



ISSN 2788-7995 (Print)  
ISSN 3006-0524 (Online)

**ШӘКӘРІМ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ ХАБАРШЫСЫ  
ТЕХНИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР**

**ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛ**

**ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТА ШАКАРИМА  
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

**BULLETIN OF SHAKARIM UNIVERSITY  
TECHNICAL SCIENCES**

**SCIENTIFIC JOURNAL**

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ  
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН



**ШӘКӘРІМ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ  
Х А Б А Р Ш Ы С Ы  
ТЕХНИКА ҒЫЛЫМДАР  
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛ**

---

**В Е С Т Н И К  
УНИВЕРСИТЕТА ШАКАРИМА  
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ  
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

---

**B U L L E T I N  
OF SHAKARIM UNIVERSITY  
TECHNICAL SCIENCES  
SCIENTIFIC JOURNAL**

**№ 1 (13) 2024**

**Семей, 2024**

**Ғылыми журнал**  
**«Шәкәрім Университетінің Хабаршысы»**  
**Техникалық ғылымдар сериясы»**

№ 1 (13) 2024

**Меншік иесі:**

«Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті»  
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

1997 жылдан бастап шығарылады  
Кезеңділігі: тоқсан сайын (жылына 4 рет)

Журнал Қазақстан Республикасы Ақпарат және қоғамдық даму министрлігінің  
Ақпарат комитетінде тіркелген  
Есепке қою туралы куәлік № KZ93VPY00033663 19.03.2021 ж.

**РЕДАКЦИЯЛЫҚ АЛҚА**

**Бас редактор – Есимбеков Жанибек Серикбекович**, PhD (Қазақстан, Семей қ.)

**Амирханов Кумарбек Жунусбекович** – техника ғылымдарының докторы, «Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті» КЕАҚ профессоры (Қазақстан, Семей қ.)

**Виелеба Войтек** – техника ғылымдарының докторы, Вроцлав ғылым және технология университетінің профессоры (Польша, Вроцлав қ.)

**Дворцевой Александр Игоревич** – техника ғылымдарының кандидаты, Новосібір мемлекеттік техникалық университетінің доценті (Ресей, Новосібір қ.)

**Какимов Айтбек Калиевич** – техника ғылымдарының докторы, «Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті» КЕАҚ профессоры (Қазақстан, Семей қ.)

**Лобасенко Борис Анатольевич** – техника ғылымдарының докторы, «Кемерово мемлекеттік университетінің» профессоры, Жоғары білім берудің федералды мемлекеттік бюджеттік білім беру мекемесі (Ресей, Кемерово қ.)

**Майоров Александр Альбертович** – техника ғылымдарының докторы, федералдық Алтай агробιοтехнологиялық ғылыми орталығының профессоры (Сібір ірімшік өндіру саласындағы ғылыми зерттеу институты) (Ресей, Барнаул қ.)

**Ребезов Максим Борисович** – ауыл шаруашылығы ғылымдарының докторы, Оңтүстік-Орал мемлекеттік университетінің профессоры (Ресей, Челябині қ.)

**Узаков Ясин Маликович** – техника ғылымдарының докторы, Алматы технологиялық университетінің профессоры, (Қазақстан, Алматы қ.)

**Хуторянский Виталий Викторович** – профессор, Реддинг университеті (Ұлыбритания, Реддинг қ.)

**Чоманов Уришбай Чоманович** – техника ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Қазақ қайта өңдеу және тамақ өнеркәсібі ҒЗИ (Қазақстан, Алматы қ.)

**Драгоев Стефан Георгиев** – техника ғылымдарының докторы, Тағамдық технологиялар университетінің профессоры, Болгар Ғылым академиясының корреспондент-мүшес (Болгария, Пловдив қ.)

