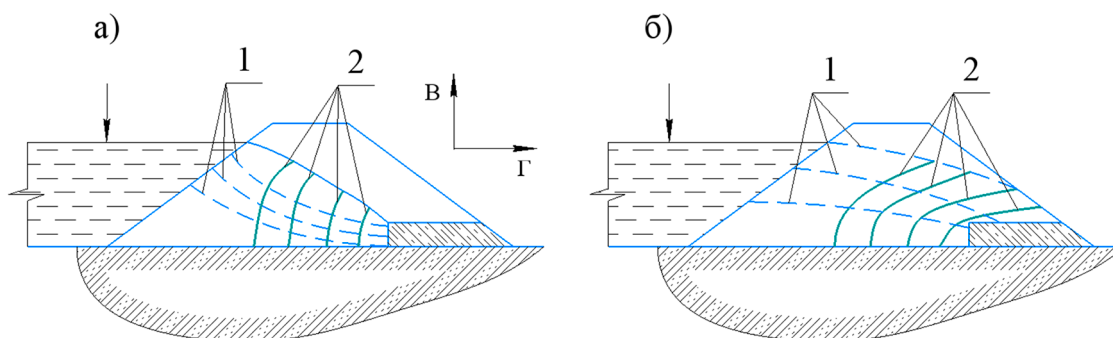


Рис. 1. Гидродинамические сетки в грунтовой плотине с плоским дренажем:

- а) поведение грунта плотины при изотропной проницаемости;
б) поведение грунта плотины при анизотропной проницаемости;

1 – кривые депрессии; 2 – профили потенциалов влаги

Источник: составлено автором по [3, с. 375]

Экспериментальные данные снижения уровня грунтовых вод в колоннах из супеси

Положение уровня в колонне H , м	Изменение уровня от H_1 до H_2 , ΔH	Количество израсходованной воды для подъема уровня на ΔH , ΔQ	Водоотдача $\delta = \Delta Q / \Delta HS$, где S – площадь поперечного сечения колонны, м ²
0,16	–	–	–
0,68	0,52	0,424	0,036
0,84	0,16	0,496	0,137
0,88	0,04	0,242	0,268
0,91	0,03	0,192	0,284

Источник: составлено автором по [11, с. 197].

В качестве метода исследования поставленной цели выбрано математическое моделирование процесса влагопереноса в насыпной плотине с учетом анизотропности грунта и насыщенности грунта влагой. Проводятся аналитические исследования влагопереноса по сечению насыпной плотины из анизотропного грунта с учетом теоретических исследований, проведенных рядом авторов для изотропных грунтов [6–8]. Математическую задачу сформулируем следующим образом.

Габаритные размеры грунтовых насыпных плотин с последующими расчетами технических показателей и напряженно-деформированного состояния плотины являются одним из основных вопросов практики мелиоративного проектирования. В основу широко применяемой в настоящее время гидродинамической схемы расчета ГТС положено решение уравнения Буссинеска [9, с. 74]:

$$\delta \frac{\partial h}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_{\Phi} h \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_{\Phi} h \frac{\partial h}{\partial y} \right] \pm q, \quad (1)$$

где h – расстояние от свободной поверхности грунтовых вод до водоупора, м; τ – время, сут; k_{Φ} – коэффициент фильтрации, см/сут; x, y – горизонтальные координаты, м; δ – водоотдача; q – расход грунтовых вод на испарение или интенсивность инфильтрационного питания, кг/м²·сут.

Решая задачу почвенного влагопереноса, коэффициенты k_{Φ} и δ в уравнении (1), как правило, принимают постоянными, лишь в отдельных случаях учитывается зависимость коэффициента фильтрации k_{Φ} от градиента напора, а коэффициента водоотдачи δ – от положения уровня воды в водохранилище [10, с. 771]. Однако основные параметры, входящие в уравнение (1), являются переменными величинами, а именно: водоотдача δ зависит не только от положения уровня воды относительно поверхности, но и от скорости его измене-

ния, а также влагопроводности зоны аэрации грунтовой плотины.

В таблице приводим опытные данные водоотдачи, полученные в лабораторных условиях при медленном режиме снижения уровня грунтовых вод в колоннах из супеси [11, с. 197].

Анализируя данные таблицы, видим, что с увеличением зоны аэрации грунтовой плотины (неполного насыщения грунта плотины водой) водоотдача δ монотонно возрастает (в 8 раз, хотя среднее значение δ составляет 0,18). В принципе, передвижение влаги в насыщенной и ненасыщенной зонах плотины можно описать следующей системой дифференциальных уравнений, которая будет основана на физическом смысле уравнения (1):

$$\begin{cases} \delta \frac{\partial h}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_{\Phi} h \frac{\partial h}{\partial x} \right] + k_0 \left[\frac{\partial}{\partial z} (\Phi - gz) \right]_{z=H} \\ \frac{\partial V}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k_B \frac{\partial}{\partial z} (\Phi - gz) \right] \pm Q, \end{cases} \quad (2)$$

где k_0 – коэффициент влагопроводности уровня грунтовых вод; Φ – капиллярный потенциал влаги, Дж/кг; g – ускорение силы тяжести, м/с²; k_B – коэффициент влагопроводности, кг²/Дж·сут·м; V – содержание воды в единице объема кг/м³; Q – сток или источник влаги в ненасыщенной зоне, кг/м³·сут; z – вертикальная координата, м.

Получить точное математическое решение системы дифференциальных уравнений (2) невозможно, а использование численных методов помогает получить данные, которые могут быть верифицированы и приняты во внимание.

Для упрощения поставленной задачи авторы разработали методику расчета движения влаги в насыщенной и ненасыщенной зонах грунтовой плотины (контактирующей с водой в верхнем бьефе и польдерной части плотины), учитывающая изменение профиля влажности в зоне аэрации. При отсут-

ствии осадков, стоков (источников) предлагаем перенос влаги в насыщенной и не-насыщенной зонах описывать следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_{\Phi} h \frac{\partial h}{\partial x} \right], \\ \frac{\partial V}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_A \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) - g \frac{\partial k_A}{\partial z}, \\ \int_0^{h_n} \frac{\partial V}{\partial \tau} dz = \frac{\partial U}{\partial \tau}. \end{cases} \quad (3)$$

здесь h_n – расстояние от поверхности почвы до водоупора, м; U – содержание воды в слое h_n , кг/м³.

Результаты исследования и их обсуждение

Систему дифференциальных уравнений (3) решали методом усреднения. Вначале, учитывая граничные условия, решали первое уравнение системы (3) [12], которое принимает вид

$$h = \sqrt{h_k^2 - \frac{2i_0}{\alpha k_{\Phi}} \left(x_0 x - \frac{1}{2} x^2 \right)}, \quad (4)$$

где h_k – расстояние от водоупора до уровня воды в канале, м; α – коэффициент висячности;

i_0 – поток на уровне грунтовых вод, кг/м²·сут; x – переменная во времени длина возмущения уровня грунтовых вод, м; x_0 – координата, в которой $h = h_0$.

Подставляя во второе выражение системы дифференциальных уравнений (3) зависимость, описывающую изменение проводимости грунта от потенциала почвенной влаги, получаем

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} = \frac{1}{B} \left(\frac{\partial^2 k_B}{\partial z^2} \right) - g \frac{\partial k_B}{\partial z}, \quad (5)$$

здесь $k_B = k_0 \exp(B\Phi)$ – где B – постоянная (для определения типа грунта), характеризующая степень изменение V в связи с изменением Φ .

Используя выражение (5), можно построить ряд кривых депрессий, а затем на основании полученных кривых можно построить потенциалы влаги (рис. 2), которые являются частью гидродинамической сетки, как показано на рис. 1.

На рис. 2 представлены профили (усредненные кривые) распределения капиллярных потенциалов и время их наступления, полученные в процессе опускания уровня грунтовых вод в колонне (супеси) и рассчитанные численными методами.

Решая уравнение (5) для процесса влагопереноса при соответствующих краевых условиях, получаем зависимость

$$k_B(z) = \alpha' \left[\left(k_0 - \frac{i_0}{Bg^2 L} - \frac{i_0}{g} \right) \exp[Bg(z-H)] + \frac{i_0}{Bg^2 H} (Bgz + 1) \right]. \quad (6)$$

Здесь α' – поправочный коэффициент, учитывающий анизотропию грунта при деформации [13, с. 111].

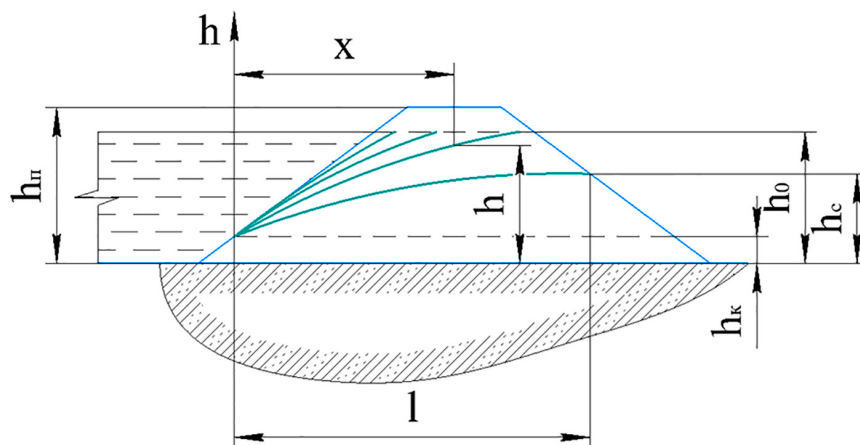


Рис. 2. Распределение расчетных и экспериментальных профилей потенциалов влаги, определенных численными методами решения уравнения (5)

Источник: составлено автором

Зная распределение капиллярного потенциала влаги по глубине почвы и используя зависимость $k_B = f(\Phi, V)$, строим профили распределения влажности. Время наступления соответствующих кривых депрессий при этом можно определить из эмпирического выражения

$$\Delta \tau = \frac{2 \left(\int_0^{L_{n+1}} V_{n+1}(z) dz - \int_0^{L_n} V_n(z) dz \right)}{(i_{0,n} + i_{0,n+1})}. \quad (7)$$

Здесь L_n – зона возмущения уровня грунтовых вод, м; $V_n(z)$ – профиль влажности, соответствующий уровню воды по длине возмущения L_n .

В случае анизотропности профиля или слабовыраженного влагопереноса грунта зависимость $k_B = f(\Phi)$ нельзя описать одной функцией $k_B = k_0 \exp(V\Phi)$. Тогда ее изменение описывается на нескольких участках, что значительно усложняет решение второго выражения, входящего в систему дифференциальных уравнений (3). В общем решение остается подобным изложенному выше.

Полученная методика в результате математического моделирования связана с аналитическими и численными методами решения краевых задач влагопереноса в дифференциальной форме для случаев опускания уровня водных масс в водохранилище при фильтрационных процессах, также эта методика может быть использована при расчетах опускания грунтовых вод в колоннах и осушения грунтов.

Сравнивая полученные профили потенциалов влаги, показанные на рис. 2 с классическими гидродинамическими сетками, представленными на рис. 1, заключаем, что в ходе математического моделирования влагопереноса в насыщенной и ненасыщенной зонах насыпной плотины при анизотропной проницаемости грунта получены профили потенциалов влаги, эквивалентные результатам исследований [3, с. 375], в которых рассматривается изотропный грунт с плоским непроницаемым (анизотропным) дренажем.

Анализ профилей потенциалов влаги (рис. 2) также показывает, что результаты теоретических исследований и полученной авторами математической модели для профилей влаги (гидродинамической сетки плотины) профили распределения потенциалов практически совпадают. Незначительные расхождения возникают из-за наложения гистерезисных явлений и точности их учета. Это указывает на возможность использования вышеизложенного подхода для прогноза режима

влажности грунта плотины в процессе снижения или повышения уровня воды в водохранилище.

Заключение

В данном исследовании представлена математическая модель для влагопереноса в насыщенной и ненасыщенной зонах насыпной плотины с учетом анизотропности грунта. Рассмотрена конструкция насыпной плотины из анизотропного грунта, через которую математически смоделирован влагоперенос из насыщенной зоны (откоса плотины, контактируемый с водой) в ненасыщенную (откос плотины полдерной части). Получены профили потенциалов влаги, которые возникают в теле плотины при влагопереносе через анизотропный грунт. В математической модели впервые использован поправочный коэффициент, учитывающий анизотропию грунта при деформации во влажном состоянии. Установленные в результате математического моделирования профили потенциалов влаги для анизотропных грунтов насыпных плотин совпадают по характеру с результатами исследований, выполненных ранее (используемых в исследовании для верификации). Однако следует отметить, что могут возникать некоторые отличия из-за сложности и нестационарности процесса фильтрации – гистерезиса фильтрации и подхода его учета в модели. Установлена эмпирическая зависимость времени наступления соответствующих кривых депрессий от профилей потенциалов влаги в грунте плотины. Полученные результаты исследования могут быть использованы при проектировании плотин из анизотропных грунтов с учетом предложенной модели влагопереноса из насыщенной в ненасыщенную зону гидротехнического сооружения.

Список литературы

1. Турапин С.С., Ольгаренко Г.В. Методические рекомендации по правилам эксплуатации мелиоративных систем и отдельно расположенных гидротехнических сооружений. Коломна: ИП Воробьев О.М., 2015. 68 с.
2. Ольгаренко Г.В., Турапин С.С., Каштанов В.В. Безопасная эксплуатация гидротехнических сооружений мелиоративного комплекса. Коломна: ИП Лавренов А.В., 2018. 228 с.
3. Рассказов Л.Н., Орехов В.Г., Анискин Н.А., Малаханов В.В., Бестужева А.С., Саинов М.П., Солдатов П.В., Толстиков В.В. Гидротехнические сооружения: учебник для вузов Ч. 1. 2-е изд., испр. и доп. М.: АСВ, 2011. 536 с.
4. Гарагаш Б.А. Надежность пространственных регулируемых систем «основание – сооружение» при неравномерных деформациях основания. Т. I. М.: АСВ, 2012. 416 с.
5. Анискин Н.А., Мемарианфард М.Е. Расчет фильтрации в грунтовых плотинах численным методом // Вестник МГСУ. 2010. № 1. С. 169–174.

6. Орехов Г.В., Кыюнг Ч.М. Анализ фильтрации через земляную плотину с диафрагмой на непроницаемом основании с помощью программы PLAXIS 2D // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19, № 2. С. 281–293. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.281-293.
7. Качаев А.Е., Турапин С.С. Методика численного моделирования устойчивости грунтовой плотины при экстренной сработке водохранилища // Экология и строительство. 2024. № 4. С. 4–13. DOI: 10.35688/2413-8452-2024-04-001.
8. Качаев А.Е., Турапин С.С. Обоснование необходимости разработки комплексных расчетных моделей грунтовых плотин мелиоративных систем // Наука и мир. 2024. № 3. С. 1–5. DOI: 10.26526/2307-9401-2024-3-1-5.
9. Капцов О.В. Построение точных решений уравнения Буссинеска // Прикладная механика и техническая физика. 1998. Т. 39, № 3. С. 74–78.
10. Hasan H., Naimi S., Hameed M.M. A Comprehensive Analysis of BIM Technology's Critical Role in Assessing Cost for Complex Dam Construction Projects // Math. Model. Eng. Probl. 2023. № 10. P. 767–773.
11. Rakhymberdina M., Grokhotov E., Assylkhanova Z., Toguzova M. Using space survey materials for modeling hydrodynamic accidents at mining enterprises in Kazakhstan // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 2022. № 46. P.193–198.
12. Шаланин В.А., Патлай К.И. Численное моделирование фильтрации грунтовых вод через прямоугольную перемычку из однородного грунта на водонепроницаемом основании // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2019. № 2 (39). С. 111–117. DOI: 10.24866/2227-6858/2019-2-13.
13. Нуждин Л.В., Павлюк К.В. Учет анизотропии грунтов при определении напряжений в основании фундаментов от рядом загруженных площадей // Строительство и архитектура. 2017. Т. 8, № 4. С. 104–115. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.4.11.

УДК 621.644.8

СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РИСКОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА

¹Павлидис В.Д., ¹Лукиных А.А., ²Жадгиров А.А.

¹ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет»,
Оренбург, e-mail: Institut.riska@yandex.ru;

²ООО «CAIH POWER», Алматы, e-mail: maiya@ttg.kz

Эксплуатация магистральных газопроводов сопровождается различными рисками, влияющими на безопасность, надежность и эффективность системы. Цель исследования – разработка стохастической модели оценки рисков эксплуатации магистрального газопровода с учетом физических, природных и технических факторов. В рамках работы проведена кластеризация рисков и их количественная оценка с использованием вероятностно-статистических методов. Разработана структурная схема эффективности газопровода, включающая ключевые показатели надежности и категории рисков. Физические риски (коррозия, износ труб) были исследованы с учетом климатических условий, оказывающих влияние на долговечность трубопроводов. Природные риски, такие как сейсмическое воздействие, проанализированы на основе вероятностных моделей, позволяющих оценить вероятность повреждения системы. Технические риски, включающие сбои в автоматизированных системах и ошибки операторов, рассмотрены с учетом надежности SCADA-систем и факторов человеческого влияния. Проведена расчетная оценка интегрального показателя риска, отражающего совокупную уязвимость системы к негативным воздействиям. Результаты исследования демонстрируют эффективность предложенного подхода для анализа эксплуатационных рисков газопроводов. Разработанная модель может быть использована для оптимизации технического обслуживания, снижения вероятности аварийных ситуаций и повышения общей надежности системы. Применение данной методики позволит разработать рекомендации по модернизации газотранспортной инфраструктуры и минимизации эксплуатационных рисков.

Ключевые слова: магистральный газопровод, эксплуатационные риски, стохастическая модель, техническое обслуживание, автоматизированные системы, анализ уязвимости, минимизация рисков

STOCHASTIC MODEL FOR RISK ASSESSMENT OF MAIN GAS PIPELINE OPERATION

¹Pavlidis V.D., ¹Lukinykh A.A., ²Zhadgirov A.A.

¹Orenburg State Agrarian University, Orenburg, e-mail: Institut.riska@yandex.ru;

²CAIH POWER LLP, Almaty, e-mail: maiya@ttg.kz

The operation of main gas pipelines is associated with various risks affecting the safety, reliability, and efficiency of the system. The aim of this study is to develop a stochastic model for assessing the risks of main gas pipeline operation, considering physical, natural, and technical factors. The study includes risk classification and quantitative assessment using probabilistic-statistical methods. A structural efficiency scheme for the gas pipeline has been developed, incorporating key reliability indicators and risk categories. Physical risks (corrosion, pipeline wear) were analyzed considering climatic conditions affecting pipeline durability. Natural risks, such as seismic activity, were assessed based on probabilistic models to evaluate the likelihood of system damage. Technical risks, including failures in automated systems and operator errors, were examined with regard to the reliability of SCADA systems and human factors. A calculated assessment of the integral risk indicator was conducted, reflecting the overall vulnerability of the system to adverse effects. The results demonstrate the effectiveness of the proposed approach for analyzing operational risks of gas pipelines. The developed model can be used to optimize maintenance, reduce the probability of accidents, and enhance the overall reliability of the system. Applying this methodology will help develop recommendations for modernizing gas transportation infrastructure and minimizing operational risks.

Keywords: main gas pipeline, operational risks, stochastic model, automated systems, maintenance, vulnerability analysis, risk minimization

Введение

Магистральные газопроводы играют ключевую роль в транспортировке природного газа, являясь важным элементом энергетической инфраструктуры. Тем не менее эксплуатация этих систем сопряжена с разнообразными рисками, которые могут оказывать значительное влияние на безопасность, эффективность и надежность работы.

Под рисками принято принимать потенциальную возможность наступления события, которое может иметь негативные результаты, характеризующееся как сочетание

вероятности этого события и его возможных последствий. Риск отражает неопределенность будущего и помогает оценивать угрозы для достижения целей или безопасности систем.

Эффективная эксплуатация магистральных газопроводов требует серьезного анализа всех возможных рисков. С учетом разнообразия потенциальных угроз, связанных с климатическими условиями, природными факторами, особенностями структуры магистралей и ее эксплуатации, особую значимость приобретает системный подход

к идентификации и оценке рисков, который позволяет выделить основные структурные компоненты эффективности.

Цель исследования – разработка стохастической модели оценки рисков эксплуатации магистрального газопровода с учетом физических, природных и технических факторов. В рамках работы проведена кластеризация рисков и их количественная оценка с использованием вероятностно-статистических методов.

Задачи исследования:

- определить ключевые показатели эффективности технической системы магистрального газопровода;
- методами системного анализа построить структурную схему эффективности технической системы магистрального газопровода;
- провести категорирование и кластеризацию рисков функционирования технической системы;
- на основе вероятностного подхода оценить влияние рисков по классам и в совокупности;
- на основании полученных результатов сформировать рекомендации для оценки степени уязвимости всей технической системы магистрального газопровода.

Материалы и методы исследования

Производительность магистрального газопровода напрямую связана с объемом транспортируемого газа: более высокая

производительность требует большей мощности насосных станций и может повышать износ оборудования. Если компрессорные станции не модернизированы для повышения производительности, это может привести к снижению общей эффективности системы и повышению эксплуатационных расходов на ремонт и обслуживание.

Затраты на поддержание оптимального уровня давления газа в трубопроводной системе, а также на его транспортировку по магистральным газопроводам в значительной степени зависят от мощности используемых насосных станций и компрессоров. Эти устройства играют ключевую роль в обеспечении бесперебойного движения газа по системе, и их энергопотребление напрямую определяется такими параметрами, как общая производительность магистрального газопровода, его протяженность, а также установленный уровень давления в системе. Чем выше объем транспортируемого газа в единицу времени, тем больше энергии требуется для поддержания заданного уровня давления на всем протяжении магистрали. Кроме того, дополнительное увеличение энергопотребления может быть вызвано различными факторами, такими как возможные потери газа в результате утечек, недостаточная степень теплоизоляции трубопровода или иные технические неисправности, негативно сказывающиеся на общей эффективности работы системы.



Структурная схема эффективности технической системы магистрального газопровода

Качество и эффективность функционирования сложной технической системы магистрального газопровода во многом определяется состоянием ее оборудования, регулярностью проведения профилактических мероприятий, а также степенью внедрения современных автоматизированных систем диагностики и мониторинга. Чем чаще и тщательнее проводятся технические осмотры, плановые профилактические ремонты и регламентные работы, тем ниже вероятность возникновения внештатных ситуаций, непредвиденных сбоев и аварийных ситуаций, которые могут привести к серьезным последствиям. Современные системы мониторинга и анализа данных позволяют своевременно выявлять потенциальные проблемы на ранних стадиях их развития, что существенно снижает вероятность возникновения серьезных нарушений в работе системы и повышает ее надежность. Дополнительно автоматизация процессов управления технологическими операциями не только минимизирует влияние человеческого фактора, но и способствует значительному улучшению качества функционирования всей газотранспортной системы, обеспечивая ее более стабильную, эффективную и безопасную эксплуатацию.

Структурная схема эффективности технической системы магистрального газопровода с выделением ключевых показателей эффективности и категорий рисков основных компонентов представлена на рисунке.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ всех возможных рисков, связанных с эксплуатацией магистральных газопроводов, позволил провести их кластеризацию и оценку.

К группе физических рисков, оказывающих непосредственное влияние на целостность и надежность функционирования трубопроводной системы, были отнесены такие факторы, как коррозионные процессы, механические повреждения оборудования, а также постепенный естественный износ трубопровода в процессе его длительной эксплуатации. Наиболее значимой и серьезной угрозой в данном классе является именно коррозия материала трубопроводов. Данный процесс представляет собой разрушение металла под воздействием различных внешних факторов, включая влагу, химические вещества и температурные колебания. В климатических условиях Российской Федерации, где значительные перепады температур являются типичным явлением, коррозионные процессы могут протекать ускоренно, что создает дополнительные риски

для эксплуатации газопроводных систем. Это обстоятельство требует обязательного внедрения и активного использования современных методов защиты магистралей, среди которых можно выделить нанесение антикоррозионных покрытий, включая передовые технологии с применением наноматериалов, а также осуществление регулярного технического мониторинга состояния ветвей трубопроводов.