**Налок Дута** – PhD, Вашингтон Университеті (АҚШ, Вашингтон)

**Жазылу индексі: 76172**

**Редакция құрамы:**

Евлампиева Е.П. – редактор

Семейская З.Т. – редактор

**Редакцияның мекен-жайы:**

071412, Абай облысы, Семей қ., Глинки к-сі, 20а,

каб.506 Байланыс телефоны: 8(7222)31-32-49

Электрондық пошта: rio@semgu.kz

Қолжазбалар қайтарылмайды. Авторлардың пікірлері редакцияның көзқарасымен сәйкес келмеуі мүмкін. Материалдарды басқа басылымдарда пайдалануға редакцияның жазбаша келісімімен ғана рұқсат етіледі. Ұсынылған материалдардың дұрыстығына автор жауапты болады. Журналға сілтеме міндетті.

© «Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғам, 2024

# Научный журнал «Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки»

№ 1 (13) 2024

## Собственник:

Некоммерческое акционерное общество «Университет имени Шакарима города Семей»

Издается с 1997 года

Периодичность: ежеквартально (4 раза в год)

Журнал зарегистрирован в Комитете информации Министерства информации  
и общественного развития Республики Казахстан

Свидетельство о постановке на учет № KZ93VPY00033663 от 19.03.2021 г.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Главный редактор – Есимбеков Жанибек Серикбекович**, PhD (Казахстан, г. Семей)

**Амирханов Кумарбек Жунусбекович** – доктор технических наук, профессор, НАО «Университет имени Шакарима города Семей» (Казахстан, г. Семей)

**Виелеба Войтек** – доктор технических наук, профессор, Вроцлавский университет науки и технологии (Польша, г. Вроцлав)

**Дворцовой Александр Игоревич** – кандидат технических наук, доцент, Новосибирский государственный технический университет (Россия, г. Новосибирск)

**Какимов Айтбек Калиевич** – доктор технических наук, профессор, НАО «Университет имени Шакарима города Семей» (Казахстан, г. Семей)

**Лобасенко Борис Анатольевич** – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет» (Россия, г. Кемерово)

**Майоров Александр Альбертович** – доктор технических наук, профессор, Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий (отдел Сибирского научно-исследовательского института сыроделия) (Россия, г. Барнаул)

**Ребезов Максим Борисович** – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Южно-Уральский государственный университет (Россия, г. Челябинск)

**Узаков Ясин Маликович** – доктор технических наук, профессор, Алматинский технологический университет (Казахстан, г. Алматы)

**Хуторянский Виталий Викторович** – профессор, Университет Рединга (Великобритания, г. Рединг)

**Чоманов Уришбай Чоманович** – доктор технических наук, профессор, академик НАН РК, Казахский НИИ перерабатывающей и пищевой промышленности (Казахстан, г. Алматы)

**Драгоев Стефан Георгиев** – доктор технических наук, профессор, Университет пищевых технологий, член-корреспондент Болгарской Академии наук (Болгария, г. Пловдив)

**Налок Дута** – PhD, Университет штата Вашингтон (США, Вашингтон)

Подписной индекс: 76172

## Технические редакторы:

Евлампиева Е.П.  
Семейская З.Т.

## Адрес редакции:

071412, область Абай, г. Семей, ул. Глинки, 20А,  
каб. 506  
Контакты: телефон: 8(7222)31-32-49  
Электронная почта: rio@semgu.kz

Рукописи не возвращаются. Мнения авторов могут не совпадать с точкой зрения редакции. Использование материалов в других изданиях допускается только с письменного согласия редакции. За достоверность представленных материалов ответственность несет автор. Ссылка на журнал обязательна.