Практика эксплуатации подтверждает высокую значимость данных рисков. Так, например, 5 февраля 2024 г. в Оренбурге была зафиксирована утечка газа на одном из участков теплотрассы, причиной которой стала наружная коррозия трубопровода, возникшая вследствие воздействия талых вод. В результате данного инцидента оказалось затронуто 32 объекта городской инфраструктуры, что привело к серьезным последствиям для населения и коммунальных служб. Аналогичная ситуация наблюдалась и ранее – 14 августа 2023 г. в Уссурийске произошла аварийная ситуация на сети газопровода, причиной которой стало наводнение и последующее интенсивное коррозионное разрушение трубопроводных элементов. Эти примеры демонстрируют необходимость постоянного контроля состояния газотранспортных систем и применения надежных средств защиты от коррозии, что позволит минимизировать риски аварий и продлить срок службы оборудования.

Для оценки совокупного риска при транспортировке газа используется вероятностно-статистический подход, рекомендованный в стандартах по анализу риска [1, с. 20], согласно которым риск определяется через произведение вероятности неблагоприятного события (P) на тяжесть его последствий (S), нормированную от 0 до 1.

Интенсивность коррозионных отказов для магистральных газопроводов, эксплуатируемых в стандартных условиях, принимается на уровне $\lambda_{\text{кор}} \approx 0,05$, что означает ожидание в среднем 0,05 отказа в год. По данным многолетних наблюдений вероятность отказа за год [2, с. 568] составляет $P_{\text{кор}} = 1 - e^{-\lambda_{\text{кор}}} \approx 0,049$. Тяжесть последствий в виде снижения пропускной способности оценивается в 20%, исходя из данных о временных перерывах в работе при ремонте локальных дефектов [3, с. 752]: $S_{\text{кор}} = 0,2$. Тогда оценка физических рисков определяется следующим образом:

$$R_{\text{физ}} = P_{\text{кор}} \cdot S_{\text{кор}} = 0,049 \cdot 0,2 = 0,0098.$$

К классу рисков природного характера были отнесены преимущественно сейсмические воздействия, для оценки которых в геотехнической инженерии широко приме-

няется пуассоновская модель вероятности событий. Например, причиной аварии на газопроводе в Илекском районе Оренбургской области 14 апреля 2021 г. называют высокую сейсмическую активность в соседнем районе с последующим землетрясением.

Вероятность землетрясения такой интенсивности, которая способна повредить трубопровод, принята равной 1 % в год [4, с. 105]. Вероятность критического повреждения при наступлении расчетного события принимается за 50 % [5, с. 134]:

$$P_{\text{прир}} = 0,01 \cdot 0,5 = 0,005.$$

При серьезных повреждениях снижение пропускной способности до 50 % отражено в практических руководствах по оценке последствий сейсмических нагрузок [6, с. 57]: $S_{\text{прир}} = 0,5$. Тогда оценка природных рисков определяется следующим образом:

$$P_{\text{прир}} = P_{\text{прир}} \cdot S_{\text{прир}} = 0,005 \cdot 0,5 = 0,0025.$$

К классу технических рисков были отнесены сбои и погрешности в системах управления процессами, связанными с транспортировкой газа, сбои в системах автоматизации и ошибки операторов. Надежность систем автоматизации является критически важной для предотвращения аварий на газопроводах. Пример технических рисков, связанных со сбоями в системе автоматизации и человеческими ошибками, можно найти в аварии на магистральном газопроводе «Белосуво — Ленинград» в Ленинградской области в 2022 г. Разгерметизация газопровода, сопровождавшаяся возгоранием, привела к отключению шести газораспределительных станций. Основная причина аварии — сбой в системе автоматизации, который не позволил своевременно обнаружить и предотвратить разгерметизацию.

Для современных SCADA-систем и приборов автоматики, применяемых в газотранспортных сетях, среднее время наработки на отказ (MTBF) составляет около 10 лет, что подтверждается производителями и независимыми исследованиями [7, с. 201].

Вероятность отказа за год:

$$P_{\text{тех}} = 1 - e^{-1/10} \approx 0,095 \approx 0,1.$$

Снижение пропускной способности при сбое автоматики оценивается в 10 % согласно данным о режимах ручного управления и статистике быстрой реакции операторов [8, с. 29]: $S_{\text{тех}} = 0$, тогда оценка технических рисков определится следующим образом:

$$R_{\text{тех}} = P_{\text{тех}} \cdot S_{\text{тех}} = 0,1 \cdot 0,1 = 0,001.$$

Суммарный интегральный риск по трем категориям составляет немногим больше 2 %:

$$R_{\text{сум}} = R_{\text{кор}} + R_{\text{прир}} + R_{\text{тех}} = \\ = 0,0098 + 0,0025 + 0,01 = 0,0223.$$

Итоговый показатель (около 2,23 %) отражает совокупную степень уязвимости технической системы к комплексному набору факторов и служит базой для принятия управленческих решений по усилению мер безопасности и повышению надежности транспортировки газа. Он является итоговым значением интегрального безразмерного показателя риска, полученного с учетом всех рассмотренных категорий угроз из соответствующих классов.

Заключение

Показатель $R_{\text{сум}}$ отражает относительную степень уязвимости системы к совокупности анализируемых факторов за определенный период и представляет собой условный индикатор, показывающий долю потенциального «рискового воздействия» на систему по сравнению с ее максимально возможной степенью негативного влияния, принятой за единицу. Он позволяет сравнивать участки газопровода, сценарии эксплуатации, варианты модернизации, оценивая риски, и принимать на этой основе управленческие решения.

Представленный подход к оценке риска, основанный на использовании вероятностно-статистических моделей, а также на анализе и обобщении данных о сейсмических, технических и физических воздействиях, полностью соответствует признанному международным методикам, разработанным в области техносферной безопасности. Эти методы широко используются в мире для повышения уровня важнейших объектов, включая газотранспортные системы, и доказали свою эффективность при прогнозировании возможной угрозы. Применение современных аналитических подходов позволяет формировать научно обоснованные и проверенные временные основы для принятия грамотных инженерных решений, направленных не только на повышение общей устойчивости газотранспортной отрасли, но и на минимизацию негативных последствий, вызванных неблагоприятными факторами, такими как аварии, утечки газа, внешние воздействия и технические неисправности. Кроме того, использование таких методов в целом обеспечивает техносферную безопасность, включая комплексный и всесторонний подход к управлению рисками в газовой отрасли.

Список литературы

1. ГОСТ Р 51901.1-2002. Системы управления безопасностью. Требования к системам управления безопасностью при эксплуатации и техническом обслуживании опасных производственных объектов. М.: Стандартинформ, 2002. 20 с.
2. Li Y., Chen C., Yao L., Fan M., Zhang Y. Reliability analysis of gas pipelines under global bending and thermal loadings considering a high chloride ion environment // *Engineering Failure Analysis*. 2024. Vol. 156. P. 107802. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107802.
3. Mingjiang X., Zhigang T. Risk-based pipeline re-assessment optimization considering corrosion defects // *Sustainable Cities and Society*. 2018. Vol. 38. P. 746–757. DOI: 10.1016/j.scs.2018.01.021
4. СП 14.13330.2018 «Свод правил. Строительство в сейсмических районах» (актуализированная редакция СНиП II-7-81). М.: Стандартинформ, 2018. 144 с.
5. Jie L., Wei L. *Lifeline Engineering Systems: Network Reliability Analysis and Aseismic Design*. Springer Singapore, 1st ed., 2021. P. 210. DOI: 10.1016/j.scs.2018.01.021.
6. Харионовский В.В. Надежность магистральных газопроводов: становление, развитие и современное состояние // *Газовая промышленность*. 2019. № 1 (779). С. 56–68.
7. Федосов А.В., Тажетдинова А.А., Сандырев К.Ю., Гимаев Р.А. Анализ требований законодательства по обеспечению безопасности эксплуатации магистральных газопроводов // *Евразийский юридический журнал*. 2022. № 3 (166). С. 421.
8. Голыжникова Д.Ю. Вопросы повышения эффективности нефтегазопроводных сетей: риск-ориентированный подход, противоаварийное оборудование, международные стандарты по безопасности // *Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом*. 2018. № 10. С. 26–32. DOI: 10.30713/1999-6942-2018-10-26-32.

ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТЕРЬ ПАКЕТОВ В WI-FI-СЕТЯХ

^{1,2,3}Ананченко И.В., ²Добровольский Д.К.

¹ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», Санкт-Петербург;

²ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», Санкт-Петербург, e-mail: ddk.dobr.dobr@mail.ru;

³ФГБОУ ВО Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург;

В статье рассмотрена возможность применения различных алгоритмов машинного обучения для прогнозирования потерь пакетов в беспроводных сетях Wi-Fi на основе параметров трафика и характеристик среды. Для анализа собрана выборка сетевых данных, включающая информацию о параметрах передаваемых пакетов и состоянии окружающей сети. Данные получены с использованием сетевого анализатора и специализированных скриптов, фиксирующих уровень сигнала, отношение сигнал/шум, длину пакета, количество подключённых устройств и загруженность канала. После предварительной обработки данные использовались для построения моделей на основе логистической регрессии, метода опорных векторов, случайного леса, градиентного бустинга и многослойного перцептрона. В процессе анализа сравнивались различные модели машинного обучения по качеству прогнозирования потерь пакетов. Наилучшие результаты показали алгоритмы ансамблевого обучения, такие как градиентный бустинг и случайный лес. Выявлено, что эти модели наиболее эффективно распознают сложные зависимости между параметрами сети и вероятностью возникновения потерь, определены наиболее значимые признаки, влияющие на точность прогноза: количество подключённых клиентов, загруженность канала и соотношение сигнал/шум. Проведённое исследование подтвердило, что методы машинного обучения могут быть успешно применены для предсказания потерь пакетов в Wi-Fi-сетях. Полученные модели и выявленные ключевые признаки могут быть использованы для создания интеллектуальных систем мониторинга и оптимизации работы беспроводной инфраструктуры.

Ключевые слова: машинное обучение, беспроводные сети, потери пакетов, прогнозирование, параметры трафика, качество обслуживания

APPLICATION OF MACHINE LEARNING FOR PREDICTING PACKET LOSS IN WI-FI NETWORKS

^{1,2,3}Anantchenko I.V., ²Dobrovolskii D.K.

¹Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg;

²Saint Petersburg State Technological Institute (Technical University), e-mail: ddk.dobr.dobr@mail.ru;

³Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinov, Saint-Petersburg

The article explores the potential of applying various machine learning algorithms to predict packet loss in Wi-Fi wireless networks based on traffic parameters and environmental characteristics. A dataset of network data was collected, including information on transmitted packet parameters and the state of the surrounding network. The data was obtained using a network analyzer and specialized scripts that recorded signal strength, signal-to-noise ratio, packet length, number of connected devices, and channel utilization. After preprocessing, the data was used to build models based on logistic regression, support vector machines, random forest, gradient boosting, and multilayer perceptron. The performance of different machine learning models in predicting packet loss was compared. The best results were achieved by ensemble learning algorithms, such as gradient boosting and random forest. These models were found to most effectively identify complex relationships between network parameters and the likelihood of packet loss. The most significant features affecting prediction accuracy were identified: the number of connected clients, channel utilization, and signal-to-noise ratio. The study confirmed that machine learning methods can be successfully applied to predict packet loss in Wi-Fi networks. The developed models and identified key features can be utilized to create intelligent systems for monitoring and optimizing wireless infrastructure.

Keywords: machine learning, wireless networks, packet loss, prediction, traffic parameters, quality of service

Введение

В условиях постоянного роста объемов беспроводной передачи данных вопросы обеспечения качества обслуживания (QoS) становятся всё более актуальными. Потери пакетов в Wi-Fi-сетях могут существенно снижать производительность приложений, особенно тех, которые чувствительны к задержкам и

потерям, таких как видеоконференции, VoIP и онлайн-игры [1]. Прогнозирование потерь пакетов позволяет принимать превентивные меры для оптимизации сетевых параметров и улучшения условий эксплуатации [2]. Одним из перспективных подходов к решению рассматриваемой задачи является применение методов машинного обучения (ML) [3].

В отличие от предыдущих исследований, сосредоточенных на применении отдельных алгоритмов (например, Random Forest [2]), работа представляет комплексное сравнение пяти различных моделей машинного обучения, включая ансамблевые и нейросетевые подходы, что позволяет объективно оценить их пригодность к задачам прогнозирования потерь пакетов и определить ключевые параметры среды, влияющие на качество соединения.

Цель исследования – анализ возможности применения различных алгоритмов машинного обучения для прогнозирования потерь пакетов в Wi-Fi-сетях на основе параметров сетевого трафика и характеристик окружающей среды.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования собрана выборка сетевых данных с использованием программного обеспечения Wireshark и специализированных скриптов на Python. Один из таких скриптов выполнял захват сетевых пакетов с помощью библиотеки Pyshark – обёртки над Wireshark. Скрипт запускался на ноутбуке, подключённом к Wi-Fi-сети, и сохранял данные о каждом пакете (время, источник, уровень сигнала, протокол, длина и наличие ошибок) в формате CSV. Помимо этого, второй скрипт с помощью iwconfig и iwlwifi на Linux-платформе снимал информацию о параметрах сигнала и окружения, таких как уровень шума, используемый канал и количество подключённых устройств. Собранные данные затем объединялись в единый датасет с меткой о наличии или отсутствии потерь пакетов. Сбор данных проводился в различных условиях (плотность трафика, количество клиентов, расстояние до точки доступа). В качестве признаков (features) рассматривались следующие параметры: уровень сигнала (RSSI – Received Signal Strength Indicator), длина пакета (байт), отношение сигнал/шум (SNR – Signal-to-Noise Ratio), количество подключённых клиентов и загруженность канала [4].

Предварительная обработка данных включала очистку от пропущенных значений, нормализацию и кодирование категориальных признаков. Для построения моделей прогнозирования использовались логистическая регрессия, метод опорных векторов (SVM), случайный лес (Random Forest), градиентный бустинг (XGBoost) и многослойный перцептрон (MLP). У каждой модели есть свои особенности:

логистическая регрессия – базовая модель классификации, используемая для предсказания вероятности наступления бинарного события;

метод опорных векторов (SVM) – алгоритм строит оптимальную гиперплоскость для разделения классов в пространстве признаков;

случайный лес (Random Forest) – ансамблевый метод, основанный на построении множества деревьев решений и агрегировании их результатов;

градиентный бустинг (XGBoost) – улучшенный ансамблевый алгоритм, обучает модели последовательно, минимизируя ошибку предыдущих;

многослойный перцептрон (MLP) – тип искусственной нейронной сети, состоящий из входного, одного или нескольких скрытых и выходного слоя, способный моделировать сложные нелинейные зависимости [5-7].

Для оценки качества моделей использовались метрики: точность (accuracy), полнота (recall), F1-мера и площадь под кривой ROC (AUC-ROC) [8].

Точность (Accuracy) – доля правильно классифицированных примеров из общего числа наблюдений:

$$Accuracy = \frac{(TP + TN)}{(TP + TN + FP + FN)}, \quad (1)$$

где TP – истинно положительные,

TN – истинно отрицательные,

FP – ложно положительные,

FN – ложно отрицательные.

Полнота (Recall) – способность модели обнаруживать все положительные случаи:

$$Recall = \frac{TP}{(TP + FN)}, \quad (2)$$

F1-мера – гармоническое среднее между точностью (precision) и полнотой:

$$F_1 = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall}, \quad (3)$$

где

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4)$$

AUC-ROC – интегральная метрика, отображающая способность модели различать положительные и отрицательные классы на разных порогах вероятности. Она определяется как площадь под ROC-кривой, которая строится на основе значений True Positive Rate (TPR) и False Positive Rate (FPR) [9]:

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5)$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN}, \quad (6)$$

Значение AUC колеблется от 0 до 1, где 1 соответствует идеальной классификации, а 0.5 – случайному угадыванию (худший результат).

Разделение данных на обучающую и тестовую выборки производилось в пропорции 80:20 с использованием стратифицированной выборки [10].

Результаты исследования и их обсуждение

Каждая модель была протестирована на валидационном наборе данных (20% от всей выборки). Основываясь на результатах тестирования моделей, проведенных нами, была составлена таблица 1 и построены графики AUC-ROC (рисунки 1–5). Значения TPR и FPR для построения AUC-ROC кривых вычислялись программно, а после вычисления были экспортирова-

ны в Excel-таблицу с помощью скрипта на языке Python для дальнейшего использования. Наивысшую точность и полноту продемонстрировали ансамблевые модели случайного леса и градиентного бустинга, с небольшим преимуществом XGBoost, точность которого достигла 92%, F1-мера – 0.85, полнота – 0.85 и AUC-ROC – 0.94. У модели на втором месте – случайного леса – точность 91%, F1-мера – 0.82, преимущество перед MLP в показателе полноты (0.81 у Random Forest против 0.77 у MLP). Модели логистической регрессии и SVM продемонстрировали удовлетворительную точность (89% и 91% соответственно), однако их показатели по полноте оказались ниже, чем у других моделей (0.62 и 0.69 соответственно), что делает их менее предпочтительными в условиях, когда важно минимизировать пропущенные случаи потерь.

Таблица 1

Сравнение эффективности моделей машинного обучения

Модель	Точность	Полнота	F1-мера	AUC-ROC
Логистическая регрессия	0,89	0,62	0,74	0,95
SVM	0,91	0,69	0,80	0,96
Случайный лес	0,91	0,81	0,82	0,95
XGBoost	0,92	0,85	0,85	0,95
MLP	0,91	0,77	0,82	0,95

Источник: составлено авторами.

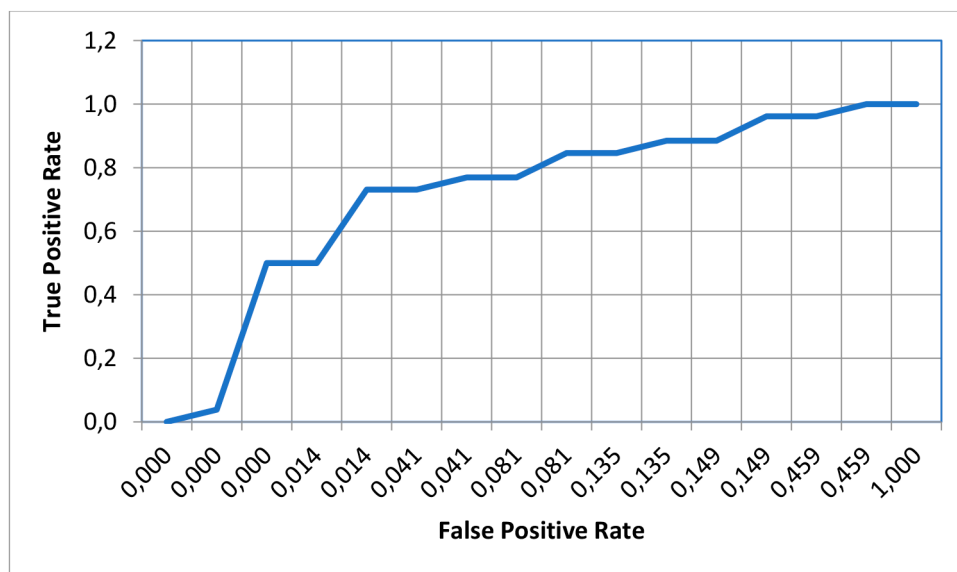


Рис. 1. ROC-кривая для модели логистической регрессии
Источник: составлено авторами

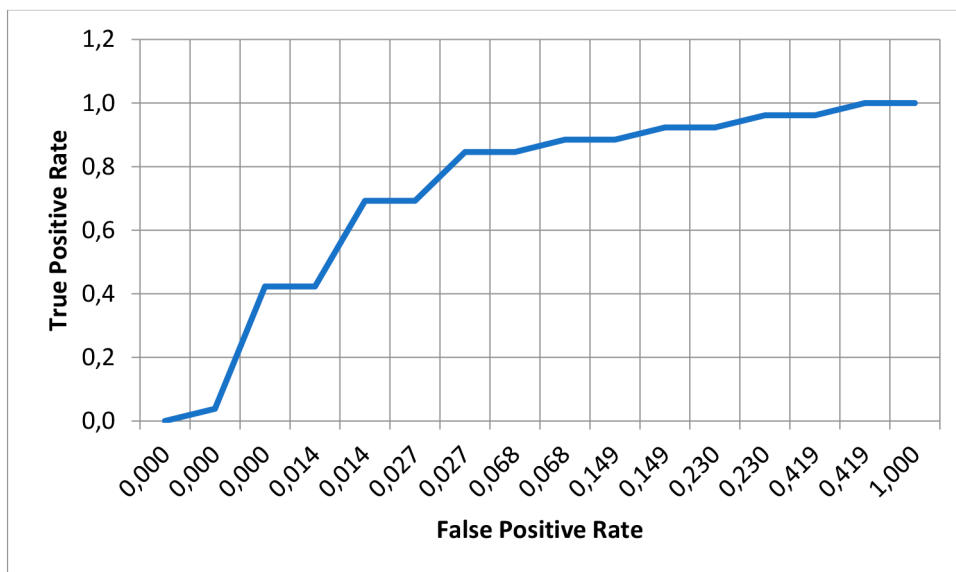


Рис. 2. ROC-кривая для модели SVM
Источник: составлено авторами

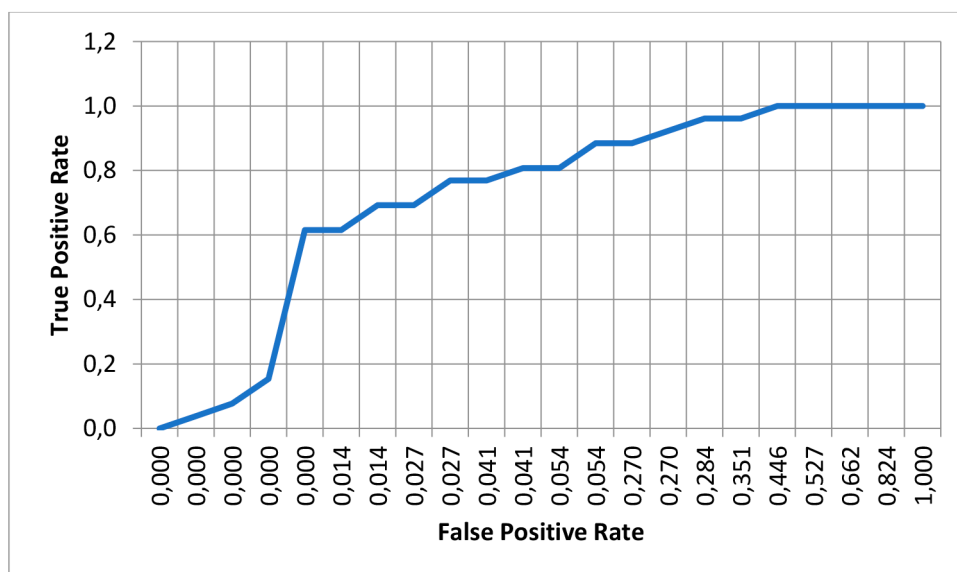


Рис. 3. ROC-кривая для модели случайного леса
Источник: составлено авторами

Результаты показывают, что алгоритмы ансамблевого обучения (Random Forest и XGBoost) лучше справляются с задачей прогнозирования потерь пакетов, скорее всего благодаря тому, что они способны выявлять сложные нелинейные зависимости между признаками [11]. Помимо этого, важность признаков, определённая скриптом

на языке Python с помощью XGBoost, показала, что количество подключённых клиентов, загруженность канала и отношение сигнал/шум (SNR) являются наиболее влиятельными параметрами в случае прогнозирования потери пакетов [12]. Важность признаков (веса признаков), определённая с помощью модели XGBoost, объединена в таблице 2.