© Некоммерческое акционерное общество «Университет имени Шакарима города Семей», 2024

**Scientific journal**  
**«Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences»**

---

№ 1 (13) 2024

---

**Owner:**

Non-profit Joint Stock Company «Shakarim University of Semey»

Published since 1997

Frequency: quarterly (4 times a year)

The journal is registered with the Information Committee of the Ministry of Information  
and Public Development of the Republic of Kazakhstan  
Certificate of registration no. KZ93VPY00033663 dated 03/19/2021

**EDITORIAL BOARD**

**Editor-in-chief – Yessimbekov Zhanibek**, PhD (Kazakhstan, Semey)

**Amirkhanov Kumarbek** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the NJC «Shakarim University of Semey» (Kazakhstan, Semey)

**Wieleba Wojciech** – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Wroclaw University of Science and Technology (Poland, Wroclaw)

**Kakimov Aitbek** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the NJC «Shakarim University of Semey», (Kazakhstan, Semey)

**Dvortsevov Alexander Igorevich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Novosibirsk State Technical University (Russia, Novosibirsk)

**Lobsenko Boris** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kemerovo State University» (Russia, Kemerovo)

**Mayorov Alexander** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Federal Altai Scientific Center of Agrobiotechnologies (Department of the Siberian Research Institute of Cheese Making) (Russia, Barnaul)

**Rebezov Maxim** – Doctor of Agricultural Sciences, Professor of South Ural State University (Russia, Chelyabinsk)

**Uzakov Yassin** – Doctor of Technical Sciences, Professor of Almaty Technological University (Kazakhstan, Almaty)

**Khutoryanskiy Vitaly** – Professor at the University of Reading (Great Britain, Reading)

**Chomanov Urishbai** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Head of the Department of the Kazakh Research Institute of Processing and Food Industry (Kazakhstan, Almaty)

**Dragoev Stefan** – Doctor of Technical Sciences, Professor of Engineering at the University of Food Technologies, Corresponding Member of the Bulgarian Academy of Sciences (Bulgaria, Plovdiv)

**Nalok Dutta** – PhD, Washington State University (USA, Washington)

**Subscription index: 76172**

**Editorial staff:**

Yevlampiyeva Y. – editor

Semeyskaya Z. – editor

**Editorial Office address:**

071412, Abai region, Semey,

Glinka str., 20A, room 506

Contacts: phone: +7 (7222) 31-32-49

Email address: rio@semgu.kz

Manuscripts are not returned. The opinions of the authors may not coincide with the point of view of the editors. The use of materials in other publications is allowed only with the written consent of the editorial board. The author is responsible for the accuracy of the submitted materials. A link to the journal is required.

© Non-profit Joint Stock Company «Shakarim University of Semey», 2024

**Валерий Анатольевич Лахно** – Национальный университет биоресурсов и природопользования, доктор технических наук, профессор, Г. Киев, Украина. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9695-4543>.

**Лазат Муктаровна Кыдыралина\*** – Университет имени Шакарима г. Семей, PhD, г. Семей Казахстан, e-mail: [lazat\\_75@mail.ru](mailto:lazat_75@mail.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2836-0919>.

#### Information about the authors

**Bakhytzhан Bogatdinovich Akhmetov** – Kazakh National Pedagogical University named after Abai, Doctor of Technical Sciences, Professor, Almaty, Kazakhstan, e-mail: [b\\_akhmetov@ntu.kz](mailto:b_akhmetov@ntu.kz). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5622-2233>.

**Valery Anatolyevich Lakhno** – National University of Bioresources and Environmental Management, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kiev, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9695-4543>.

**Lazat Muktarovna Kydyralina** – Shakarim University, PhD, Semey K. Kazakhstan, e-mail: [lazat\\_75@mail.ru](mailto:lazat_75@mail.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2836-0919>.

Редакцияға енуі 01.03.2024

Өңдеуден кейін түсуі 03.03.2024

Жариялауға қабылданды 05.03.2024

DOI: 10.53360/2788-7995-2024-1(13)-5

MPHTI: 50.43.15



**А.П. Смирнов, Е.С. Риттер\*, А.А. Савостин, Д.В. Риттер, С.С. Молдахметов**

Северо-Казахстанский университет имени Манаша Козыбаева,  
150000, Казахстан, Петропавловск, ул. Пушкина, 86

\*e-mail: [esritter@ku.edu.kz](mailto:esritter@ku.edu.kz)

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА УРОВНЯ И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ

**Аннотация:** В данной статье рассмотрен принцип работы потенциометрического уровнемера для измерения уровня электропроводной жидкости в резервуаре. Электропроводная жидкость измеряется уровнемером косвенным методом в заземленном резервуаре. Устройство состоит из сенсора с низким электрическим сопротивлением, генератора переменного тока, металлической стенки резервуара и усилителя слабого сигнала.