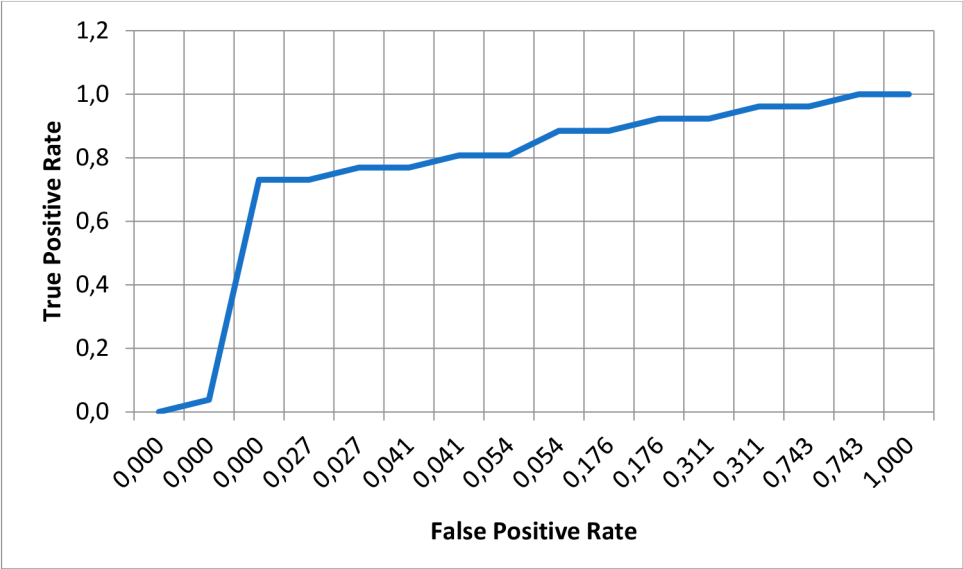


Рис. 4. ROC-кривая для модели XGBoost
Источник: составлено авторами

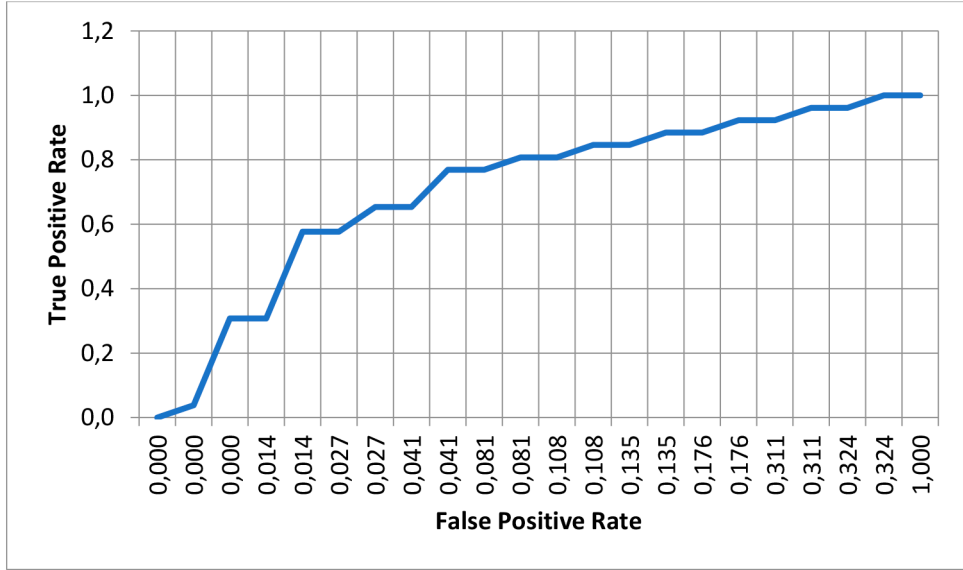


Рис. 5. ROC-кривая для модели MLP
Источник: составлено авторами

Таблица 2

Важность признаков для XGBoost

Признак	Вес признака
Количество подключенных клиентов	0,635
Загруженность канала	0,144
SNR	0,107
Сила сигнала	0,068
Длина пакета	0,045

Источник: составлено авторами.

В отличие от работы Giannakou и др. [2], где рассматривалась лишь одна модель и ограниченный набор признаков, выполненное авторами исследование демонстрирует преимущество ансамблевых и нейросетевых методов при наличии полевых данных различной природы, что способствует расширению понимания применения методов ML к задачам QoS в беспроводных сетях.

Выводы

Проведённое исследование показало, что применение алгоритмов машинного обучения, в частности алгоритмов ансамблевого типа – XGBoost и случайного леса, позволяет с высокой точностью прогнозировать потери пакетов в Wi-Fi-сетях. Эти модели могут быть эффективно интегрированы в системы мониторинга и управления беспроводной инфраструктурой для принятия своевременных корректирующих мер. Выявленные ключевые признаки позволяют сфокусировать внимание на наиболее критичных аспектах при оптимизации параметров сети. В будущем возможно расширение исследования с использованием более обширных и разнообразных исходных данных, а также внедрение моделей в реальное оборудование точек доступа.

Список литературы

1. Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2000. Vol. 18. No. 3. P. 535–547. DOI: 10.1109/49.840210.
2. Giannakou A., Dwivedi D., Peisert S. A machine learning approach for packet loss prediction in science flows. *Future Generation Computer Systems*. 2020. Vol. 102. P. 190–197. DOI: 10.1016/j.future.2019.08.041.
3. Domingos P. *The Master Algorithm: How the Quest for the Ultimate Learning Machine Will Remake Our World*. New York: Basic Books, 2015. 352 p. ISBN 978-0-465-06570-7.
4. Wilhelmi F., Góez D., Soto P., Vallés R., Alfaifi M., Algunayah A., Martín-Pérez J., Girletti L., Mohan R., Ramnan K.V., Bellalta B. Machine learning for performance prediction of channel bonding in next-generation IEEE 802.11 WLANs // *ITU Journal on Future and Evolving Technologies*. 2021. Vol. 2. No. 4. DOI: 10.52953/NBGS1213.
5. Bishop C.M. *Pattern Recognition and Machine Learning*. Berlin: Springer, 2006. 738 p. (Information Science and Statistics). ISBN 978-0-387-31073-2.
6. Zhang A., Lipton Z.C., Li M., Smola A.J. *Dive into Deep Learning*. Cambridge: Cambridge University Press, 2024. ISBN 978-1-009-38943-3. DOI: 10.1017/9781009389426.
7. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. Cambridge, MA: MIT Press, 2016. 800 p. (Adaptive Computation and Machine Learning series). ISBN 978-0-262-03561-3. URL: <https://www.deeplearningbook.org/> (дата обращения: 24.04.2025).
8. Абдурахимов А.А., Прохоршин А.С. Использование биоинформатических методов и машинного обучения для анализа вегетационных индексов и прогнозирования заболеваний растений // *Наука и инновации: материалы Международной научной конференции молодых учёных* (Ташкент, 15 ноября 2024 г.). Ташкент: Министерство высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан, Центр передовых технологий, 2024. С. 80–82. DOI: <https://zenodo.org/records/14159997>.
9. Шахбанов З. Метрики в машинном обучении: понимание, применение и интерпретации // shakhbanov.org. [Электронный ресурс]. URL: <https://shakhbanov.org/metrici-v-mashinnom-obuchenii/> (дата обращения: 30.04.2025).
10. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., Vanderplas J., Passos A., Cournapeau D., Brucher M., Perrot M., Duchesnay E. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*. 2011. Vol. 12. P. 2825–2830. DOI: 10.5555/1953048.2078195.
11. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. In: *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. 2016. P. 785–794. DOI: 10.1145/2939672.2939785.
12. Lundberg S.M., Lee S.-I. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017. Vol. 30. P. 4765–4774. DOI: 10.48550/arXiv.1705.07874.

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 663.481

**ВАЛОРИЗАЦИЯ ПИВНОЙ ДРОБИНЫ
И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
В ПРОИЗВОДСТВЕ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ****Бурак Л.Ч., Сапач А.Н.***ООО «БЕЛПРОСАКВА», Минск, e-mail: leonidburak@gmail.com*

Основной побочный продукт пивоваренной промышленности пивная дробина представляет собой лигноцеллюлозный материал, богатый белками, волокнами, минералами и витаминами. Цель статьи – обзор научных исследований в области валоризации соединений, полученных из пивной дробины в результате переработки, и их использования в производстве продуктов питания. В обзор включены статьи, опубликованные на английском и русском языке за 2015–2025 год. Поиск научной литературы по данной теме проводили по ключевым словам в библиографических базах Scopus, Web of science, Google Scholar и научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU. Среди статей, соответствующих критериям включения, для составления данного обзора было выбрано 46 исследований. Результаты исследования показали, что соединения, полученные из пивной дробины, используются в различных пищевых продуктах, таких как хлеб, печенье, выпечка, макароны, лапша, кексы, молочные йогурты, кондитерские изделия, колбасы и майонез. Основная проблема использования пивной дробины в качестве добавки в производстве пищевых продуктов заключается в том, что она оказывает существенное влияние на состав, что может негативно изменять физические, реологические и текстурные свойства продукта, а также их органолептические показатели качества. С целью улучшения качества пивной дробины предложены различные методы предварительной обработки и модификации, такие как ферментация, экстракция необходимых соединений, экструзия, сушка и изменения состава. Несмотря на значительное количество исследований по потенциальному применению пивной дробины, следует отметить, что результатов исследования механизмов формирования текстуры, цвета и запаха пищевых продуктов, а также их полезных свойств при внесении пивной дробины незначительно. Необходимы дальнейшие научные исследования, направленные на изучение взаимодействия пивной дробины и продуктов ее переработки с другими пищевыми ингредиентами, определение технологических параметров смешивания, механических свойств и энергоэффективности процесса переработки самой пивной дробины.

Ключевые слова: пивная дробина, сушка, пищевая ценность, обработка, экструдирование, мука, белковый гидролизат, текстура, водопоглощающая способность

**VALORIZATION OF BREWER'S GRAINS
AND PROSPECTS FOR USE IN FOOD PRODUCTION****Burak L.Ch., Sapach A.N.***Limited Liability Company «BELROSAKVA», Minsk, e-mail: leonidburak@gmail.com*

The main by-product of the brewing industry, brewer's grains, are a lignocellulosic material rich in proteins, fibers, minerals, and vitamins. The aim of the article is to review scientific research in the field of valorization of compounds obtained from brewer's grains as a result of processing and their use in food production. The review includes articles published in English and Russian in 2015–2025. The search for scientific literature on this topic was carried out, using keywords, in the bibliographic databases Scopus, Web of Science, Google Scholar, and Scientific Electronic Library eLIBRARY.RU. Among the articles that met the inclusion criteria, 46 studies were selected for this review. The results of the study showed that compounds obtained from brewer's grains are used in various food products, such as bread, cookies, pastries, pasta, noodles, muffins, milk yogurts, confectionery, sausages, and mayonnaise. The main problem with the use of brewer's grain as an additive in food production is that it has a significant effect on the composition, which can negatively change the physical, rheological and textural properties of the product, as well as their organoleptic quality indicators. In order to improve the quality of brewer's grain, various methods of pre-treatment and modification have been proposed, such as fermentation, extraction of the necessary compounds, extrusion, drying and composition changes. Despite the significant number of studies on the potential use of brewer's grain, it should be noted that the results of studying the mechanisms of formation of texture, color and smell of food products, as well as their beneficial properties when adding brewer's grain are insignificant. Further scientific research is needed to study the interaction of brewer's grain and its processed products with other food ingredients, the technological parameters of mixing, the mechanical properties and energy efficiency of the processing of brewer's grain itself.

Keywords: brewer's grain, drying, nutritional value, processing, extrusion, flour, protein hydrolysate, texture, water absorption capacity

Введение

Создание устойчивых продовольственных систем является основополагающим аспектом для обеспечения глобальной продовольственной безопасности, а также для максимального снабжения продуктами

питания, что обусловлено требованиями к их качеству и безопасности. Комплексный подход к устойчивости позволяет не только обеспечить стабильность производства и поставок, но и снизить количество отходов, минимизировать нагрузку на природные

ресурсы и поддержать биоразнообразие. Побочные продукты переработки пищевых продуктов, часто рассматриваемые как отходы, могут быть преобразованы в ценные продукты, способствующие экономике замкнутого цикла за счет снижения воздействия на окружающую среду и увеличения рентабельности [1]. Пивная дробина (ПД), основной побочный продукт пивоваренной промышленности, является примером отходов агропромышленного производства, которые постоянно исследуются в качестве потенциального источника биологически активных соединений. Объем производства пива во всем мире ежегодно возрастает, достигнув 1,9 миллиарда в 2023 году [2]. В процессе производства 100 л пива образуется 20 кг ПД. Если мировое производство пива оценивается примерно в 1,9 миллиарда в год, то это означает, что во всем мире было образовано примерно 41,9 миллиона тонн ПД [3]. В 2022 году наибольшее производство пива в Европе было произведено в Германии, за ней следуют Испания и Польша, где общий объем производства составил около 166,73 млн гектолитров. При этом в Европе было произведено около 3,67 млн тонн ПД [3]. В России объём производства пива в 2024 году составил 78,89 млн гектолитров, что предполагает образование 1,74 млн тонн пивной дробины. Как было установлено результатами исследований, ПД содержит значительное количество питательных веществ, таких как биологически активные пищевые волокна (целлюлоза 28,7%, гемицеллюлоза 17,5% и лигнин 16,9%), полифенольные соединения (протокатеховая, кофейная, кумаровая, феруловая кислоты, катехин и производные), белки (хордеин, глютелин, глобулин и альбумин), аминокислоты (глутамин, пролин и лейцин), жирные кислоты (пальмитиновая, линолевая, олеиновая и стеариновая кислоты), макро- и микроэлементы, которые оказывают благотворное влияние на здоровье организма [4]. Кроме того, ПД и продукты ее переработки обладают биологической активностью, что позволяет использовать их в качестве пищевого и/или нутрицевтического ингредиента. В ходе исследований установлено, что они обладают антиоксидантными свойствами, а также могут оказывать противомикробное, антимуtagenное и противовоспалительное действие [4]. В целях максимального использования пивной дробины и продуктов ее переработки в качестве ингредиента с добавленной стоимостью было проведено значительное количество научных исследований и практических экспериментов, направленных на улучшение биологически активных соединений как в ко-

личественном, так и в качественном отношении, а также их применение в пищевых продуктах [5-7]. В целом, включение ПД в пищевые продукты повышает их пищевую ценность, биологическую активность, антиоксидантные свойства [8; 9]. Решение проблем, связанных с освоением промышленного производства продуктов питания с добавлением ПД, может быть реализовано за счет разработки инновационных продуктов и эффективных технологических процессов. Исследования и разработка новых и инновационных продуктов во многом важны и необходимы по причине негативного влияния добавок ПД на формирование текстуры, цвет и приемлемость продукта покупателями [8; 10]. До настоящего времени значительных исследований и фундаментальных данных о влиянии соединений, полученных из ПД, на качество пищевых продуктов не установлено. Анализ опубликованных научных исследований показал, что в них в основном рассматривались вопросы повышения качества пивной дробины традиционными методами, в частности такие, как технологическая обработка, пищевая ценность, приемлемость и стабильность качества, но при этом не исследовали, какие процессы и изменения биологически активных соединений происходят во время обработки, какое влияние они оказывают на качество пищевых продуктов. В течение последнего десятилетия использование ПД в производстве продуктов питания было ограничено только несколькими пищевыми продуктами, такими как хлеб и тесто, экструдированные продукты, печенье и выпечка, макароны, сыр и йогурт. В последние несколько лет исследования валоризация ПД и его производных в качестве пищевого ингредиента значительно увеличились. В связи с этим **цель данной работы** – обзор научных исследований в области валоризации соединений, полученных из пивной дробины в результате переработки, и их использование в производстве продуктов питания.

Материалы и методы исследования

Поиск научной литературы на английском языке по исследованию валоризации пивной дробины и ее производных, методов обработки, модификации и потенциального использования в производстве продуктов питания проводили в библиографических базах Scopus и Web of Science. Для отбора научных статей на русском языке провели поиск по ключевым словам в Google Scholar и научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU.

В качестве временных рамок для обзора научных публикаций принят период с 2015 по 2025 год. При выполнении ра-

боты использованы научные методы: поиск и скрининг научной литературы, извлечение данных, их анализ, систематизация и обобщение. При отборе публикаций для обзора приоритет отдавали высокоцитируемым источникам. Для обзора предметного поля проведенного исследования использовали алгоритм в соответствии с протоколом PRISMA и составляли схему проведения исследования.

Критерии включения и исключения источников

Для поисковых запросов в зарубежных базах данных базах Scopus, Web of Science и PubMed были использованы следующие ключевые слова и словосочетания на английском языке: valorization of brewer's grain, processing and extraction methods, extrusion, extraction, drying, brewer's grain flour, protein hydrolysate, food additive from brewer's grain. Ключевые слова на русском языке в базе данных Google Scholar и научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU: валоризация пивной дробины, методы обработки и извлечения, экструзия, экстракция, сушка, мука из пивной дробины, гидролизат белка, пищевая добавка из пивной дробины.

Представим критерии включения и исключения для статей, подлежащих анализу.

Критерии включения:

(1) статья написана в период с 2015 по 2025 год;

(2) статья соответствует теме исследования;

(3) типы анализируемых статей – оригинальные исследовательские статьи, обзорные статьи, краткие отчеты.

Критерии исключения:

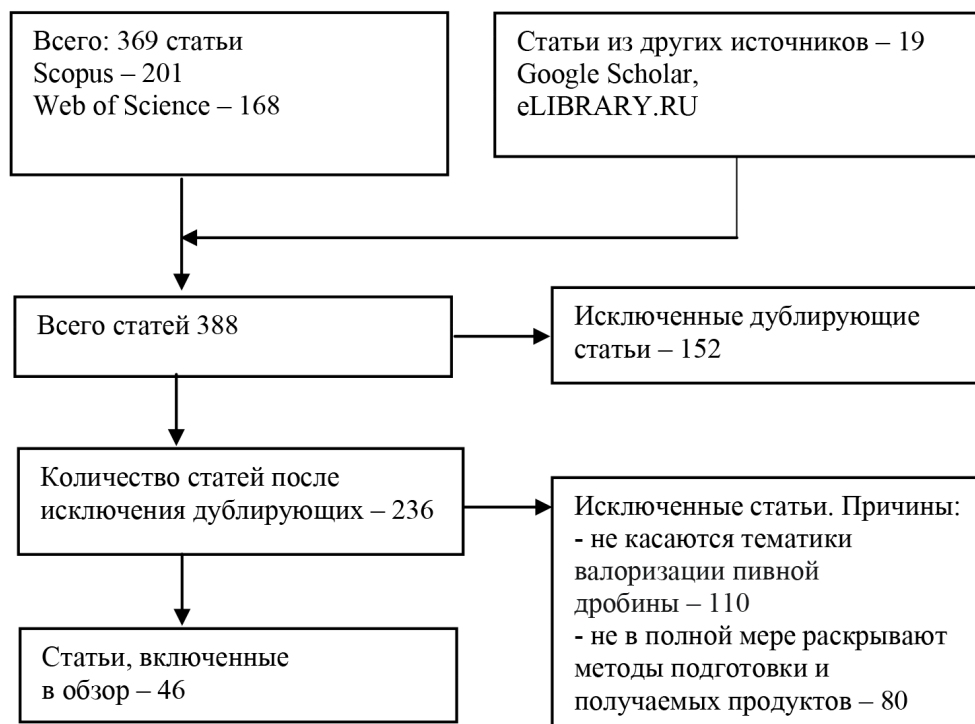
(1) статья не соответствует теме данного обзора – не касается тематики валоризации пивной дробины и потенциального использования в пищевой промышленности;

(2) статья написана не на английском языке, статья на русском языке не входит в РИНЦ;

(3) содержание статьи дублируется. Если из разных баз данных или разных электронных библиотечных систем были извлечены повторяющиеся источники, их классифицировали только один раз.

Анализ и систематизация данных

Для визуализации данных результаты анализа были представлены в виде таблиц и диаграмм. Для обзора предметного поля проведенного исследования использовали алгоритм в соответствии с протоколом PRISMA и составили схему проведения исследования (рисунок).



Блок-схема, описывающая процесс выбора исследования, в соответствии с протоколом PRISMA
Примечание: PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation, 2018
(<https://www.acpjournals.org/doi/10.7326/M18-0850>). In the public

Результаты исследования и их обсуждение

1. Использование пивной дробины в производстве пищевых продуктов

Количество исследований пищевых продуктов, в процессе производства которых использовали пивную дробину, за период с 2020 по 2025 год значительно возросло. Более ранние исследования были ограничены только такими видами продуктов, как хлеб и печенье, а за последние пять лет в ходе исследований установлена потенциальная возможность использования пивной дробины и в других видах пищевой продукции [11]. Результаты данных исследований показали, что валоризации пивной дробины в качестве пищевого ингредиента уделяется значительное внимание. Необходимо выделить несколько проблем, включая технологическую модификацию обработки, приемлемость этих продуктов, уровень технологической и системной готовности, эффективность производства и экономическую эффективность. В целом, эти исследования показали, что ПД оказывает значительное влияние на текстуру и увеличение кажущейся плотности, что, таким образом, влечет за собой рост потребления энергии для обработки, а также препятствует объемному расширению. Результаты влияния ПД на качественные показатели пищевых продуктов подробно описаны в исследованиях Anisha et al., Ginindza et al. и Torbica et al. [12-14].

1.1. Хлеб

Как уже отмечалось, наиболее изученным пищевым продуктом, в состав которого вносили ПД, является хлеб. В процессе хлебопечения для изменения свойств хлеба использовали муку, изготовленную различными способами, включая традиционные методы и технологические модификации. Результаты исследования Naibaho J., Korzeniowska M показали, что добавление ПД изменило технологические и физическо-химические свойства, приемлемость, текстурные свойства и запах [11]. В данном исследовании приготовление хлеба с добавлением ПД анализируют в комплексе с предварительной обработкой пивной дробины. Пивную дробину подвергали сушке и измельчению для достижения определенной влажности и размера частиц. Размер частиц оказывал влияние на его функциональность при замешивании теста, воздействуя, таким образом, на формирование структуры теста и готового хлеба. ПД добавляют в хлеб в различных модификациях продуктов переработки, включая необработанную

муку ПД, обработанную ПД и извлекаемые из ПД экстракты необходимых веществ, таких как белок и/или клетчатка.

1.1.1. Хлеб, обогащенный необработанной мукой ПД

Традиционные методы исследования включали количества вносимой муки ПД при выпечке хлеба в различные периоды ферментации [15] и композитных рецептов, объединяющих муку ПД с другими ингредиентами [13], при этом исследований по определению биологически активных соединений разработанных видов хлеба практически не установлено. По результатам органолептической оценки, наиболее приемлемым был образец хлеба, в рецептуре которого 10% муки ПД [15]. Данное количество муки ПД увеличивало время готовности теста в два раза, стабильность теста и степень размягчения теста. По сравнению с контролем хлеб с 10% муки ПД имел больший вес буханки (10%) и содержал в своем составе на 42% больше белка, а макроэлементов Ca, Mg и P больше на 25–51%. Кроме того, в данном образце, по сравнению с контролем, увеличение составило: золы в 1,7 раза, сырого жира в 1,4 раза и клетчатки в 4,8 раза [15]. Следует отметить, что состав муки пивной дробины может отличаться, так как в процессе пивоварения в затор вносят насоложенные материалы, такие как кукуруза, гречиха, рожь и др. В связи с этим, с учетом различного состава муки из ПД, проводились исследования по их влиянию на качество готового продукта [16-18]. Так, например, результаты исследования влияния ПД, содержащей ячмень, и ПД, содержащей рожь, на реологические свойства пиццы показали, что оба вида муки ПД увеличивали твердость на 10%, липкость на 9% и жевательность на 12% [18]. Однако сравнение других показателей, таких как пищевая ценность и органолептические свойства, не проводили. Наличие гречихи в ПД влияет как на свойства теста, так и на свойства готового хлеба [17]. По сравнению с содержащим гречиху, тесто без гречихи имело более высокое водопоглощение (на 3% выше) и индекс размягчения (на 23% выше); меньшее время созревания теста и его стабильность (на 22% и 50% ниже соответственно); но при этом она создавала тот же уровень температуры желатинизации, что и в ПД, содержащем гречиху. При оценке качества хлеба установлено, что присутствие гречихи снижает выход хлеба, удельный объем, пористость мякиша, содержание белка, крахмала, липидов и золы. Хотя оба вида

муки ПД (добавка 10%) по-разному влияют на смесь и готовый хлеб, они имеют тот же уровень приемлемости, что и контрольный образец [17].

1.1.2. Хлеб, обогащенный обработанной ПД

В качестве методов предварительной обработки пивной дробины в ходе исследований использовали термическую обработку и сушку [19], экструзию [14], ферментативную обработку и ферментацию [20-22]. Термическая обработка (100 °С; 20 мин.) ПД проводилась с целью подготовки водной фракции в качестве готового к употреблению напитка, в то время как остаток применяется при выпечке хлеба [19]. Наиболее значимым от внесения подготовленной таким способом ПД было увеличение содержания клетчатки с 1,5% до 3,2%. За исключением того, что в процессе обработки водная фракция снижает содержание растворимого сахара и белка в оставшемся жмыхе ПД, что может оказывать значительное влияние на функциональность теста и качество хлеба, оценка влияния на физико-химические показатели и пищевую ценность в данном исследовании не проводилась [19]. В исследовании, где в качестве обработки ПД использовали экструзию, кроме ПД использовали жом сахарной свеклы и яблочные выжимки. Выбранные побочные продукты смешивались с кукурузной крупой, экструдировались и использовались для замены 10% или 20% цельнозерновой пшеничной муки в рецептурах хлеба. В ходе данного исследования провели анализ реологических свойств теста и определили физико-химические свойства хлеба (пищевой профиль, цвет, текстура и объем), сенсорные характеристики, а также предпочтения и принятие хлеба потребителями. Разработанные виды хлеба характеризовались повышенным общим содержанием пищевых волокон, в то время как содержание белка в них оставалось неизменным по сравнению с цельнозерновым пшеничным хлебом [14]. Полученные результаты показали возможность экструзии минимизировать отрицательное влияние ПД на физические и механические свойства хлеба.

Ферментация ПД проводилась с использованием *Lactobacillus plantarum* и *Lactobacillus rhamnosus* в сочетании с процессом осахаривания [21], в то время как в другом исследовании в процессе ферментации ПД для поддержки роста микроорганизмов использовали сахарозу [20]. Хлеб с добавлением ферментированной ПД имел более высокое содержание масляной кислоты

и γ -аминомасляной кислоты, что оказало положительное влияние на микробиоту кишечника во время испытаний *in vitro* [20]. По сравнению с контролем, добавление ферментированного ПД изменяет свойства теста, увеличивает пик вязкости (почти вдвое), максимальный крутящий момент (до 4 раз выше). Также было исследовано и проведено сравнение с хлебом из пекарской муки и цельнозерновой муки влияние порошка ПД (ППД) и ферментированной ПД (ФПД) на хлебное тесто, конечное качество хлеба и его пищевую ценность [21]. Внесение ППД и ФПД привело к более значимому и быстрому развитию клейковины, снижению способности клейстеризации крахмала и повышению сопротивления/жесткости теста. Вместе с тем ферментация положительно влияла на характеристики хлеба, что привело к увеличению удельного объема, снижению твердости мякиша и микробиологической стабильности. Кроме того, добавление ФПД замедлило высвобождение редуцирующих сахаров с течением времени в процессе *in vitro* переваривания крахмала [21]. Результаты данного исследования показали, что ферментация ПД может улучшить техно-функциональные свойства хлеба и повысить его пищевую ценность. Результаты исследования показали, что ферментация могла изменить белок в ПД и pH с образованием молочной кислоты. Следовательно, это могло способствовать формированию клейковинной сети и гидрофобному взаимодействию которые могут не происходить при добавлении неферментированной ПД. Более низкий pH ослабляет клейковинную сеть, тем самым снижая твердость теста и создавая более мягкую текстуру мякиша [21; 22]. Использование ферментированной ПД в качестве закваски и замена до 10% способствует снижению интенсивности восприятия запаха готового хлеба и в итоге положительной органолептической оценке потребителем [21; 22]. Необходимо также отметить исследование авторов Păcală M.-L., Sîrbu A., Şiroş A., в ходе которого был изучен технологический потенциал вторичной переработки непромытой пивной дробины в хлебопечении и дана сравнительная оценка качества хлеба, обогащенного неферментированными и ферментированными молочной кислотой ПД, полученными из заторов, сваренных с крахмальными добавками гречихи и овса [23]. Наибольшее значение объема буханки (318,68 см³ /100 г) получено при добавлении 5% ферментированной ПД с гречневой крупой. Снижение влажности мякиша составило 22% для всех образцов, причем этот параметр связан

с весом хлеба. Пористость хлеба, эластичность, кислотность и общая сенсорная приемлемость были лучше для ферментированной, чем неферментированной ПД. Результаты доказали, что ПД с добавлением гречихи и овса обладает потенциальной способностью повышения пищевой ценности и расширения ассортимента хлеба, а молочнокислое брожение, примененное к ПД, эффективно также для улучшения органолептических показателей качества готового хлеба [23].

1.2. Печенье и выпечка

Большинство проведенных исследований, относящихся к использованию ПД в качестве ингредиента для печенья или других видов мучных кондитерских изделий, посвящены в основном исследованию улучшения пищевой ценности, при этом исследование по оценке изменения микроструктуры и биологической активности практически отсутствуют. Heredia-sandoval et al. изготавливали образцы печенья с заменой пшеничной муки ПД (0, 10, 20 и 30%) и провели анализ реологических свойств теста, содержание фенольных кислот, антиоксидантную способность, содержание арабиноксианов и общего состава печенья [24]. Результаты показали, что содержание белка и биоактивных соединений (феруловая и *n*-кумаровая кислоты, неизвлекаемые водой арабиноксианов) печенья значительно ($p < 0,05$) увеличивалось с увеличением количества ПД. По сравнению с печеньем, изготовленным только из пшеничной муки, печенье, содержащее 20% ПД, показало более низкий гидролиз и гликемический индекс (ГИ), а также меньшее количество общего крахмала [24]. Необходимо отметить исследование функциональных свойств мучных смесей, состава, калорийности и физико-химических показателей качества полученного печенья, изготовленного из смеси муки пшеничной (70%) и бататовой муки (30%) с добавлением ПД (0-9%) [25]. Обогащение смесей мукой ПД снизило насыпную плотность с 1,24 до 1,08 г/мл и водопоглощающую способность с 1,73 до 1,37 г/г, эмульгирующая способность увеличилась с 76,10 до 83,45%, а маслопоглощающая способность возросла с 2,20 до 3,66 г/г. Содержание белка, клетчатки и золы в печенье увеличилось с 10,10% до 11,32%, с 1,91% до 3,11% и с 3,87% до 5,31% соответственно. Печенье, содержащее 9% муки ПД, имело более высокое содержание клетчатки. Оценка органолептических показателей качества показала, что печенье, обогащенное 3-6% мукой ПД, было более предпочтительным, чем контрольный образец [25].

С целью улучшения сенсорных показателей качества и восприятия потребителями изготавливали овсяное печенье с различными размерами частиц овсяных хлопьев и добавлением разрыхлителя. Результаты органолептической оценки показали, что данный способ позволил минимизировать негативное влияние ПД на вкус печенья [26]. Для улучшения приемлемости печенья, обогащенного ПД, использовали различные подсластители (мед и коричневый сахар). Установлено, что применение подслащивающих веществ позволило до 40% заменять пшеничную муку мукой ПД с сохранением органолептических показателей качества, при этом в составе пивной дробины присутствовала насоложенная пшеница [27]. Исследование печенья, изготовленного с заменой 50% пшеничной муки пивной дробинкой, в составе которой 55% ржи, показало увеличение ломкости готового печенья примерно на 20% [18]. В работе авторов Nicolai M. et al. изучалось влияние замены пшеничной муки на ПД в рецептурах печенья на физико-химические и органолептические показатели качества в соотношении 50% и 75% [28]. Содержание пищевых волокон, липидов и белков в печенье при максимальном внесении ПД значительно возросло с 6,37% до 15,54%, с 9,95% до 13,06% и с 9,59% до 12,29% соответственно. При этом влажность и активность воды снизились с 11,03% до 3,37% и с 0,742 до 0,506 соответственно, что может положительно влиять на снижение микробиологической обсемененности и способствовать увеличению срока годности. Добавление ПД в печенье привело к снижению яркости и повышению твердости с 40 Н до 97 Н. Высокая органолептическая оценка качества печенья с 50% содержанием ПД показала, что ПД обладает значительным потенциалом для дальнейшего использования в производстве печенья [28]. Следует отметить, что ПД улучшает пищевой профиль печенья, не оказывая при этом негативного влияния на органолептические свойства. С целью повышения пищевой ценности пивной дробины использовали различные способы предварительной обработки, такие как автоклавирувание, ферментация и экструзия [29; 30]. По сравнению с автоклавируванием, ферментация ПД с микробной культурой при замене пшеничной муки 30% ПД способствовала увеличению общего содержания фенолов и антиоксидантной активности печенья. Кроме того, было отмечено увеличение активности ингибирования α -глюкозидазы, что подтверждает снижение уровня IC50 с 1 мг/мл до самого низкого уровня 0,5 мг/мл, это означает, что удваивается ак-

тивность ингибирования α -глюкозидазы. Замена пшеничной муки 30% ПД значительно снижает твердость и хрусткость, уровень сладости и усвояемость крахмала *in vitro* в печенье [30]. При изготовлении печенья с пониженным содержанием сахара использовали частичную замену муки 17% экструдированной ПД. Результаты показали, что экструдированная ПД обладает потенциалом замены сахара в производстве низкокалорийного печенья [29]. При этом экструдированная ПД оказывает благоприятное действие на кишечную систему, снижает кишечную биодоступность глюкозы с 13,7 до 6,4 мМ и увеличивает кишечную биодоступность фенольных соединений с 1,6 до 2,5 мг Faeq/г. Оценка *in vitro* антиоксидантов в двенадцатиперстной кишке показала увеличение с 18,5 до 23,6 мкмоль Faeq/г и с 7,8 до 9,9 мкмоль Faeq/г для ABTS и ORAC соответственно [29]. Кроме того, использование экструдированной ПД способствовало увеличению эффективности процесса ингибирования образования внутриклеточных АФК (активных форм кислорода) и противовоспалительной активности *in vitro* [29]. Провели сравнение ПД, полученной от двух разных пивоварен (ячменный солод ПД и ПД с овсяными хлопьями) в процессе производства образцов печенья при 30%-ной замене пшеничной муки [31]. Результаты показали, что песочное печенье содержало в 3 раза больше арабиноксилана, который, как принято считать, является потенциальным гипогликемическим соединением [31]. 30%-ная замена пшеничной муки ПД улучшала приемлемость цвета и снизила уровень сладости песочного печенья [31].

1.3. Макаaronные изделия

Потребители, заботящиеся о своем здоровье, все чаще ищут продукты с полезными для здоровья соединениями, что стимулирует растущий интерес к продуктам с высоким содержанием клетчатки и белка. Пищевая промышленность находится в постоянном поиске, связанном с разработкой и выпуском таких продуктов, которые в полной мере удовлетворяют запросы потребителей [32; 33]. Установлено, что ПД оказывает положительное влияние на пищевую ценность макаронных изделий и одновременно изменяет структуру, реологические и кулинарные свойства макаронных изделий. В течение последних пяти лет потенциал муки ПД в качестве пищевого ингредиента в производстве макаронных изделий привлек большое внимание научного сообщества. Пивная дробина содержит 30–70% пищевых волокон и 19–36% белка с незаменимыми аминокислотами, в частности

лизином, которого мало в злаках, что делает его ценным ингредиентом для таких продуктов, как макароны [34]. Чтобы найти оптимальное соотношение муки и ПД, исследовано внесение различных количеств ПД (от 3 до 25 г/100 г с добавлением яичного порошка) [35]. Как и предполагалось, с увеличением содержания ПД в смеси увеличивалось количество нерастворимых пищевых волокон в готовых макаронных изделиях, при этом ухудшались механические свойства и качество макаронных изделий при приготовлении. ПД ослабляет белковую сеть и приводит к набуханию гранул крахмала во время приготовления, тем самым вызывая потерю массы. Однако яичный белок из-за присутствия овальбумина может увеличить прочность и эластичность макаронных изделий [35]. Учитывая функциональность, оптимальные по качеству макаронные изделия были получены при добавлении 6,2% ПД [35]. Результаты исследования Nocente et al. показали, что при оценке пищевой ценности и органолептических показателей образцов макарон, приготовленных с добавлением ПД 5, 10 и 15%, образец с 5% ПД был наиболее приемлем [36], а в исследовании Curutchet et al. по результатам органолептической оценки был выбран образец, обогащенный 2,8% ПД [16]. Для улучшения органолептических свойств макаронных изделий, обогащенных ПД, использовали различные методы обработки. В исследовании Suomo et al. проводили фракционирование размера частиц ПД, с целью получения наименьшего размера (90 и 320 мкм) [37], и установили, что наименьший размер частиц – это фракция, богатая белком, а наибольший размер частиц – это фракция, богатая клетчаткой. Результаты исследования показали, что добавление ПД значительно повышает пищевую ценность, но даже наименьший размер частиц при добавлении 20% ПД неприемлем для изготовления макаронных изделий по причине негативного влияния ПД на реологические свойства макаронных изделий [37]. Neylon et al. провели исследование по изготовлению макарон с использованием ферментированной и неферментированной ПД [22]. Образец с ферментированной ПД показал лучшие техно-обрабатывающие свойства и снижение гликемического индекса [22]. С целью улучшения пищевой ценности и антиоксидантной активности макаронных изделий использовали ПД (11,6%), которая была подвергнута обработке ксиланазой с последующей ферментацией *Lactiplantibacillus plantarum* PU1 [38]. Результаты показали, что в образце с ферментированной ПД увеличение массы составило (14%), снижение

твердости (24%) и жевательности (14%) по сравнению с образцом макаронных изделий с неферментированной ПД, при этом антиоксидантная активность значительно возросла [38]. Использование ферментированной ПД в макаронных изделиях также увеличивает усвояемость белка (*in vitro*) с 78,7% в неферментированной ПД до 88,5% в макаронных изделиях с ферментированной ПД. Количество аминокислот также было выше в макаронных изделиях с использованием ферментированной ПД [38]. Потенциал применения ПД для изготовления лапши был открыт совсем недавно [39; 40]. Использование ПД в количестве 15% оказывает влияние на текстуру лапши, а образец, в котором содержание ПД было 10%, получил самую высокую органолептическую оценку. По сравнению с контролем, замена 10% ПД обеспечивает более высокий уровень свободной фенольной кислоты, содержания флавоноидов, активности DPPH и водоудерживающей способности [39]. Следует отметить, что дальнейшие исследования влияния ПД на физические свойства и качество технологической обработки пока не проводились, и это является областью дальнейших научных исследований.

1.4. Ферментированное молочные продукты

Муку ПД с размером частиц 0,42 мм в количестве 1% добавляли для выращивания пробиотических микробных заквасок, а полученную культуру использовали для производства пробиотического ферментированного молока [41]. Результаты исследования показали, что добавление ПД не влияет на кинетику ферментации, однако ПД увеличивает выживаемость *Streptococcus thermophilus* в имитированном желудочно-кишечном тракте *in vitro* и сохраняет постоянный уровень до 28 дней [41]. Муку с меньшим размером частиц (0,25 мм) использовали в ферментации йогурта с целью оценки ее влияния на процесс ферментации и микроструктурное образование, а также на консистенцию и выживаемость *L. bulgaricus* и *S. thermophilus* в течение 14 дней хранения [42]. Химический состав ПД, в частности пищевые волокна и белок, значительно влияют на процесс ферментации, формирование текстуры, активность и выживаемость молочнокислых бактерий (*LAB*). ПД (5, 10, 15 и 20%) увеличивают скорость ферментации, установленную сокращением периода ферментации для достижения целевого pH. Это явление может быть связано с высоким содержанием питательных веществ в ПД, которые необходимы для роста *LAB* [42]. Аналогичное

исследование было проведено с использованием 10% гидролизата белка ПД из трех различных ферментативных обработок ПД [43]. Различное содержание белка и пептидный состав в порошковых фракциях оказывали значительное влияние на свойства йогурта. Гидролизаты белка ПД значительно сокращают время ферментации с 4,5 часов в контроле до 2 часов, что показывает быстрый рост *LAB* за счет влияния большего количества белка. Различные количества гидролизата белка ПД по-разному изменяют микроструктуру йогурта, в частности связывание жира и белка в матрице. Это оказывает также различное влияние на выживаемость *L. bulgaricus* и *S. thermophilus*. Гидролизаты белка ПД увеличивают образование молочной кислоты по сравнению с контролем, а также рост и выживаемость *LAB*, реологические свойства и консистенцию во время хранения [43].

1.5. Колбасные изделия

Проведены научные исследования по использованию ПД в производстве колбас, влажной пивной дробины и сухой, в виде порошка [44; 45]. Влажную ПД концентрацией 3, 6 и 9% (по весу) вносили в хорватскую национальную вареную колбасу и проводили оценку физико-химических и потребительских свойств [44]. Результаты исследования показали, что добавление ПД способствует снижению содержания белка и жира, увеличивает содержание воды и не оказывает существенного влияния на цвет колбасы. Хотя микробиологический анализ показал безопасность продукта, органолептическая оценка колбасных изделий с концентрацией ПД была неудовлетворительной. Содержание влаги в ПД, используемой в данном исследовании, не указано, что ставит под сомнение интерпретацию механизма действия ПД и ее влияния на физико-химические свойства колбас. Talens et al. в своём исследовании использовали сушеную ПД (8% влажности) в количестве 5% (мас./мас.) в сочетании с мукой из брокколи и насекомых для изготовления и анализа образцов колбасы [45]. Результаты исследования показали, что 3% ПД является оптимальным, так как не оказывает негативного влияния на органолептические показатели качества, при этом увеличивает твердость и жевательность, содержание белка, клетчатки и микроэлементов, снижает содержание влаги в готовой колбасе и не оказывает отрицательного влияния на цвет [45].

1.6. Майонез

Гидролизаты белка (содержание белка 66%), полученные из ферментированной и

неферментированной ПД, сравнивали по их потенциалу в качестве растительных эмульгаторов для изготовления майонеза [46]. Ферментацию ПД проводили с использованием *Rhizopus oligosporus*, затем экстрагировали этанолом и щелочью. По сравнению с неферментированной обработкой белок, полученный с помощью ферментации, обладал более высокими эмульгирующими свойствами, такими как кремообразование, микроструктура и вязкость. Это можно объяснить различным профилем аминокислот, изменения которых происходят в процессе ферментации. Ферментация увеличивает количество аланина, глицина, аргинина и лизина в белке ПД. Кроме того, она также обеспечивает более высокую растворимость, эмульгирующие свойства, пенообразующие свойства, а также водоудерживающую и маслоудерживающую способность [46].

Заключение

Обзор современных научных исследований показал, что пивная дробина содержит значительное количество пищевых волокон, белков и фенольных соединений, которые могут быть использованы в качестве дополнительного источника биологически активных соединений в процессе производства продуктов питания, таких как хлеб, кондитерские изделия, колбасы, майонез и другие продукты. Использование пивной дробины в производстве продуктов питания способствует повышению их пищевой ценности, антиоксидантной активности, при этом сокращая количество отходов и снижая их воздействие на окружающую среду. Вместе с тем добавление пивной дробины может оказывать негативное влияние на органолептические показатели качества продуктов и их покупательную способность. Поэтому с целью улучшения качества пивной дробины и максимального использования ее пищевой ценности необходимы методы предварительной обработки и модификации, такие как ферментация, экстракция необходимых соединений, экструзия, сушка и изменения состава. Современные методы предварительной обработки, такие как ультразвуковая обработка, микроволновая обработка, наиболее приемлемы для повышения эффективности экстракции, что с учетом значительного количества образования пивной дробины будет способствовать минимизации энергопотребления. С целью широкого промышленного использования пивной дробины необходимы дальнейшие научные исследования, направленные на изучение взаимодействия пивной дробины и продуктов ее переработки с другими пищевыми ингредиентами, определение

технологических параметров смешивания, механических свойств и энергоэффективности процесса переработки самой пивной дробины.

Список литературы

1. Бурак Л.Ч., Ермошина Т.В., Саманкова Н.В. Достижение устойчивого развития за счет использования новых технологий переработки пищевых продуктов // Фундаментальные исследования. 2024. № 10. С. 171-179. <https://doi.org/10.17513/fr.43705>.
2. Conway J. Beer production worldwide from 1998 to 2022. 2023. URL: <https://www.statista.com/statistics/270275/worldwide-beer-production/> (дата обращения: 15.03.2025).
3. Pabbathi N.P.P., Velidandi A., Pogula S., Gandam P.K., Baadhe R.R., Sharma M., Sirohi R., Thakur V.K., Gupta V.K. Brewer's spent grains-based biorefineries: A critical review // Fuel. 2022. V. 317. № 123435. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123435>.
4. Aradwad P., Raut S., Abdelfattah A., Rauh C., Sturm B. Brewer's spent grain: unveiling innovative applications in the food and packaging industry // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2025. V. 24. e70150. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70150>.
5. Agrawal D., Gopaliya D., Willoughby N., Khare S.K., Kumar V. Recycling potential of brewer's spent grains for circular biorefineries // Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. 2023. V. 40. № 100748. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100748>.
6. De Paula M., Latorres J.M., Martins V.G. Potential valorization opportunities for brewer's spent grain // European Food Research and Technology. 2023. V. 249(10). P. 2471–2483. <https://doi.org/10.1007/s00217-023-04313-x>.
7. Nyhan L., Sahin A.W., Schmitz H.H., Siegel J.B., Arndt E.K. Brewers' spent grain: An unprecedented opportunity to develop sustainable plant-based nutrition ingredients addressing global malnutrition challenges // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2023. V. 71(28). P. 10543–10564. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c02489>.
8. Naik A.S., Brugiare M., Dunne K., Sorohan M., Grasa L., Javed B. Protease hydrolysed brewers' spent grain bioactive extracts for applications in human health // Systems Microbiology and Biomanufacturing. 2024. V. 4(3). P. 1062–1075. <https://doi.org/10.1007/s43393-024-00241-3>.
9. Gutiérrez-Barrutia M.B., del Castillo M.D., Arcia P., Cozzano S. Feasibility of Extruded Brewer's Spent Grain as a Food Ingredient for a Healthy, Safe, and Sustainable Human Diet // Foods. 2022. V. 11. № 1403. <https://doi.org/10.3390/foods11101403>.
10. Oyedele A.B., Wu J. Food-based uses of brewers spent grains: Current applications and future possibilities // Food Bioscience. 2023. V. 54. № 102774. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102774>.
11. Naibaho J., Korzeniowska M. Brewers' spent grain in food systems: Processing and final products quality as a function of fiber modification treatment // J Food Sci. 2021. V. 86. P. 1532–1551. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15714>.
12. Anisha A., Kaushik D., Kumar M., Kumar A., Esatbeyoglu T., Proestos C., Khan M.R., Elobeid T., Kaur J., Oz F. Valorisation of Brewer's spent grain for noodles preparation and its potential assessment against obesity // International Journal of Food Science and Technology. 2023. V. 58(6). P. 3154–3179. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16443>.
13. Ginindza A., Solomon W.K., Shelembe J.S., Nkambule T.P. Valorisation of brewer's spent grain flour (ПДФ) through wheat-maize-ПДФ composite flour bread: Optimization using D-optimal mixture design // Heliyon. 2022. V. 8(6). № e09514. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09514>.
14. Torbica A., Škrobot D., Janić Hajnal E., Belović M., Zhang N. Sensory and physico-chemical properties of wholegrain wheat bread prepared with selected food by-products // Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie. 2019. V. 114. № 108414. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108414>.
15. Yitayew T., Moges D., Satheesh N. Effect of brewery spent grain level and fermentation time on the quality of bread // International Journal of Food Science. 2022. V. 13. P. 1–10. <https://doi.org/10.1155/2022/8704684>.