Нелинейность передаточной функции не позволяет использовать измеренные значения сенсора без предварительной линеаризации. Поэтому необходимо разработать модель сенсора в электропроводной жидкости и выявить факторы, влияющие на точность измерения уровня.

Для оценки точности измерений в статье представлена модель электрического поля внутри электролита, создаваемого сенсором потенциометрического уровнемера в резервуаре с цилиндрической стенкой. Используются численные методы, основанные на методе конечных элементов, для расчета потенциалов и токов внутри электролита. Модель конечного элемента и конечно-элементная сетка позволили рассмотреть передачу потенциалов между конечными элементами.

Показано, что погрешность измерения уровня в потенциометрическом уровнемере имеет недопустимую величину и зависит от уровня жидкости и от расположения измерителя уровня.

На основе полученной модели были определены факторы, влияющие на измеренное значение уровня жидкости, и выполнено вычисление абсолютной и относительной погрешностей измерения. Так же определены дальнейшие шаги по улучшению точности измерения уровнемера.

**Ключевые слова:** потенциометрический метод, измеритель уровня, уровнемер, численные методы моделирования, метод конечных элементов, погрешность измерения.

## Введение

В современной промышленности датчики уровня играют ключевую роль в обеспечении эффективного контроля и управления процессами, связанными с жидкостями [1]. Уровнемеры обеспечивают прецизионный мониторинг и автоматизацию различных производственных процессов. Их важность обусловлена не только повышением производительности, но и снижением рисков аварийных ситуаций, контролем качества продукции, а также экономией ресурсов, таких как вода и сырье. Поэтому важно обеспечить точность измерения уровня на производстве [2, 3].

Принцип действия потенциометрического уровнемера известен давно [4, 5], но нелинейность передаточной функции измерителя не позволяет использовать измеренное значение сенсора без линеаризации передаточной функции. Поэтому необходимо построить модель сенсора в электропроводной жидкости и определить факторы, влияющие на точность измерения измерителя.

Принцип измерения уровня потенциометрическим уровнемером

Принцип измерения уровня потенциометрическим уровнемером показан на рисунке 1.

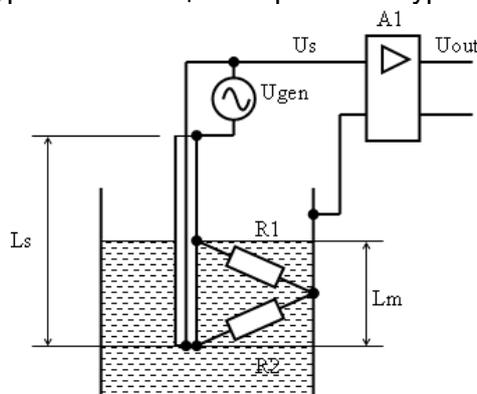


Рисунок 1 – Функциональная схема измерения уровня потенциометрическим уровнемером

Уровень электропроводной жидкости измеряется потенциометрическим уровнемером в заземленном резервуаре косвенным методом.

Уровнемер состоит из сенсора в виде трубы с низким электрическим сопротивлением, генератора переменного тока  $U_{gen}$ , металлической стенки резервуара и усилителя  $A1$  слабого сигнала  $U_s$ .