16. Curutchet A., Serantes M., Pontet C., Prisco F., Arcia P., Barg G., Menendez J.A., Ta'rraga A. Sensory features introduced by brewery spent grain with impact on consumers' motivations and emotions for fibre-enriched products // *Foods*. 2021. V. 11(1). P. 36. <https://doi.org/10.3390/foods11010036>.
17. Czubaszek A., Wojciechowicz-Budzisz A., Spychaj R., Kawa-Rygielska J. Effect of added brewer's spent grain on the baking value of flour and the quality of wheat bread // *Molecules*. 2022. V. 27(5). № 1624. <https://doi.org/10.3390/molecules27051624>.
18. Ramu Ganesan A., Hoellrigl P., Mayr H., Martini Loesch D., Tocci N., Venir E., Conterno L. The rheology and textural properties of bakery products upcycling brewers' spent grain // *Foods*. 2023. V. 12(19). № 3524. <https://doi.org/10.3390/foods12193524>.
19. Lamas D.L., Gende L.B. Valorisation of brewers' spent grain for the development of novel beverage and food products // *Applied Food Research*. 2023. V. 3(2). № 100314. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100314>.
20. Koirala P., Costantini A., Maina H.N., Rizzello C.G., Verni M., Beni V.D., Polo A., Katina K., Cagno R.D., Coda R. Fermented brewers' spent grain containing dextran and oligosaccharides as ingredient for composite wheat bread and its impact on gut metabolome in vitro // *Fermentation*. 2022. V. 8(10). № 487. <https://doi.org/10.3390/fermentation8100487>.
21. Neylon E., Arendt E.K., Zannini E., Sahin A.W. Fermentation as a tool to revitalize brewers' spent grain and elevate techno-functional properties and nutritional value in high fibre bread // *Foods*. 2021. V. 10(7). № 1639. <https://doi.org/10.3390/foods10071639>.
22. Neylon E., Arendt E.K., Zannini E., Sahin A.W. Fundamental study of the application of brewers spent grain and fermented brewers spent grain on the quality of pasta // *Food Structure*. 2021. V. 30. № 100225. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2021.100225>.
23. Păcălă M.-L., Sîrbu A., Şipoş A. Non-Conventional Brewers' Spent Grains, an Alternative Raw Material in Bread-Making // *Foods*. 2024. V. 13. № 3442. <https://doi.org/10.3390/foods13213442>.
24. Heredia-sandoval n. G., Granados-Neva'rez M. Del C., Caldero'n de la Barca A.M., Va'squez-Lara F., Malunga L.N., Apea-Bah F.B., Beta T., Islas-Rubio A.R. Phenolic acids, antioxidant capacity, and estimated glycemic index of cookies added with brewer's spent grain // *Plant Foods for Human Nutrition*. 2020. V. 75(1). P. 41–47. <https://doi.org/10.1007/s1130-019-00783-1>.
25. Okpala L.C., Ofoedu P.I. Quality characteristics of cookies produced from sweet potato and wheat flour blend fortified with brewer's spent grain flour // *Current Research in Nutrition and Food Science*. 2018. V. 6(1). P. 113–119. <https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.6.1.12>.
26. Nguyen Q.C., Castura J.C., Nguyen D.D.L., Varela P. Identifying temporal sensory drivers of liking of biscuit supplemented with brewer's spent grain for young consumers // *Food Research International*. 2023. V. 170. № 113049. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113049>.
27. Baiano A., Fiore A. Sustainable food processing: Single and interactive effects of type and quantity of brewers' spent grain and of type of sweetener on physicochemical and sensory characteristics of functional biscuits // *International Journal of Food Science and Technology*. 2023. V. 58(11). P. 5757–5772. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16674>.
28. Nicolai M., Palma M.L., Reis R., Amaro R., Fernandes J., Gonçalves E.M., Silva M., Lageiro M., Charmier A., Mauricio E. Assessing the Potential of Brewer's Spent Grain to Enhance Cookie Physicochemical and Nutritional Profiles // *Foods*. 2025. V. 14(1). № 95. <https://doi.org/10.3390/foods14010095>.
29. Gutierrez-Barrutia M.B., Cozzano S., Dolores del Castillo M. Assessment of in vitro digestion of reduced sugar biscuits with extruded brewers' spent grain // *Food Research International*. 2023. V. 172. № 113160. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113160>.
30. Wang X., Xu Y., Teo S.Q., Heng C.W., Lee D.P.S., Gan A.X., Kim J.E. Impact of solid-state fermented Brewer's spent grains incorporation in biscuits on nutritional, physical and sensorial properties // *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*. 2023. V. 182. № 114840. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114840>.
31. Sileoni V., Alfeo V., Bravi E., Belardi I., Marconi O. Upcycling of a by-product of the brewing production chain as an ingredient in the formulation of functional shortbreads // *Journal of Functional Foods*. 2022. V. 98. № 105292. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105292>.
32. Бурак Л.Ч., Сапач А.Н. Влияние действия ультразвука на функциональные свойства растительных белков. Обзор предметного поля // *Химия растительного сырья*. 2024. № 4. С. 5-23. <https://doi.org/10.14258/jcrpm.20240413599>.
33. Бурак Л.Ч., Карбанович В.И. Влияние валоризованных растительных белков и фенольных соединений на пищевую ценность и усвояемость. Обзор последних достижений // *Научное обозрение. Технические науки*. 2024. № 2. С. 35-41.
34. Souza A., Arias E., Arellano V., Macarin G., Varga S., Raggio L.M. Re-evaluating a beer industry by-product towards a sustainable product: pasta from beer by-product // *Frontiers in Food Science and Technology*. 2025. V. 5. № 1491253. <https://doi.org/10.3389/frfst.2025.1491253>.
35. Cappa C., Alamprese C. Brewer's spent grain valorization in fiber-enriched fresh egg pasta production: Modelling and optimization study // *LWT – Food Science and Technology*. 2017. V. 82. P. 464–470. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.04.068>.
36. Nocente F., Taddei F., Galassi E., Gazza L. Upcycling of brewers' spent grain by production of dry pasta with higher nutritional potential // *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie*. 2019. V. 114. № 108421. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108421>.
37. Cuomo F., Trivisonno M.C., Iacovino S., Messina M.C., Marconi E. Sustainable Re-use of brewer's spent grain for the production of high protein and fibre pasta // *Foods*. 2022. V. 11(5). № 642. <https://doi.org/10.3390/foods11050642>.
38. Schettino R., Verni M., Acin-Albiac M., Vincentini O., Krona A., Knaapila A., Cagno R.D., Gobetti M., Rizzello C.G., Coda R. Bioprocessed brewers' spent grain improves nutritional and antioxidant properties of pasta // *Antioxidants*. 2021. V. 10(5). № 742. <https://doi.org/10.3390/antiox10050742>.
39. Anisha A., Kaushik D., Kumar M., Kumar A., Esatbeyoglu T., Proestos C., Khan M.R., Elobeid T., Kaur J., Oz F. Valorisation of Brewer's spent grain for noodles preparation and its potential assessment against obesity // *International Journal of Food Science and Technology*. 2023. V. 58(6). P. 3154–3179. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16443>.
40. Shi P., Ng Yuen Kai R., Vijayan P., Lim S. L., Bhaskaran K. Valorization of spent barley grains: Isolation of protein and fibers for starch-free noodles and its effect on glycemic response in healthy individuals // *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2023. V. 7. № 1146614. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1146614>.
41. Battistini C., Herkenhoff M.E., De Souza Leite M., Vieira A.D.S., Bedani R., Saad S.M.I. Brewer's spent grain enhanced the recovery of potential probiotic strains in fermented milk after exposure to in vitro-simulated gastrointestinal conditions // *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. 2023. V. 15(2). P. 326–337. <https://doi.org/10.1007/s12602-021-09839-8>.
42. Naibaho J., Butula N., Jonuzi E., Korzeniowska M., Laaksonen O., Fo'ste M., Kütt M.-L., Yang B. Potential of brewers' spent grain in yogurt fermentation and evaluation of its impact in rheological behaviour, consistency, microstructural properties and acidity profile during the refrigerated storage // *Food Hydrocolloids*. 2022. V. 125. № 107412. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107412>.
43. Naibaho J., Jonuzi E., Butula N., Korzeniowska M., Fo'ste M., Sinamo K.N., Chodaczek G., Yang B. Fortification of milk-based yogurt with protein hydrolysates from brewers' spent grain: Evaluation on microstructural properties, lactic acid bacteria profile, lactic acid forming capability and its physical behavior // *Current Research in Food Science*. 2022. V. 5. P. 1955–1964. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.10.016>.
44. Naibaho J., Jonuzi E., Butula N., Korzeniowska M., Yang B. Soy-based yogurt-alternatives enriched with brewers' spent grain flour and protein hydrolysates: Microstructural evaluation and physico-chemical properties during the storage. *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie*. 2023. V. 178. № 114626. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114626>.
45. Mastanjević K., Perković I., Škrivanko M., Kovačević D., Biondić H., Habschied K. Effect of the Addition of Brewers' Spent Grain (BSG) on the Physicochemical and Consumer Liking Attributes of Croatian Indigenous Cooked Sausage "Bijela Krvavica" // *Appl. Sci*. 2023. V. 13. № 13049. <https://doi.org/10.3390/app132413049>.
46. Chin Y.L., Chai K.F., Chen W.N. Upcycling of brewers' spent grains via solid-state fermentation for the production of protein hydrolysates with antioxidant and techno-functional properties // *Food Chemistry X*. 2022. V. 13. № 100184. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2021.100184>.

РАЗРАБОТКА ИИ-АССИСТЕНТА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЕДИНОМУ НАЦИОНАЛЬНОМУ ТЕСТИРОВАНИЮ

Башлыков Р.В., Макабаев М.К., Ключева Е.Г., Коккоз М.М.

*НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»,
Караганда, e-mail: e.klyueva@ktu.edu.kz*

Цель исследования – разработка ассистента на основе искусственного интеллекта для поддержки подготовки учащихся к Единому национальному тестированию Республики Казахстан на примере предмета «Информатика». В рамках исследования были изучены существующие технологии разработки интеллектуальных ботов с целью выявления их потенциала в персонализации учебного процесса. В статье описан выбор архитектуры чат-бота, включающей серверную часть на языке Java с использованием фреймворков Spring Boot и Hibernate, базу данных PostgreSQL, интеграцию с Assistants Application Programming Interface от OpenAI и реализацию клиентской части через Telegram. Были определены особенности теста по информатике, разработана структура базы вопросов, а также реализованы механизмы семантического анализа и классификации запросов. В ходе разработки были получены следующие результаты: создан чат-бот, обеспечивающий тестирование с автоматической оценкой и объяснением ошибок, ответы на вопросы в пределах учебной области, а также предоставление кратких теоретических сведений. Обоснована эффективность использования генеративной модели для поддержки обучения и мониторинга прогресса учащихся. Представленное решение демонстрирует потенциал искусственного интеллекта в повышении качества и индивидуализации подготовки абитуриентов к экзаменам. Работа может быть расширена за счет пополнения базы заданий, улучшения алгоритмов анализа и добавления новых функций.

Ключевые слова: искусственный интеллект, единое национальное тестирование, персонализированное обучение, чат-бот, ассистент

DEVELOPMENT OF AN AI ASSISTANT FOR PREPARATION FOR THE UNIFIED NATIONAL TESTING

Bashlykov R.V., Makabaev M.K., Klyueva E.G., Kokkoz M.M.

*Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda,
e-mail: e.klyueva@ktu.edu.kz*

The purpose of the work: to develop an assistant based on artificial intelligence to support the preparation of students for the Unified National Testing of the Republic of Kazakhstan using the subject «Informatics» as an example. The study examined existing technologies for developing intelligent bots in order to identify their potential in personalizing the educational process. The article describes the choice of chatbot architecture, including a server part in Java using the Spring Boot and Hibernate frameworks, a PostgreSQL database, integration with the Assistants Application Programming Interface from OpenAI and implementation of the client part via Telegram. The features of the test in «Informatics» were determined, the structure of the question database was developed, and mechanisms for semantic analysis and query classification were implemented. During the development, the following results were obtained: a chatbot was created that provides testing with automatic assessment and explanation of errors, answers to questions within the educational area, and the provision of brief theoretical information. The effectiveness of using a generative model to support learning and monitor student progress is substantiated. The presented solution demonstrates the potential of artificial intelligence in improving the quality and individualization of applicants' preparation for exams. The work can be expanded by replenishing the task database, improving analysis algorithms and adding new functions.

Keywords: artificial intelligence, unified national testing, chatbot, assistant, personalized learning

Введение

Развитие цифровых технологий активно трансформирует образовательную сферу. Онлайн-обучение, интерактивные платформы и мультимедийные ресурсы делают процесс получения знаний более доступным и персонализированным. Искусственный интеллект (ИИ) занимает ключевую роль в этой трансформации, способствуя адаптивному обучению и автоматизации образовательных процессов. Примерами успешного применения ИИ в образовании являются такие продукты, как BlackBoard [1], Duolingo [2] и др.

В Казахстане вопросы цифровизации и внедрения ИИ активно обсуждаются на государственном уровне. Президент Касым-Жомарт Токаев в своем Послании народу Казахстана «Экономический курс Справедливого Казахстана» [3] уделил повышенное внимание вопросам цифровизации и внедрению инноваций, в том числе необходимости полноценного использования искусственного интеллекта для качественно нового рывка к экономике знаний.

Развитие ИИ-решений, таких как чат-боты для образовательных целей, позволяет повысить качество подготовки абитуриентов при подготовке к поступлению

в университет. Такие системы обеспечивают оперативные ответы на вопросы, автоматизированное тестирование и анализ успеваемости.

Единое национальное тестирование – важнейший элемент образовательной системы Казахстана. Оно определяет доступ выпускников к высшему образованию. Совершенствование оценки знаний по профильным дисциплинам в рамках ЕНТ, включая применение технологий искусственного интеллекта (GPT-моделей), способствует повышению объективности анализа результатов пробных тестов и прогнозированию академических успехов абитуриентов в вузах.

Согласно статистике ЕНТ за 2024 г. [4], в нем приняли участие 181 тыс. абитуриентов со средним баллом 68. Для подготовки к экзамену Национальный центр тестирования публикует на своем сайте учебные материалы, типовые задания, списки литературы, терминологию и структуру теста. Однако использование современных технологий и, в частности, искусственного интеллекта позволит этому процессу стать более эффективным и удобным.

Третье место по количеству сдававших имеет комбинация предметов по выбору «Математика – Информатика» – почти 20 тыс. абитуриентов. Несмотря на то, что предмет «Информатика» был добавлен в ЕНТ только в 2022 г., он стал одним из самых популярных направлений для сдачи и дальнейшего поступления в вузы Республики Казахстан.

Содержание теста ЕНТ по информатике представлено на сайте Национального центра тестирования Республики Казахстан [5] и включает 6 разделов, охватывающих школьную программу по данному предмету: «Компьютерные системы», «Информационные процессы», «Компьютерное мыш-

ление», «Аппаратное и программное обеспечение», «Информационные процессы и системы», «Создание и преобразование информационных объектов».

Чат-бот – это программное обеспечение, которое взаимодействует с пользователями по определенной теме или в определенной области в естественной, разговорной манере, используя текст и/или голос и обеспечивая мгновенный ответ пользователю [6, 7]. Чат-боты могут мгновенно предоставлять обучающимся различного рода сведения: содержание учебной программы, задания и даты их выполнения, критерии оценки работ, учебные материалы, новости и информацию о мероприятиях. Эти системы могут не только повысить вовлеченность и поддержку обучающихся, но и существенно снизить количество административной и рутинной работы преподавателей, позволив им сосредоточиться на разработке учебных программ и подготовке к занятиям.

ИИ-ассистент – это программа с одной или несколькими нейросетями, предназначенная для решения конкретной задачи. Чаще всего такой ассистент выглядит как обычный чат-бот с текстовым или голосовым вводом. Примером ИИ-ассистента может служить инструмент Assistant API от OpenAI и созданные с его помощью ассистенты.

Assistants позволяют создавать настраиваемые чат-боты с использованием контекста ChatGPT. Однако, в отличие от обычных GPTs, Assistants предназначены для разработчиков и не имеют пользовательского интерфейса, кроме площадки от OpenAI под названием Playground. OpenAI упростила процесс создания таких чат-ботов, позволяя разработчикам сосредоточиться на создании необходимого бота, а не на рутинной части работы.



Рис. 1. Пример процесса работы ИИ-ассистента
Источник: составлено авторами

API Assistants позволяет разработчикам создавать ассистентов, новые ветки и прикреплять сообщения к этим веткам. Файлы, загруженные в ассистента, помогают ему понимать, как реагировать на сообщения пользователей. Assistants также могут использовать различные инструменты и функции, такие как интерпретатор кода, который позволяет AI писать и выполнять код. Общий процесс работы подобного ассистента представлен на рис. 1.

Цель исследования – разработка ИИ-ассистента для подготовки к ЕНТ по предмету «Информатика», ориентированного на персонализированный подход и эффективное обучение.

Материалы и методы исследования

В рамках данной работы для разработки ассистента по подготовке к ЕНТ был выбран Assistants API. Для реализации серверной части приложения в виде RESTful API были выбраны язык программирования Java, фреймворк Spring Boot, СУБД PostgreSQL и фреймворк Hibernate для взаимодействия с базой данных. Для упрощения взаимодействия в API Assistants была выбрана библиотека от Microsoft – Azure OpenAI. Это облачная платформа, которая позволяет разработчикам и ученым в области данных быстро и легко строить и развертывать модели искусственного интеллекта.

В качестве клиентской части приложения, с которой будет взаимодействовать пользователь, используется Telegram-бот, разработанный с помощью Telegram Bot API.

Для систем с взаимодействием вида «вопрос – ответ», представителем которых является разрабатываемый чат-бот, классификация вопросов играет важную роль. Чтобы правильно ответить на вопрос, система ответа на него должна понимать тип информации, которую запрашивает пользователь, и различать, к какому типу она относится. Это помогает находить или создавать конкретные ответы, что повышает качество работы системы.

Такое взаимодействие используется в одной из функций чат-бота – ответы на вопросы или сообщения пользователя. Так как бот предназначен для подготовки к ЕНТ

по информатике, он будет отвечать только на вопросы, связанные с данной областью.

Результаты исследования и их обсуждение

Обобщенный алгоритм работы чат-бота включает в себя следующее:

- на вход ассистенту приходит текст от пользователя;

- производится предварительная обработка текста: преобразование в нижний регистр, удаление лишних знаков препинания и токенизация текста;

- производится семантический анализ текста, в процессе которого происходит поиск ключевых терминов данной области знаний (в данном случае информатики). Нахождение слов и словосочетаний, подобных «Python», «класс», «VPN», «оперативная память», повышает вероятность отношения пользовательского запроса к области знаний. Если после этого не удалось однозначно определить тематику вопроса, производится анализ контекста сообщения с помощью, встроенной в ассистента LLM;

- далее происходит принятие решения и либо генерация ответа на пользовательский вопрос, либо отказ в ответе из-за его несоответствия области знаний ассистента.

Вторая функция чат-бота – прохождение тестирования в виде, приближенном к виду ЕНТ-теста, с оценкой ответов и их объяснением, представленном в виде кратких теоретических материалов.

Процесс работы данной функции выглядит следующим образом:

1. Пользователь с помощью клиента (Telegram-бот), после выбора темы для теста, получает от сервера (RESTful API) тестовые вопросы и начинает на них отвечать.

2. Во время тестирования на клиенте сохраняются ответы пользователя.

3. После окончания тестирования формируется JSON-массив Q с элементами q_i , где каждый элемент представляет собой тестовый вопрос и содержит:

- $q_i.question$ – текст вопроса;

- $q_i.options$ – список возможных ответов;

- $q_i.correctOption$ – правильный вариант ответа;

- $q_i.selectedOption$ – выбранный пользователем вариант.

Множество Q делится на 2 подмножества. Подмножество Q_C – подмножество, содержащее вопросы с корректными ответами:

$$\forall q_i \in Q_C, q_i.selectedOption = q_i.correctOption.$$

Подмножество Q_E – подмножество, содержащее вопросы с ошибочными ответами:

$$\forall q_i \in Q_E, q_i.selectedOption \neq q_i.correctOption.$$

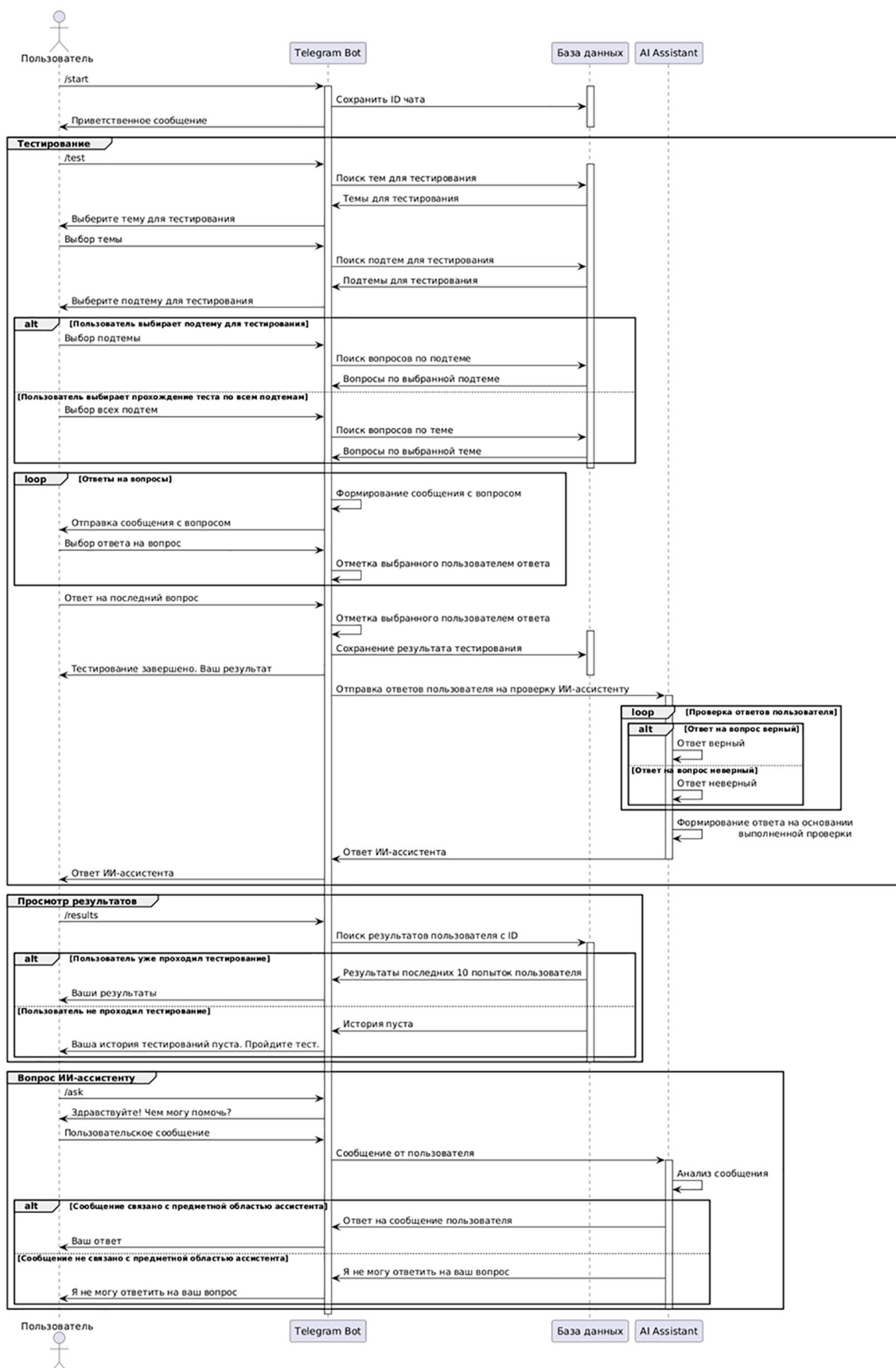


Рис. 2. Sequence диаграмма работы чат-бота
Источник: составлено авторами

Помимо вопросов, в JSON добавляется метаданная, с помощью которой ИИ-ассистент сможет сразу определить, что ему необходимо делать.

4. Передача пакета с JSON ИИ-ассистенту, работающему с предустановленной промпт-стратегией.

5. ИИ-ассистент дает ответ R , который разбирается на структурированные элементы:

$$R = \{r_1, r_2, \dots, r_k\},$$

где каждый r_i соответствует вопросу $q_i \in Q_E$ и содержит:

- $r_i.explanation$ – разбор ошибки и объяснение правильного ответа;
- $r_i.theory$ – краткий теоретический материал, относящийся к теме вопроса.

6. Создается аннотированное множество:

$$Q_A = \{q_i \cup r_i \mid q_i \in Q_E\}.$$

7. Если множество ошибок Q_E пустое – ИИ-ассистент отправляет сообщение о корректном выполнении теста. В противном случае создается документ R_f , содержащий разделы с разбором каждого вопроса из Q_E : вопрос, анализ ошибки, теоретическое пояснение.

8. Отчет R_f отправляется пользователю.

Функциональность разработанного приложения включает:

- прохождение тестирования по выбранной теме предмета «Информатика»;
- получение объяснений и теоретических материалов на основе анализа ответов пользователя;



Рис. 3. Процесс прохождения тестирования
Источник: составлено авторами

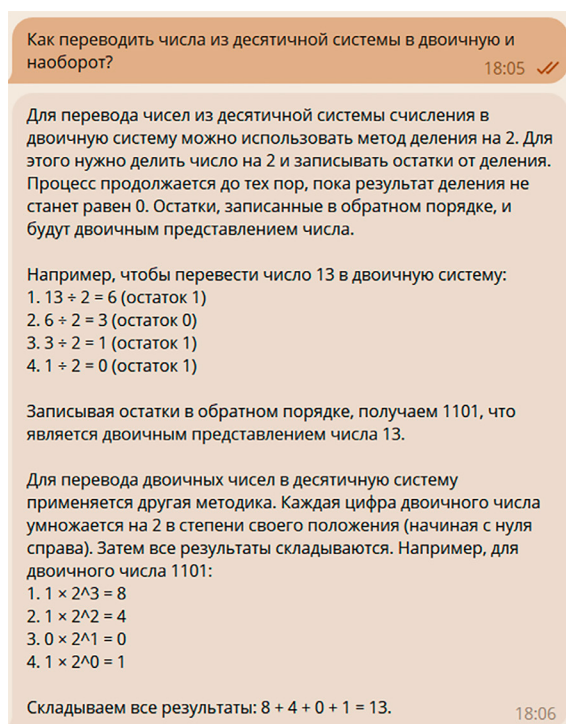


Рис. 4. Вопрос ИИ-ассистенту и его ответ
Источник: составлено авторами

– ответы на вопросы пользователя, связанные с областью предмета «Информатика»;

– просмотр истории попыток тестирований.

Sequence диаграмма, показывающая порядок взаимодействия элементов приложения, представлена на рис. 2.

Пользователь взаимодействует с ботом посредством команд, кнопок и текстовых сообщений. Согласно диаграмме последовательности работы чат-бота (рис. 2), на данный момент у бота имеется 4 команды:

– /start – для начала использования бота и перехода в главное меню при необходимости. С помощью данной команды пользователь регистрируется в чат-боте;

– /test – для начала тестирования. Происходит выбор темы тестирования и какой-то одной подтемы, по желанию пользователя, либо по всем подтемам выбранной темы. Далее происходит само тестирование. На данном этапе пользователь взаимодействует с ботом при помощи кнопок, которые содержат названия тем, подтем и варианты ответов на тестовые вопросы (рис. 3);

– /results – для просмотра истории попыток тестирований;

– /ask – для отправки вопроса ИИ-ассистенту. Здесь взаимодействие происходит в виде обмена сообщениями (рис. 4).

Согласно классификации чат-ботов [8], данный чат-бот является генеративным, так как использует нейронные сети для анализа и выдачи ответов, по внешнему виду совмещает в себе кнопочный и текстовый чат-бот, по функционалу совмещает возможности коммуникационных (позволяет общаться с собой) и функциональных (позволяет проходить тестирование для подготовки к ЕНТ) чат-ботов.

Чат-бот имеет педагогическую направленность [9], так как он содействует обучению, предоставляя возможность получения ответов на вопросы, прохождения тестов и хранения их результатов, что позволяет учащимся отслеживать свой прогресс [6].

Заключение

Разработанная клиент-серверная архитектура чат-бота обеспечивает стабильную и масштабируемую работу системы, а интеграция искусственного интеллекта и нейросетевых алгоритмов позволяет реализовать индивидуальную оценку знаний пользователей и предоставление персонализированных рекомендаций.

Созданный программный продукт не только автоматизирует процесс тестирования, но и способствует повышению уровня самостоятельной подготовки абитуриентов

за счет интерактивных объяснений ошибок и теоретических материалов по темам. Практическая реализация проекта подтверждает возможность успешного внедрения современных технологий искусственного интеллекта в образовательную сферу для повышения качества подготовки к экзаменам.

Дальнейшее развитие работы связано с расширением базы вопросов, добавлением новых типов заданий, совершенствованием алгоритмов оценивания и ответов, а также внедрением административных функций, направленных на организационную поддержку пользователей в процессе подготовки к ЕНТ.

Список литературы

1. Tira N.F. Artificial Intelligence (AI) In Education: using AI tools for teaching and learning process // Prosiding seminar nasional itb aas Indonesia tahun. 2021. № 4. P. 134–147. URL: https://www.researchgate.net/publication/357447234_Artificial_Intelligence_AI_In_Education_Using_AI_Tools_for_Teaching_and_Learning_Process#read (дата обращения: 16.02.2025).
2. Duolingo: как искусственный интеллект составляет персонализированное обучение языкам. EduTech Club // Сбер Университет. [Электронный ресурс]. URL: <https://sberuniversity.ru/edutech-club/pulse/keysy/> (дата обращения: 16.02.2025).
3. Послание Главы государства Касым-Жомарта Токаева народу Казахстана «Экономический курс Справедливого Казахстана» // Официальный сайт Президента Республики Казахстан. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.akorda.kz/ru/poslanie-glavy-gosudarstva-kasym-zhomarta-tokaeva-narodu-kazahstana-ekonomicheskij-kurs-spravedlivogo-kazahstana-18588> (дата обращения: 16.02.2025).
4. ЕНТ завершено: Какой средний балл набрали абитуриенты // Tengri Edu. [Электронный ресурс]. URL: <https://tengrinews.kz/newseducation/ent-zavershenno-kakoy-sredniy-ball-nabrali-abiturientyi-541257/?ysclid=m6rxbgzsl300380221> (дата обращения: 16.02.2025).
5. Спецификация теста по предмету информатика для Единого национального тестирования // Национальный центр тестирования. [Электронный ресурс]. URL: https://testcenter.kz/upload/iblock/e37/10_.pdf (дата обращения: 16.02.2025).
6. Okonkwo Chinedu Wilfred, Ade-Ibijola Abejide Chatbots applications in education: A systematic review // Computers and Education: Artificial Intelligence. 2021. № 2. P. 100033. URL: https://www.researchgate.net/publication/354885708_Chatbots_applications_in_education_A_systematic_review (дата обращения: 16.02.2025). DOI: 10.1016/j.caeai.2021.100033.
7. Pavel Smutny, Petra Schreiberova Chatbots for learning: A review of educational chatbots for the Facebook Messenger // Computers and Education. 2020. № 151. P. 103862. DOI: 10.1016/j.compedu.2020.103862.
8. Быков А.А., Киселева О.М. Оценка эффективности применения чат-бота как информационной поддержки преподаваемой дисциплины // Современные проблемы науки и образования. 2022. № 1. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=31481> (дата обращения: 16.02.2025). DOI: 10.17513/spno.31481.
9. Sebastian Wollny, Jan Schneider, Daniele Di Mitri, Joshua Weidlich, Marc Rittberger, Hendrick Drachsler Are We There Yet? – A Systematic Literature Review on Chatbots in Education // Frontiers in Artificial Intelligence. 2021. № 4. P. 654924. DOI: 10.3389/frai.2021.654924.

*Социальная сеть Facebook признана экстремистской организацией и запрещена на территории России.

УДК 004.9

РАЗРАБОТКА WEB-РЕСУРСА ДЛЯ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ОБУЧЕНИЯ ТЕМЕ «МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ» В ШКОЛЬНОМ КУРСЕ ФИЗИКИ

Матис М.А., Беленкова И.В.

*Нижнетагильский государственный социально-педагогический институт (филиал)
ФГАОУ ВО «Уральский государственный педагогический университет»,
Нижний Тагил, e-mail: iv-belenkova@yandex.ru*

Актуализируется необходимость разработки цифровых образовательных ресурсов по темам школьных учебных предметов. Целью исследования является формирование рекомендаций по разработке образовательного ресурса по теме курса физики в виде сайта. Описываются этапы разработки образовательного ресурса на примере разработки сайта «Магнитное поле Земли»: формирование требований к разработке ресурса, выбор средств разработки, составление структуры сайта, наполнение сайта контентом, создание визуальных и интерактивных элементов ресурса, настройка интуитивно понятного взаимодействия для пользователей. Выбор конструктора осуществляется по ряду критериев: адаптивность шаблонов, количество готовых шаблонов, возможность создать сайт с нуля, наличие обучающих материалов, возможность редактировать и добавлять код, бесплатный тариф, техподдержка. В результате был выбран конструктор Nethouse. Представлена структура сайта в виде схемы, для каждой страницы определено ее наполнение. Показаны примеры наполнения страницы лабораторной работы и страницы с интерактивными заданиями. Продемонстрированы основные решения по оформлению дизайна разрабатываемого сайта. Материалы статьи могут служить рекомендациями по разработке подобных образовательных ресурсов по другим темам школьных предметов.

Ключевые слова: образовательный ресурс, сайт, этапы разработки сайта, конструктор разработки сайта, схема сайта,

DEVELOPMENT OF A WEB RESOURCE FOR METHODOLOGICAL SUPPORT FOR TEACHING THE TOPIC “EARTH’S MAGNETIC FIELD” IN A SCHOOL PHYSICS COURSE

Matis M.A., Belenkova I.V.

*Nizhny Tagil State Socio-Pedagogical Institute (branch) of the Ural State Pedagogical University,
Nizhny Tagil, e-mail: iv-belenkova@yandex.ru*

The need to develop digital educational resources on school subjects is being updated. The purpose of the study is to formulate recommendations for developing an educational resource on the topic of a physics course in the form of a website. The stages of developing an educational resource are described using the example of developing the website “The Earth’s Magnetic Field”: forming requirements for resource development, choosing development tools, compiling a website structure, filling the website with content, creating visual and interactive elements of the resource, setting up intuitive interaction for users. The choice of a designer is made according to a number of criteria: adaptability of templates, number of ready-made templates, the ability to create a website from scratch, availability of training materials, the ability to edit and add code, free tariff, technical support. As a result, the Nethouse designer was chosen. The structure of the website is presented in the form of a diagram, and its content is defined for each page. Examples of filling a lab work page and a page with interactive tasks are shown. The main solutions for the design of the website under development are demonstrated. The materials of the article can serve as recommendations for the development of similar educational resources on other school subjects.

Keywords: educational resources, website, stages of website development, website layout, website development constructor

Введение

Совершенствование образовательных ресурсов и их интеграция в учебный процесс повышают интерес к учебному материалу и способствуют его освоению. В современных школах и других учебных учреждениях цифровые образовательные ресурсы и информационные технологии становятся неотъемлемой частью обучения, способствуя развитию различных навыков у обучающихся и расширению их знаний [1, 2]. Разработка веб-сайта с использованием современных программных средств

актуальна, поскольку обеспечивает возможность создания удобного и интерактивного образовательного ресурса, способствующего эффективному усвоению материала и повышению образовательного уровня у обучающихся в данной области [3–5]. При проведении обзора сайтов, направленных на изучение теории и выполнение практических заданий по теме «Магнитное поле Земли», было обнаружено, что не существует одного обобщающего ресурса, который бы содержал не только базовую информацию о теории магнитного поля Зем-

ли, но и объяснения экспериментов, а также задания для закрепления полученных знаний. Большинство доступных сайтов предоставляют лишь общие сведения о магнитном поле планеты. Таким образом, необходимость создания специализированного ресурса для учащихся и студентов, обобщающего различные аспекты магнитного поля Земли, представляется актуальной.

Цель исследования – формирование рекомендаций по разработке образовательного ресурса по теме курса физики в виде сайта.

Материалы и методы исследования

В данном исследовании рассматривается алгоритм разработки образовательного ресурса в виде сайта на примере темы школьного курса физики «Магнитное поле Земли». Были использованы следующие методы: анализ аналогов, анализ инструментов разработки, проектирование структуры сайта, наполнение сайта контентом, тестирование функциональности сайта.

Результаты исследования и их обсуждение

В настоящее время создание сайта перестало требовать от его разработчиков компетенций в области программирования. Сегодня разработать сайт можно с помощью конструктора. Конструктор позволяет разработать сайт без непосредственного написания кода, верстки, создания дизайна [6]. В случае разработки сайта с использованием конструктора важной задачей становится выбор подходящей платформы, позволяющей реализовать все требования, предъявляемые к веб-ресурсу на этапе проектирования. Выбор конструктора необходимо осуществлять согласно ряду критериев, актуальных для текущей разработки. Авторами статьи были выделены следующие критерии: соответствие уровню компетенций пользователей, адаптивность шаблонов, количество готовых шаблонов, возможность создать сайт с нуля, наличие обучающих материалов, возможность редактировать и добавлять код, бесплатный тариф, техподдержка [7, 8]. В результате для разработки веб-ресурса для методической поддержки обучения теме «Магнитное поле Земли» в школьном курсе физики был выбран конструктор Nethouse (<https://nethouse.ru/>).

После выбора оптимальной платформы для создания сайта необходимо выполнить проектирование его структуры, определение основных разделов, видов контента на страницах сайта. В текущий сайт было запланировано включить информацию о теории магнитного поля Земли, его основных

характеристиках, материал для изучения электромагнитной индукции, описание экспериментов по измерению характеристик магнитного поля Земли. Для определения структуры сайта была создана схема с использованием сервиса app.creately (<https://creately.com/>), которая представлена на рис. 1.

При создании и наполнении сайта важно, чтобы весь контент был систематизирован, разделен на разделы, интуитивно понятные пользователям.

Структура разрабатываемого веб-ресурса состоит из следующих основных разделов:

- Главная. Это страница, на которой можно найти общее описание веб-ресурса, цель его представления, контакты для связи с автором сайта, несколько интересных фактов по теме «Магнитное поле Земли».

- Теория. Это страница, на которой размещена краткая теория в виде текста, картинок и ссылок на ресурсы, на которых представлен более подробный материал. Также на странице будет представлен краткий словарь по теме.

- Эксперимент. Это страница, на которой расписан порядок выполнения лабораторной работы, используемое оборудование, ожидаемые результаты.

- Кроссворд. Это страница с кроссвордом и викториной для закрепления материала по теме веб-ресурса.

- Контакты. Это страница с личными данными создателя сайта.

- Отзывы и комментарии. Это страница, где посетители могут оставить свой отзыв или же задать вопрос по теме.

После определения структуры сайта на платформе Nethouse необходимо наполнить каждую страницу контентом. Так, например, для создания заданий для закрепления материала был использован такой сервис, как LearningApps (<https://learningapps.org/>). Бесплатный онлайн-портал, позволяющий создавать задания, которыми можно проверить уровень знаний и усвоение материала. В сервисе были созданы кроссворд, викторина и пара интерактивных заданий для закрепления материала и полезного времяпровождения, которые впоследствии были добавлены на сайт. Пример фрагмента задания, созданного в сервисе, представлен на рис. 2.

Кроме того, на сайт была добавлена лабораторная работа, направленная на измерение магнитного поля Земли. На странице представлена инструкция по работе с оборудованием «Радуга», инструкция по проведению лабораторной работы, видео, демонстрирующее ход проведения эксперимента (рис. 3).

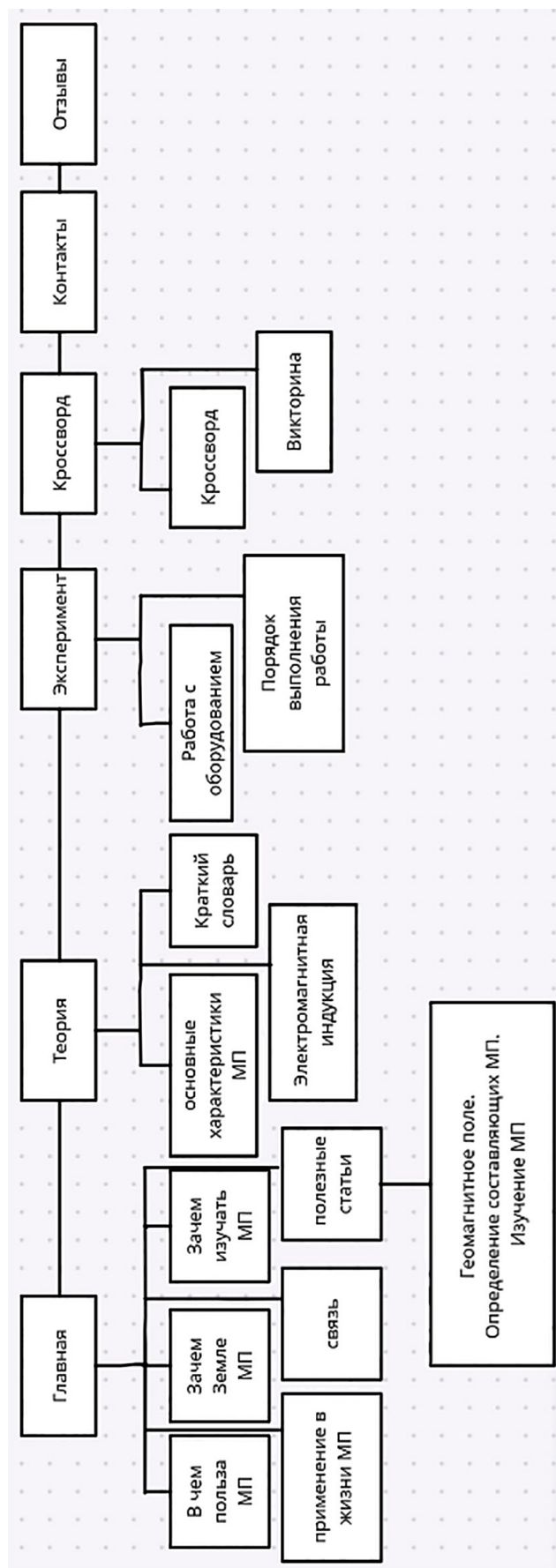


Рис. 1. Схема сайта
Источник: составлено авторами

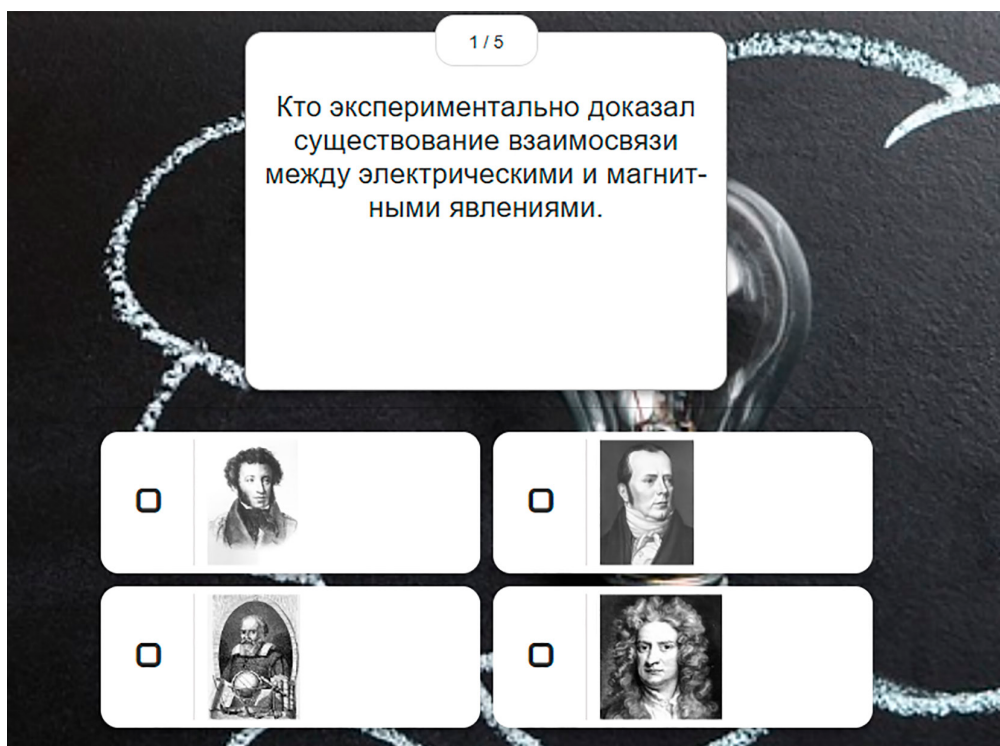


Рис. 2. Вопрос викторины, созданной в сервисе LearningApps
Источник: составлено авторами. URL: <https://learningapps.org/view7858002>



МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

ГЛАВНАЯ ТЕОРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТ САМОПРОВЕРКА КОНТАКТЫ ОТЗЫВЫ И КОММЕНТАРИИ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

**Перед тем, как приступить к исследованию данных
нужно подготовить оборудование.**

Работа с оборудованием "РАДУГА"

Порядок выполнения работы

1. **Включите компьютер и вызовите программу цифровой лаборатории «Радуга» DigLab.**
2. **Подключите датчик угла к USB-входу компьютера. После автоматического определения подключенного датчика, нажмите на кнопку с названием датчика. Установите зонд датчика магнитного поля**

Рис. 3. Страница лабораторной работы на сайте
Источник: составлено авторами. URL: <https://emagfield.nethouse.ru/page/1556546>

Изначально, когда проводился эксперимент и были получены первые значения, возникла необходимость сравнить их с тео-

ретическими, но, к сожалению, кроме всего нескольких городов, не были найдены основные характеристики магнитного поля.

ВАШИ ЭКСПЕРИМ. ЗНАЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МПЗ

Ваше имя

Контактный телефон

E-mail

Ваш город

Регион города, где были взяты показания (если есть)

Горизонтальная составляющая

Вертикальная составляющая

Угол

Показания напряженности магнитного поля

С помощью какого прибора вы находили данные значения?

Отправить

Рис. 4. Опросник основных характеристик магнитного поля в конкретном городе
 Источник: составлено авторами. URL: <https://emagfield.nethouse.ru/page/1556546>

Было принято решение собрать статистическую таблицу основных характеристик магнитного поля Земли в разных районах и городах всех посетителей сайта, кто будет в этом заинтересован. Данная статистика собирается в качестве опросника и заносится в табличную базу данных, которую в дальнейшем можно собирать и представить на сайте в виде таблицы с частичной наполненностью хотя бы по некоторым городам России (рис. 4).

После того как основной контент создан, следует подумать о дизайне сайта и его внешнем виде, ведь красиво оформленный сайт с удобной навигацией и понятной структурой может привлечь больше посетителей и удержать их на сайте. Так, например, был создан логотип сайта (рис. 5).



Рис. 5. Логотип сайта
 Источник: составлено авторами

Для создания привлекательного и современного дизайна сайта был выполнен ряд настроек стиля и способов взаимодействия с пользователями веб-ресурса.

– Выбрана спокойная цветовая палитра, включающая оттенки синего, зеленого и серого. Эти цвета ассоциируются с природой и научной тематикой, что соответствует содержанию сайта.

– Подобраны читабельные шрифты, такие как Open Sans и Roboto.

– Используются иллюстрации, схемы и инфографика, которые демонстрируют информацию о магнитном поле Земли. Эти визуальные элементы помогают лучше усваивать учебный материал.

– Дизайн сайта адаптируется под различные устройства и размеры экранов, обеспечивая удобство использования на компьютерах, планшетах и мобильных телефонах.

– Реализованы формы обратной связи, позволяющие пользователям оставлять отзывы, жалобы и предложения.

Таким образом, при разработке веб-ресурса были учтены требования к структуре, его содержательной части, дизайну. В итоге с использованием средств конструктора Nethouse был создан тематический образовательный сайт «Магнитное поле Земли», который находится по ссылке <https://emagfield.nethouse.ru/>.

Заключение

В ходе выполнения исследования показаны основные этапы разработки обучающего веб-ресурса на примере создания сайта, направленного на методическую поддержку обучения по теме «Магнитное поле Земли» школьного курса физики. В процессе анализа различных конструкторов сайтов с учетом критериев актуальных для текущей разработки была выбрана платформа Nethouse. Продемонстрированы возможности разработки веб-ресурса на выбранной платформе, а также показаны другие инструменты и сервисы, позволяющие соз-

дать дополнительные материалы. Структурирование теоретического контента по теме «Магнитное поле Земли», а также создание элементов для проверки усвоения материала и лабораторной работы помогли перевести сложный материал в доступный формат для обучающихся. Материалы статьи могут служить рекомендациями по разработке подобных образовательных ресурсов по другим темам школьных предметов.

Список литературы

1. Ахметбекова Г.С., Фахруденова И.Б. Цифровые образовательные ресурсы в педагогической деятельности // Вестник академии педагогических наук Казахстана. 2021. № 2 (100). С. 107–112. DOI: 10.51883/20704046_2021_2_107.
2. Бужинская Н.В., Васева Е.С., Шубина Н.В. Организация онлайн-взаимодействия участников учебного процесса в условиях цифровой образовательной среды // Известия Волгоградского государственного педагогического университета. 2019. № 8 (141). С. 44–49. EDN: HXIMEC.
3. Баженова И.И., Бужинская Н.В., Васева Е.С. Разработка и применение цифровых образовательных ресурсов по физике: учебно-методическое пособие. Махачкала: ООО «АЛЕФ», 2021. 92 с. ISBN 978-5-00128-659-2.
4. Новикова В.Р. Разработка цифрового ресурса по модулю «Компьютерная графика. Черчение» для 7–9 классов общеобразовательной школы // Мировая наука. 2023. № 6 (75). С. 105–108. EDN: MUMLLV.
5. Симукова С.В., Прадед А.С. Разработка цифровых образовательных ресурсов при изучении темы «колебания и волны» школьного курса физики // Ученые записки Брянского государственного университета. 2018. № 3 (11). С. 24–33. EDN: VQNLRCR.
6. Эверстова В.Н., Птицына Т.С. Разработка и эффективность применения образовательного веб-сайта при обучении математике в основной школе // Антропологическая дидактика и воспитание. 2023. Т. 6. № 6. С. 36–45. EDN: QDCEAF.
7. Жамалова В.Ж., Абзалов Ф.С., Синельников В.Ю., Бакасов Т.А. Анализ конструкторов по созданию сайта // Наука и инновационные технологии. 2021. № 2 (19). С. 11–15. DOI: 10.33942/sit1803. EDN: BGLMIA.
8. Козлов С.В., Киселева А.К., Быков А.А. Сравнительный анализ способов создания веб-сайтов: ручная верстка и конструкторы сайта // Естественные и технические науки. 2024. № 7 (194). С. 126–129. EDN: CHZOYM.

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОДУЛЯ ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЙ ОПЕРАТОРА СТАНКА С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Чкалова М.В., Петерс А.Е.

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет»,
Оренбург, e-mail: andrei_03peters@mail.ru

Цель исследования – разработка программного обеспечения для надежной и безопасной работы станка по обработке ПВХ-профилей. Статья посвящена анализу и модернизации системы управления станком Turbocut 400 для обработки поливинилхлорид-профилей с целью минимизации рисков, сбоев и повышения эффективности работы оборудования. Авторами рассматривается автоматизированная система управления станком, выявляются основные виды сбоев, проводится их классификация и предлагаются методы их устранения. Ключевым элементом модернизации стало добавление оптических датчиков по всей длине конвейера, формирование каналов обратной связи с панелью управления и разработка интеллектуального модуля управления станком. Основное внимание уделено созданию специального программного обеспечения, предназначенного для поддержки принятия решений оператором. Программный код написан на языке Python в среде Visual Studio и включает графический интерфейс для ввода данных и визуализации параметров. Его внедрение в интеллектуальный модуль управления станком позволило эффективно адаптировать изменения в системе управления за счет проведенной модернизации. Результаты исследования подтвердили, что предложенная авторами модернизация системы управления и включение специального программного обеспечения в интеллектуальный модуль управления станком способствуют значительному снижению количества сбоев и повышают устойчивость, безопасность и эффективность работы станка. Предложенные решения оптимизируют затраты и улучшают качество обработки ПВХ-профилей.

Ключевые слова: производство ПВХ-профилей, система управления станком, интеллектуальный модуль, принятие решений оператором

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT DECISION SUPPORT MODULE FOR COMPUTER NUMERICAL CONTROL MACHINE OPERATOR

Chkalova M.V., Peters A.E.

Orenburg State Agrarian University, Orenburg, e-mail: andrei_03peters@mail.ru

The aim of the research is to develop software for reliable and safe operation of a machine for processing PVC profiles. The article is devoted to the analysis and modernization of the control system of the «Turbocut 400» machine for processing PVC profiles in order to minimize risks, failures and improve the efficiency of the equipment. The authors consider the automated control system of the machine, identify the main types of failures, classify them and propose methods for their elimination. The key element of the modernization was the addition of optical sensors along the entire length of the conveyor, the formation of feedback channels with the control panel and the development of an intelligent machine control module. The main attention is paid to the creation of special software designed to support the operator's decision-making. The program code is written in Python in the Visual Studio environment and includes a graphical interface for data entry and parameter visualization. Its implementation in the intelligent machine control module made it possible to effectively adapt changes in the control system due to the modernization. The results of the study confirmed that the modernization of the control system proposed by the authors and the inclusion of special software in the intelligent machine control module contribute to a significant reduction in the number of failures and increase the stability, safety and efficiency of the machine. The proposed solutions optimize costs and improve the quality of PVC profile processing.

Keywords: PVC profile production, machine control system, intelligent module, operator decision making

Введение

Успешное функционирование современного производства невозможно без анализа рисков, погрешностей и сбоев оборудования и управления. Минимизация рисков и сбоев способствует повышению эффективности и производительности. Особенно это актуально для автоматизированных систем управления, которые обеспечивают высокую точность и стабильность работы станков.

В станке Turbocut 400 для обработки ПВХ-профилей уже реализовано готовое программное обеспечение, которое контролирует его работу и автоматизирует множество процессов. Однако, чтобы повысить устойчивость системы управления станком, необходимо дополнить эту программную среду специальным программным обеспечением, которое будет поддерживать оператора в принятии рациональных решений [1, 2].

Цель исследования – разработка специального программного обеспечения (СПО), которое станет дополнительным инструментом, поддерживающим устойчивость и безопасность работы станка по обработке ПВХ-профилей.

Материалы и методы исследования

Проведенное исследование включало следующие этапы:

- анализ системы автоматизированного управления станком Turbocut 400 для выявления возможных видов сбоев;
- модернизацию системы управления станком для минимизации количества сбоев;
- разработку специального программного обеспечения для поддержки принятия решений оператором станка Turbocut 400 [2].

Под эффективностью технической системы (ТС) станка Turbocut 400 будем понимать наилучшее качество обработки ПВХ-профилей при минимуме затрат на это улучшение [1, 2] (рис. 1).

После анализа структурной схемы и оценки перспектив повышения эффективности станка в качестве параметра оптимизации было принято количество сбоев в работе станка за определенный промежуток времени (рабочая смена). Описание и классификация видов сбоев, причины сбоев и их последствия, оценка влияния системы управления станком на каждый из видов сбоев коэффициентом в пределах от 0 до 1 (усиление влияния приближает коэффициент к 1, ослабление влияния – к 0) представлены в таблице. Коэффициенты влияния определены методом экспертных оценок, для реализации которого были приглашены специалисты производства ПВХ-профилей. Участие в опросе приняли сотрудники двух предприятий, которые специализируются на производстве ПВХ-профилей: ТОО Euro Plast Company, г. Актобе (республика Казахстан), и ООО «РВК Пластик», г. Оренбург (Российская Федерация) [1–3].

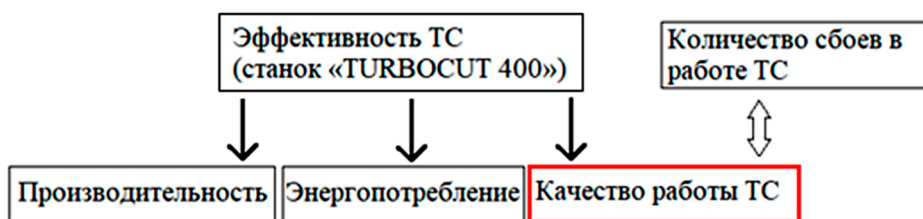


Рис. 1. Структурная схема эффективности ТС станка Turbocut 400

Анализ качества функционирования ТС станка Turbocut 400

Вид сбоев	Причина сбоев	Следствие сбоев	Оценка влияния СУ
Сбои в системе управления	– проблемы с электроникой или механическими компонентами; – ошибки в алгоритмах управления	– сбои в работе станка	0,9
Проблемы с приводами	– износ и повреждение элементов оборудования	– изменение значений динамических и физических параметров; – ухудшение качества обработки профилей	0,5
Проблемы с коммуникацией и сетью	– повреждения приводов или активного сетевого оборудования; – электромагнитные помехи от другого оборудования или внешних источников; – ошибки в программном обеспечении сетевого оборудования	– нарушение каналов связи; – изменение значений динамических и физических параметров; – остановка станка	0,2
Механические поломки и износ элементов оборудования	– использование заготовок ненормативных размеров; – износ механических элементов оборудования	– конфликт механических элементов станка; – остановка станка	0,95
Сбои из-за несоответствия производственным параметрам	– несоответствие входных данных параметрам процесса	– сбои в режиме управления работой станка	0,9

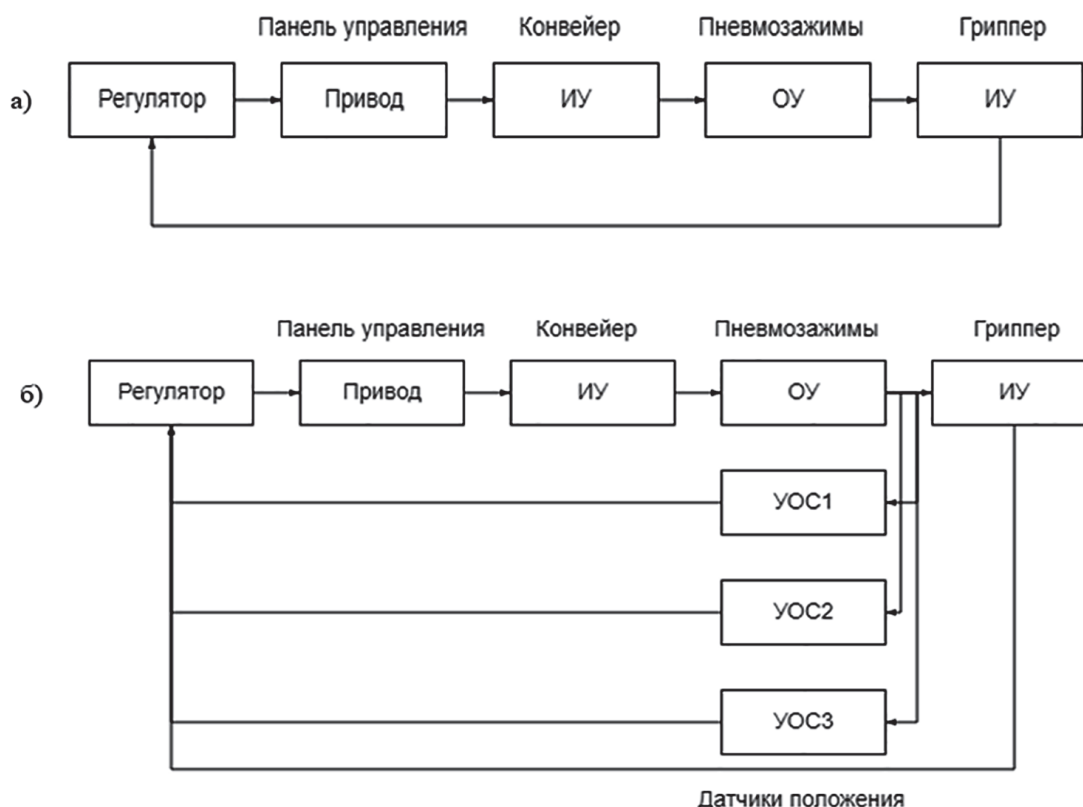


Рис. 2. Функциональная схема автоматизированной системы управления станком Turbocut 400:
 а) до; б) после модернизации: ИУ – исполнительное устройство;
 ОУ – объект управления; УОС – устройство обратной связи

В состав участников вошли операторы станка (4 чел., РК), инженер-технолог (РК), ведущий инженер и инженер по технике безопасности (РФ), мастер производственного участка (РФ). Каждому участнику предлагалось оценить влияние системы автоматизированного управления станком на возможность уменьшения последствий сбоев в работе оборудования. В таблице оценки влияния даны средними значениями оценок специалистов, что позволило выявить ряд сбоев в работе станка (механические поломки и износ; сбои в системе управления; сбои из-за несоответствия производственных параметров), которые можно было бы предотвратить при наличии у оператора информации о протекании производственного процесса на участке конвейера [2–4].

Для повышения эксплуатационной эффективности технической системы станка Turbocut 400 за счет улучшения точности и стабильности ее работы предложена целевая модернизация подсистемы управления. Проект включает три взаимосвязанных этапа.

– Установка оптических датчиков вдоль всей рабочей зоны конвейера. Линейное рас-

положение датчиков обеспечивает непрерывный контроль координат ПВХ-профиля, что снижает риск погрешности позиционирования заготовки и тем самым уменьшает технологические неполадки.

– Формирование каналов обратной связи от датчиков к панели оператора. Интеграция высокоскоростных линий передачи данных позволяет в реальном времени поступать измерительной информации в контроллер ЧПУ, обеспечивая оперативную работу инструмента без остановки процесса, а также комфортную работу для пользователя.

– Разработка интеллектуального модуля поддержки принятия решений оператором, включающего специализированное программное обеспечение [4, 5].

Комплексная реализация перечисленных этапов позволяет повысить надежность функционирования станка, сократить время переналадки и обеспечить устойчивое качество обработки ПВХ-профилей в серийном режиме производства. Функциональные схемы системы управления станком до и после модернизации представлены на рис. 2.

Результаты исследования и их обсуждение

Разработка интеллектуального модуля поддержки принятия решений оператором станка для обработки ПВХ-профилей проходила в программной среде Visual Studio. Код интеллектуального модуля был написан вручную на языке программирования Python с использованием популярной библиотеки tkinter, фрагмент кода программы представлен на рис. 3. Основная задача программы – обеспечить пользователю удобный ввод и визуализацию длины ПВХ-профиля. Программа проводит обработку ошибок, что позволяет избежать ввода недопустимых данных [5, 6].

Интерфейс программного модуля состоит из трех ключевых элементов:

- Однострочное текстовое поле предназначено для ввода исходных параметров. Данная область поддерживает базовую валидацию формата данных, что снижает вероятность совершения ошибок ввода пользователем в начальной стадии.

- Кнопка подтверждения инициирует передачу введенных данных в обработчик. До выполнения всех требований проверки область остается неактивной, тем самым предотвращая запуск вычислительного процесса с неверно введенными данными.

- Область вывода формирует итоговое представление результатов обработки. В зависимости от целей и задач пользователя в ней отображаются табличные данные и графические визуализации, обеспечивая заверченный цикл взаимодействия с программным модулем.

После активации кнопки введенное пользователем значение автоматически проходит процедуру верификации – проверяется принадлежность числового или символьного выражения заранее установленному допустимому диапазону. При положительном исходе контрольной процедуры управление передается подсистеме визуализации, которая формирует графическое представление данных в выбранном формате.

```

1 C:\Users\User\Desktop\hgh\venv
2 from tkinter import messagebox
3
4 def calculate_profile_length():
5     try:
6         length = float(entry.get())
7
8         # Устанавливаем минимальную и максимальную длины
9         min_length = 1
10        max_length = 300
11
12        # Ограничиваем длину введенного значения
13        if length < min_length:
14            length = min_length
15        elif length > max_length:
16            length = max_length
17        # Проверка на минимальное значение 40 мм
18        if length < 40:
19            messagebox.showerror("Ошибка", "Длина ПВХ-профиля должна быть не менее 40 см")
20            return
21
22        # Определяем начальные и конечные координаты прямоугольника
23        offset = 50 # Добавляем отступ вправо
24        start_x = 160
25        end_x = start_x + 410
26
27        # Максимальная длина прямоугольника на холсте
28        max_length_canvas = end_x - start_x
29
30        # Масштабируем введенную длину к длине на холсте
31        scale_factor = max_length_canvas / max_length
32        adjusted_length = length * scale_factor
33
34        # Логика зажигания лампочек в зависимости от длины
35        if length >= 200:

```

Рис. 3. Фрагмент кода программы

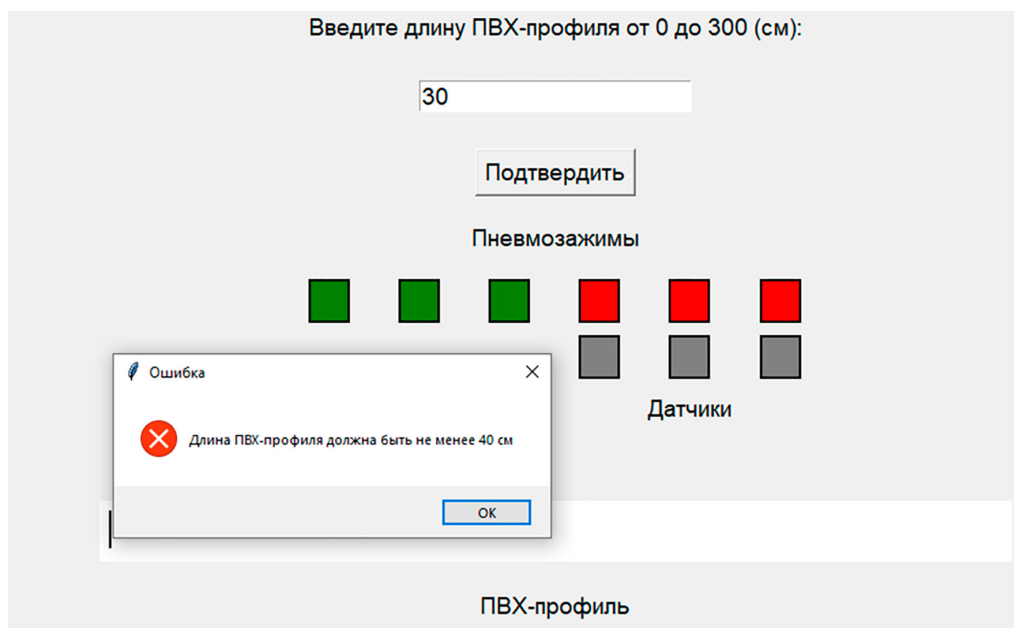


Рис. 4. Пример некорректного ввода данных



Рис. 5. Визуализация процесса управления в случае ввода верных данных

В случае выявления отклонения от допустимых границ система инициирует механизм обработки ошибок: на экран выводится лаконичное информационное сообщение, детализирующее причину отказа, а далее пользователю предлагается повторить ввод. Логика управления диалоговыми элементами ориентирована на максимальное снижение вероятности операционных ошибок. Так, текстовое поле

оснащено функцией динамической проверки поступающих от устройства ввода символов, а кнопка подтверждения остается неактивной до тех пор, пока введенная последовательность не удовлетворит всем критериям корректности. Данный подход гарантирует надёжность взаимодействия и повышает общую устойчивость программного комплекса к ошибочным действиям пользователя.

Пример работы программы при попытке ввода недопустимого значения показан на рис. 4. Визуализация процесса управления в случае корректного ввода данных (показан момент срабатывания одного оптического датчика и приведение в действие одного пневмозажима) – на рис. 5.

Модульная структура программного кода и использование стандартной библиотеки tkinter позволяют легко адаптировать его под различные задачи, что делает программное обеспечение полезным инструментом для разработчиков в других областях [6, 7].

Заключение

Анализ технической системы станка Turbocut 400 позволил провести модернизацию системы автоматизированного управления, которая минимизировала количество сбоев и повысила эффективность работы станка. Модернизация системы управления станком сопровождалась авторской разработкой специального программного обеспечения для поддержки принятия решений оператором станка, направленного на минимизацию количества сбоев, связанных с конфликтом механических элементов.

Список литературы

1. Панарин В.М., Хромушин В.А., Маслова А.А., Кашинцева Л.В., Гришаюк К.В., Паньшина М.В. Разработка интеллектуальной системы персонального мониторинга здоровья работников // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 10. С. 28–34. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-10-28-34.
2. Тингаев А.М., Салиенко Н.В., Кожевина О.В. Влияние инструментов устойчивого развития на повышение эффективности управления компанией (на примере АО «ФосАгро») // Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: новые источники роста: материалы III Всероссийской научно-практической конференции. М.: Первое экономическое издательство, 2020. С. 313–318. DOI: 10.18334/9785912923258.313-318.
3. Рябова С.В., Сергеев В.А., Фролов И.В. Структура автоматизированной системы управления технологическим процессом с использованием информации о параметрах качества продукции // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2024. Т. 2. С. 56–59.
4. Бочкарев А.М. Математические модели для расчета и анализа показателей эффективности использования ресурсов автоматизированных систем управления // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2023. Т. 11. № 2 (41). С. 16–17. DOI: 10.26102/2310-6018/2023.41.2.018.
5. Чкалова М.В., Насонов Т.Е. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024612690 Российская Федерация. Программа расчета оптимальных показателей АСУ ТП: № 2024611885: заявл. 05.02.2024: опубл. 05.02.2024. заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный аграрный университет».
6. Павлидис В.Д., Чкалова М.В., Осипова А.М. Разработка интеллектуальной системы мониторинга рабочих параметров электрической сети // Агропромышленный комплекс в условиях инновационного развития: наука, технологии, кадровое обеспечение: материалы I Международной научно-практической конференции (Минск, 06–07 июня 2024 г.). Минск: БГАТУ, 2024. С. 1–6. [Электронный ресурс]. URL: <https://rep.bsatu.by/handle/doc/21516> (дата обращения: 04.04.2025).
7. Болдырев В.В., Горькавый М.А. Разработка интеллектуального модуля управления автоматизированной автономной системой энергообеспечения // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2020. № 3 (43). С. 9–18. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43947923> (дата обращения: 05.04.2025).

СТАТЬЯ

УДК 004.934

**ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАСПОЗНАВАНИЯ РУССКОЙ РЕЧИ
НА ЧИСТЫХ И ЗАШУМЛЕННЫХ АУДИОДАНЫХ****Тукаев В.Р., Беляева М.Б.***ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Стерлитамакский филиал,
Стерлитамак, e-mail: vildantukaev@yandex.ru*

Проблема автоматического распознавания русской речи в условиях шума остается актуальной задачей для многих прикладных систем, требующих точной обработки аудиоданных в реальных условиях. Целью исследования стала оценка и сравнительный анализ качества распознавания русской речи четырьмя современными моделями: Whisper-large-v3, Vosk-model-ru-0.42 и двумя вариантами модели GigaAM второй версии с различными функциями потерь: на основе временной классификации с соединениями и на основе рекуррентной нейронной сети преобразователя. Исследование проводилось на чистых и искусственно зашумленных аудиоданных, подготовленных на основе открытого набора данных с добавлением шумов из датасета аудиозаписей окружающей среды при определенном соотношении сигнал/шум. Качество распознавания оценивалось с использованием метрик: коэффициентов ошибок на уровне слов и символов, метрики ошибок сопоставления и метрики потери информации на уровне слов. Экспериментальная часть включала обработку выборки из 1000 аудиозаписей различной длительности, содержащих как спонтанную речь, так и подготовленные тексты. Результаты исследования показали, что модели GigaAM обеспечили наилучшее качество распознавания речи как в чистых, так и в зашумленных условиях. Особенно выделилась модель GigaAM с функцией потерь на основе рекуррентной нейронной сети преобразователя, которая продемонстрировала оптимальное сочетание точности и устойчивости к шуму. Полученные результаты имеют практическую ценность для выбора оптимальной модели распознавания речи в различных прикладных задачах, связанных с обработкой русской речи в реальных условиях.

Ключевые слова: автоматическое распознавание речи, точность распознавания речи, показатели оценивания, акустический шум, русская речь, сравнительный анализ

**EVALUATION OF RUSSIAN SPEECH RECOGNITION
QUALITY ON CLEAN AND NOISY AUDIO DATA****Tukaev V.R., Belyaeva M.B.***¹Sterlitamak branch of the Ufa University of Science and Technology,
Sterlitamak, e-mail: vildantukaev@yandex.ru*

The problem of automatic recognition of Russian speech in noisy environments remains a pressing issue for many applied systems that require accurate audio data processing in real-world conditions. The aim of the study was to evaluate and compare the quality of Russian speech recognition by four modern models: Whisper-large-v3, Vosk-model-ru-0.42, and two variants of the second version of the GigaAM model with different loss functions: based on temporal classification with connections and based on a recurrent neural network converter. The study was conducted on clean and artificially noisy audio data prepared on the basis of an open dataset with the addition of noise from a dataset of environmental audio recordings at a specific signal-to-noise ratio. Recognition quality was evaluated using metrics: word and character error rates, matching error metrics, and word-level information loss metrics. The experimental part included processing a sample of 1,000 audio recordings of varying lengths, containing both spontaneous speech and prepared texts. The results of the study showed that GigaAM models provided the best speech recognition quality in both clean and noisy conditions. The GigaAM model with a loss function based on a recurrent neural network converter stood out in particular, demonstrating an optimal combination of accuracy and noise resistance. The results obtained are of practical value for selecting the optimal speech recognition model in various application tasks related to the processing of Russian speech in real-world conditions.

Keywords: automatic speech recognition, speech recognition accuracy, evaluation indicators, acoustic noise, Russian speech, comparative analysis

Введение

Автоматическое распознавание речи (ASR) стало неотъемлемой частью современных технологий, от голосовых помощников и систем диктовки до автоматической расшифровки звукозаписей и обработки телефонных разговоров в службах поддержки [1, с. 5]. Точность и надежность моделей распознавания речи напрямую влияют на пользовательский опыт и определяют возможности их практического приме-

нения. Особую актуальность приобретает задача разработки и оценки таких моделей для различных языков.

Одной из ключевых проблем при использовании систем распознавания речи в реальных условиях является наличие фонового шума. Шумы различного происхождения (окружающая среда, технические помехи, речь других людей) могут значительно снижать точность преобразования речи из аудио в текст.

Целью данной работы является оценка и сравнительный анализ качества распознавания русской речи четырьмя современными ASR-моделями (Whisper-large-v3, Vosk-model-ru-0.42, GigaAM-CTC-v2, GigaAM-RNNT-v2) на чистых и зашумлённых аудиоданных.

Материалы и методы исследования

Исследование включает в себя подготовку тестового русскоязычного набора данных, выбор и описание современных ASR-моделей, а также определение метрик для оценки качества распознавания речи. Проведены эксперименты по преобразованию речи в текст на подготовленных данных с использованием выбранных моделей. Полученные результаты проанализированы для оценки и сравнения качества распознавания и устойчивости моделей к шуму. На основе результатов сформулированы выводы о применимости исследуемых моделей для распознавания русской речи в различных акустических условиях.

В качестве основного источника данных использовался открытый русскоязычный набор данных Silero Open STT (Shlman/silero_open_stt) [2]. Для проведения экспериментов было отобрано подмножество `bury_audio_books_2`, из которого был сформирован срез из 1000 аудиофайлов. Длительность выбранных аудиофайлов варьировалась от 0.34 до 17.97 секунд, со средней длительностью 2.24 секунды.

Для имитации реальных условий применения ASR-модели была создана зашумлённая версия тестового набора данных. Процесс добавления шума включал несколько последовательных этапов обработки аудиоматериала.

Первоначально каждая чистая аудиозапись из выборки приводилась к единому формату с частотой дискретизации 16 кГц и преобразовывалась в монофонический сигнал для стандартизации входных данных. В качестве источников акустических помех использовались аудиозаписи из набора данных ESC-50 [3], содержащего 2000 коротких записей различных звуков окружающей среды, распределённых по 50 классам (по 40 примеров в каждом).

Для каждой чистой записи алгоритмически выбирался случайный фрагмент шума из ESC-50, который затем добавлялся к исходному сигналу с фиксированным отношением сигнал/шум (SNR) на уровне 5 дБ. Данный уровень SNR был выбран как репрезентативный для условий умеренного акустического зашумления.

На заключительном этапе обработки производилась нормализация амплитуды

полученного зашумлённого сигнала для предотвращения искажений. В результате для каждой из 1000 исходных аудиозаписей были подготовлены две версии: оригинальная (чистая) и с добавленным шумом.

В исследовании сравнивались четыре модели ASR.

Whisper-large-v3 – многоязычная модель от OpenAI, основанная на архитектуре Transformer [4]. Данная модель обучена на обширном наборе разнообразных аудиоданных (680 тыс. часов), включая значительную долю неанглийской речи. Версия `large-v3` является наиболее производительной в семействе Whisper.

Vosk-model-ru-0.42 – распространённая ASR-модель с открытым исходным кодом, основанная на технологиях Kaldi [5]. Модель адаптирована для русского языка и оптимизирована для функционирования на различных вычислительных платформах.

GigaAM-CTC-v2 – модель из семейства Giga Acoustic Model (GigaAM), разработана для русского языка. Построена на архитектуре Conformer и предобучена с использованием методов самоконтролируемого обучения (в частности, HuBERT) на корпусе, превышающем 50 000 часов русской речи. Данная версия дообучена с применением функции потерь Connectionist Temporal Classification (CTC) [6].

GigaAM-RNNT-v2 – вторая модель из семейства GigaAM, также основана на архитектуре Conformer и предобучена с использованием алгоритма HuBERT [7]. Ключевое отличие состоит в применении функции потерь RNN Transducer (RNNT) [8] для дообучения.

Модели GigaAM позиционируются как решения с повышенной устойчивостью к акустическим помехам [9].

Для количественной оценки качества распознавания речи использовались четыре стандартные метрики [10]:

WER (Word Error Rate) – коэффициент ошибок на уровне слов. Наиболее распространённая метрика, измеряющая процент неправильно распознанных слов.

$$WER = \frac{(S + D + I)}{T} \times 100\%,$$

где S – число замен, D – число удалений, I – число вставок, T – число слов в эталонной транскрипции.

CER (Character Error Rate) – коэффициент ошибок на уровне символов. Аналогичен WER, но вычисляется на уровне символов. Метрика полезна для языков с богатой морфологией и для оценки точности

распознавания имен собственных или редких слов.

$$CER = \frac{(S_{char} + D_{char} + I_{char})}{T_{char}} \times 100\%,$$

где T_{char} – число символов эталонной транскрипции.

MER (Match Error Rate) – метрика, учитывающая не только ошибки (замены, удаления, вставки), но и правильно распознанные слова (совпадения). Рассчитывается как отношение суммы ошибок к сумме совпадений и замен. Иногда интерпретируется как доля «неправильной» информации в распознанном тексте относительно «правильной».

$$MER = \frac{(S + D + I)}{(H + S + D + I)} \times 100\%,$$

где H – число совпадений.

WIL (Word Information Lost) – метрика, которая измеряет потерю информации при распознавании речи. В отличие от WER, которая просто подсчитывает процент ошибок, WIL пытается оценить, насколько важная информация была потеряна или искажена.

$$WIL = \left(1 - \frac{H^2}{(T * T_0)} \right) \times 100\%,$$

где T – число слов в эталонной транскрипции, T_0 – число слов в гипотезе распознавания (в результате работы ASR-модели).

Для всех метрик (WER, CER, MER, WIL) меньшее значение указывает на лучшее качество преобразования речи из аудио в текст.

Все эксперименты проводились в облачной среде Google Colaboratory. Измерение времени выполнения распознавания для сравниваемых систем не проводилось из-за существенных различий в возможностях аппаратного ускорения. Мо-

дели Whisper и GigaAM поддерживают GPU-ускорение через CUDA, тогда как Vosk-model-ru-0.42 такой поддержкой не обладает и выполнялась исключительно на центральном процессоре (CPU). Прямое сопоставление временных показателей моделей привело бы к некорректным выводам. Основной акцент исследования был сделан на анализе точности распознавания речи.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе исследования были получены значения метрик WER, CER, MER и WIL для каждой из четырёх моделей на чистом (Ч) и зашумлённом (Ш) наборах данных. Результаты сведены в таблицу и представлены на рисунках 1-4.

Модель Whisper-large-v3 показала наилучшие результаты по метрике WER: 65.3% на чистых данных и 67.4% на зашумлённых (разница 2.1%).

У модели Vosk-model-ru-0.42 наблюдалось значительное снижение качества: WER вырос с 16.4% до 28.2%, что составляет разницу в 11.8%.

Модель GigaAM-CTC-v2 продемонстрировала WER 16.6% на чистых и 22.7% на зашумлённых данных (разница 6.0%).

Наилучшие показатели были у GigaAM-RNNT-v2: 15.5% на чистых и 21.8% на зашумлённых данных (разница 6.3%).

Таким образом, GigaAM-RNNT-v2 является лидером по метрике WER в обоих условиях (рис. 1).

Результаты по метрике CER согласуются с предыдущими наблюдениями.

Whisper-large-v3 снова показала самые высокие значения ошибки: 23.3% на чистых и 24.9% на зашумлённых данных (разница 1.6%).

У модели Vosk-model-ru-0.42 CER увеличился с 4.6% до 12.9%, показав существенное падение качества (разница 8.3%).

Результаты оценки качества распознавания речи моделей ASR (значения в %)

Модель	Данные	WER	CER	MER	WIL
Whisper-large-v3	Ч	65.3	23.3	58.6	74.0
	Ш	67.4	24.9	62.7	77.1
Vosk-model-ru-0.42	Ч	16.4	4.6	15.3	20.8
	Ш	28.2	12.9	27.1	34.6
GigaAM-CTC-v2	Ч	16.6	4.4	15.6	21.1
	Ш	22.7	8.4	21.8	28.0
GigaAM-RNNT-v2	Ч	15.5	4.5	14.5	19.5
	Ш	21.8	8.6	20.7	26.4

Примечание: таблица составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

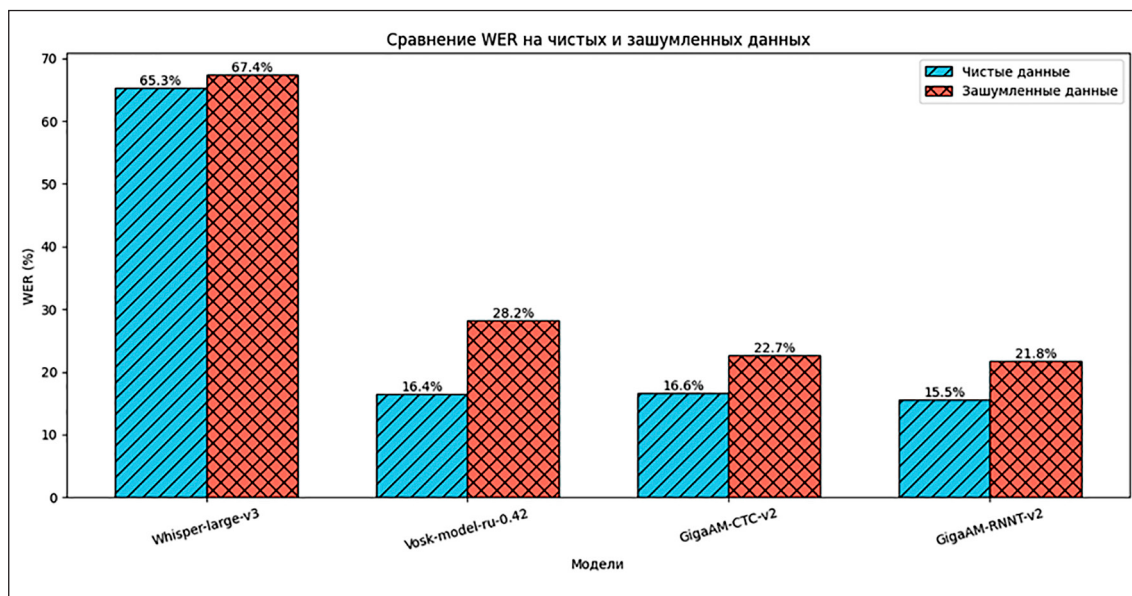


Рис. 1. Сравнение WER на чистых и зашумленных данных
Источник: составлен авторами по результатам данного исследования

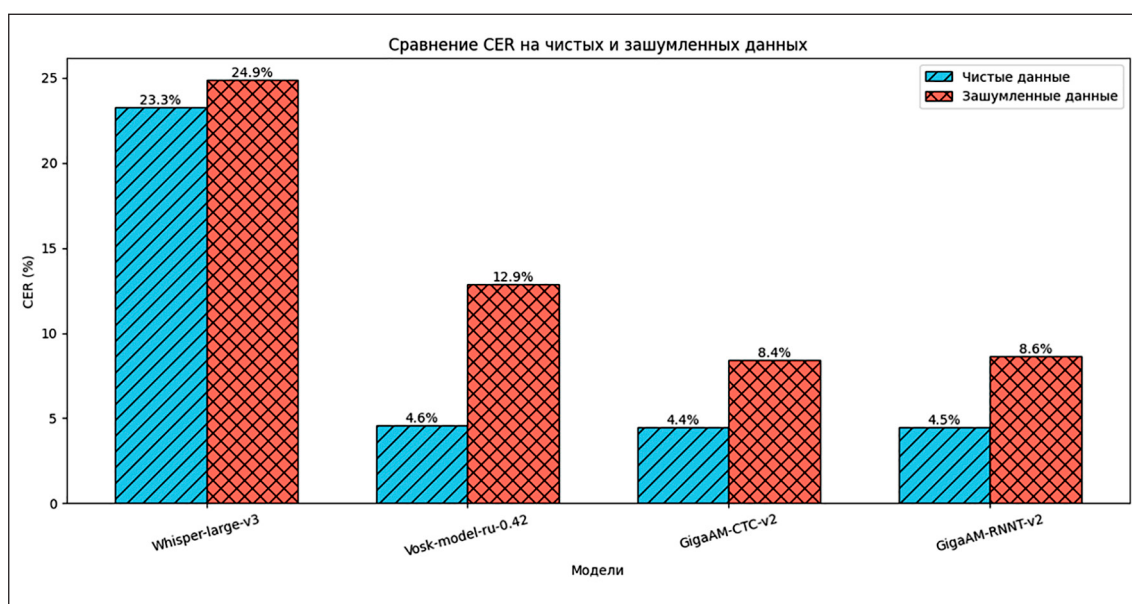


Рис. 2. Сравнение CER на чистых и зашумленных данных
Источник: составлен авторами по результатам данного исследования

Модель GigaAM-CTC-v2 продемонстрировала наилучшие результаты по этой метрике: 4.4% на чистых и 8.4% на зашумлённых данных (разница 4.0%).

GigaAM-RNNT-v2 показала близкие значения: 4.5% и 8.6% соответственно (разница 4.1%).

По метрике CER лидирует GigaAM-CTC-v2, но разница с GigaAM-RNNT-v2 незначительна (рис. 2).

Метрика MER подтверждает общую картину качества распознавания моделей (рис. 3).

Whisper-large-v3 снова показала наивысший уровень ошибок: 58.6% на чистых и 62.7% на зашумлённых данных (разница 4.1%).

Модель Vosk-model-ru-0.42 также продемонстрировала значительное ухудшение: MER вырос с 15.3% до 27.1% (разница 11.8%).

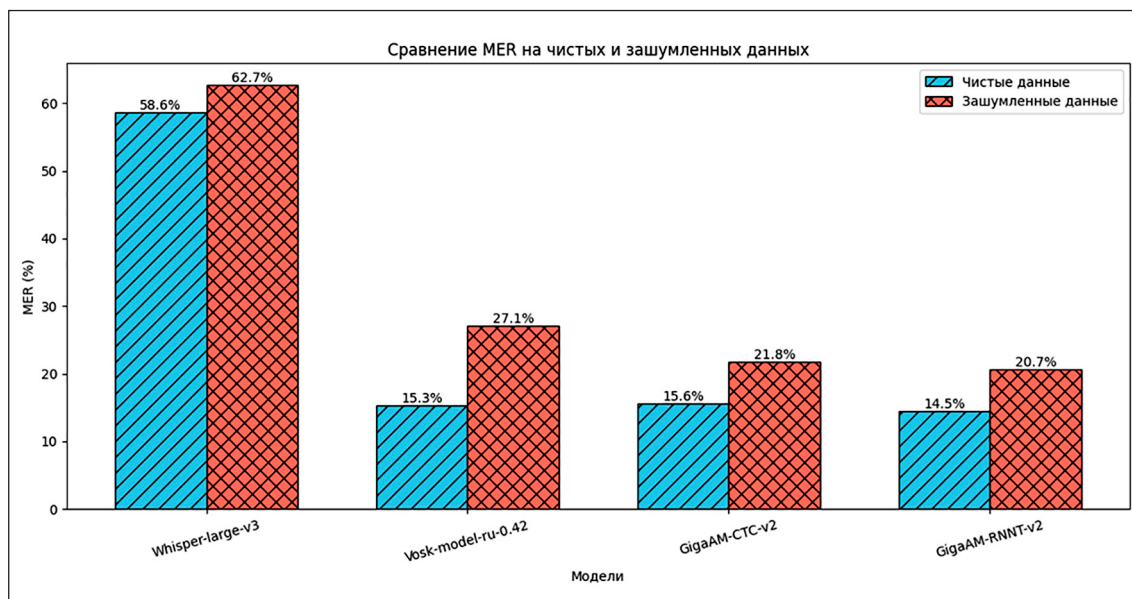


Рис. 3. Сравнение MER на чистых и зашумленных данных
Источник: составлен авторами по результатам данного исследования

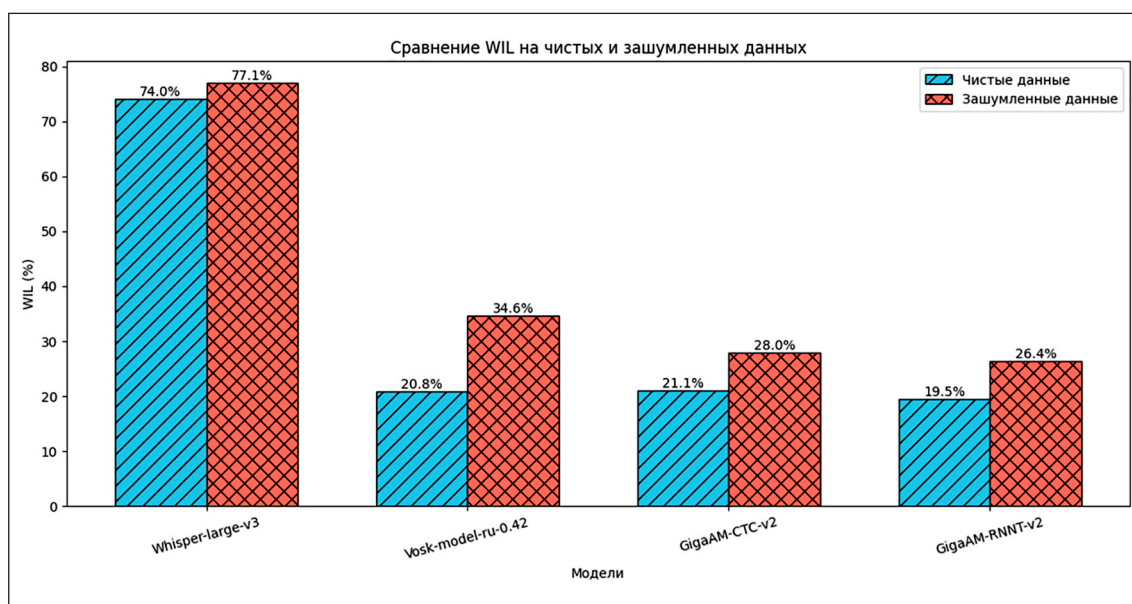


Рис. 4. Сравнение WIL на чистых и зашумленных данных
Источник: составлен авторами по результатам данного исследования

Модели GigaAM показали лучшие и более стабильные результаты. GigaAM-CTC-v2: 15.6% на чистых и 21.8% на зашумлённых (разница 6.2%). GigaAM-RNNT-v2 снова оказалась лучшей: 14.5% на чистых и 20.7% на зашумлённых данных (разница 6.3%).

При оценке по метрике WIL выявлено преимущество моделей GigaAM (рис. 4).

Whisper-large-v3 показала высокие значения WIL: 74.0% на чистых и 77.1% на зашумлённых данных (разница 3.1%).

Vosk-model-ru-0.42 снова продемонстрировала наибольшую чувствительность к шуму: WIL вырос с 20.8% до 34.6% (разница 13.8%).

Модели GigaAM показали схожую устойчивость к шуму. GigaAM-CTC-v2: 21.1% на чистых и 28.0% на зашумлённых (разница 6.9%). GigaAM-RNNT-v2 вновь показала лучшие значения: 19.5% на чистых и 26.4% на зашумлённых данных (разница 6.9%).

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы относительно качества распознавания современных моделей автоматического распознавания русской речи в различных акустических условиях.

Модели семейства GigaAM (GigaAM-CTC-v2 и GigaAM-RNNT-v2) продемонстрировали наиболее высокое качество распознавания как на чистых, так и на зашумлённых данных по всем рассматриваемым метрикам. При этом GigaAM-RNNT-v2 показала небольшое, но стабильное преимущество над версией с CTC-потерями по ключевым метрикам WER, MER и WIL. Высокая эффективность этих моделей, вероятно, объясняется комбинацией архитектуры Conformer, большого объема специфичных для русского языка данных для предобучения (более 50 тыс. часов русской речи) и использованием методов самоконтролируемого обучения.

Модель Vosk-model-ru-0.42 продемонстрировала приемлемое качество на чистых данных, сопоставимое с моделями GigaAM по метрикам WER и MER, и даже превосходящее их по CER. Однако её качество существенно ухудшилось при добавлении шума. Разница в показателях WER, MER и WIL между чистыми и зашумлёнными данными для Vosk оказалась почти в два раза выше, чем для моделей GigaAM, что свидетельствует о меньшей устойчивости данной модели к акустическим помехам.

Модель Whisper-large-v3, несмотря на значительный размер и многоязычность, показала значительно более низкие результаты по всем метрикам на исследуемом русскоязычном наборе данных по сравнению с моделями, специально обученными или дообученными на обширном корпусе русской речи (Vosk, GigaAM). Возможными причинами такого результата могут быть недостаточная адаптация к особенностям русской речи, специфика обучающей выборки, либо особенности алгоритма декодирования. При этом данная модель показала относительно низкую чувствительность к шуму (разница в WER всего 2.1%).

Таким образом, результаты оценки и сравнительного анализа четырех совре-

менных ASR-моделей для русского языка (Whisper-large-v3, Vosk-model-ru-0.42, GigaAM-CTC-v2, GigaAM-RNNT-v2) на чистых и зашумлённых аудиоданных позволяют заключить, что модель GigaAM-RNNT-v2 демонстрирует оптимальное сочетание высокой точности распознавания и устойчивости к акустическим помехам. Полученные результаты имеют практическую ценность для выбора ASR-решений в различных прикладных задачах, связанных с обработкой русской речи в реальных условиях.

Список литературы

1. Тампель ИБ., Карпов А.А. Автоматическое распознавание речи: учебное пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 138 с. URL: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/2232.pdf> (дата обращения: 26.05.2025).
2. Sh1man. Silero Open STT // Hugging Face. 2025. URL: https://huggingface.co/datasets/Sh1man/silero_open_stt (дата обращения: 26.05.2025).
3. Piczak, K.J. ESC-50: Dataset for Environmental Sound Classification // GitHub. URL: <https://github.com/karolpiczak/ESC-50> (дата обращения: 26.05.2025).
4. Radford A., Kim J.W., Xu T., Brockman G., McLeavey C., Sutskever I. Robust Speech Recognition via Large-Scale Weak Supervision // Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning. 2023. Vol. 202. P. 28492–28518. URL: <https://proceedings.mlr.press/v202/radford23a.html> (дата обращения: 26.05.2025).
5. Alpha Cephei. Vosk Speech Recognition Toolkit // Официальный сайт Vosk. URL: <https://alphacephei.com/vosk/> (дата обращения: 26.05.2025).
6. Graves A., Fernández S., Gomez F., Schmidhuber J. Connectionist temporal classification: Labelling unsegmented sequence data with recurrent neural networks // Machine Learning, Proceedings of the Twenty-Third International Conference (ICML 2006), Pittsburgh, Pennsylvania, USA. 2006. P. 369–376. DOI: 10.1145/1143844.1143891.
7. Hsu W.-N., Bolte B., Tsai Y.-H.H., Lakhota K., Salakhutdinov R., Mohamed A. HuBERT: Self-Supervised Speech Representation Learning by Masked Prediction of Hidden Units // IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. 2021. Vol. 29. P. 3451–3460. DOI: 10.1109/TASLP.2021.3122291.
8. Graves A. Sequence Transduction with Recurrent Neural Networks // Proceedings of the ICML 2012 Workshop on Representation Learning. 2012. DOI: 10.48550/arXiv.1211.3711.
9. GigaAM: the family of open-source acoustic models for speech processing // GitHub. URL: <https://github.com/salute-developers/GigaAM> (дата обращения: 26.05.2025).
10. Карпов А.А., Кипяткова И.С. Методология оценивания работы систем автоматического распознавания речи // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2012. № 55 (4). С. 15–21. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18045933> (дата обращения: 26.05.2025). EDN: PEXJRL.