Между трубой и стенкой резервуара соединены множество сопротивлений электропроводной жидкости. Так как они соединяются с нулевым потенциалом стенки резервуара, то они преобразованы в виде двух эквивалентных сопротивлений  $R1$  и  $R2$ , соединённых со стенкой резервуара. Сопротивления  $R1$  и  $R2$  образуют делитель напряжения на части стержня, погруженного в жидкость.

Измеренное напряжение  $U_s$  в нижнем конце сенсора относительно стенки резервуара будет пропорционально уровню жидкости в резервуаре относительно нулевого потенциала стенки резервуара:

$$U_s = U_{gen} \frac{L_m}{L_s} \frac{R2}{R1 + R2} \quad (1)$$

где  $L_m$  – измеряемый уровень жидкости;

$L_s$  – длина сенсора уровнемера.

Сопротивления резисторов  $R1$  и  $R2$  не равны из-за разных граничных условий в верхней части сенсора и в нижней части сенсора и, вследствие этого, различаются распределением электрических токов сверху и снизу сенсора.

## Методы исследования

Метод моделирования электрического поля в электролите, созданного сенсором стержневого потенциометрического уровнемера внутри электропроводной цилиндрической стенки.

Для решения математической модели на микроуровне применяются численные методы, основанные на дискретизации независимых переменных. В результате дискретизации непрерывные области изменения значений заменяются множествами значений в узловых точках, которые рассматриваются как узлы некоторой сетки. Поэтому методы решения уравнений в частных производных называют также сеточными, наибольшее распространение из которых получили метод конечных разностей (МКР) и метод конечных элементов (МКЭ) [6, 7, 8].

Будем выполнять моделирование электрического поля в электролите в статическом режиме, то есть установившемся во времени [9, 10, 11].

Для моделирования электрического поля в электролите необходимо выполнить:

- создание модели конечного элемента,
- построение конечно-элементной сетки,
- расчёт потенциала в каждой точке объёма в электролите,
- и из этого получить картину потенциалов и токов.

Моделирование электрического поля в электролите с цилиндрической стенкой проще выполнить в полярных координатах. Распространение потенциалов и токов в концентрической конструкции одинаковое в любом радиальном направлении. Поэтому достаточно рассмотреть передачи потенциалов в одной вертикальной плоскости, чтобы получить картину потенциалов и токов во всем объёме в электролите.

Создадим модель конечного элемента и выполним построение конечно-элементной сетки. Разобьём тело электролита на равные кубики в полярных координатах с размером, равным радиусу сенсора  $1R=5$  мм. Примем в модель условие, что удельная электропроводность электролита постоянная и одинаковая во всех конечных элементах электролита.

Схема передачи потенциалов между конечными элементами электролита в горизонтальном слое показана на рисунке 2. На рисунке изображен один сектор передачи потенциалов из шести. Другие секторы такие же и расположены радиально через каждые  $60^\circ$ .

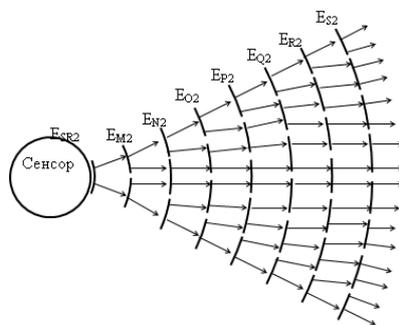


Рисунок 2 – Схема передачи потенциалов между каждым конечными элементами внутри электролита в горизонтальном слое

Каждый концентрический отрезок на рисунке 2 обозначает вертикальную грань конечных элементов цилиндрической поверхности с площадью  $\frac{2\pi R}{6} \cdot R$ , а количество отрезков, например, на линии равного потенциала EN2, обозначает сектор цилиндрической поверхности с площадью  $3 \cdot \frac{2\pi R}{6} \cdot R$ . Передачи потенциалов происходит через контактирующие грани соседних конечных элементов. Направление передачи потенциалов от одной вертикальной грани к следующей грани показано стрелками между поверхностями.

Передачи потенциалов в одном вертикальном слое показаны стрелками между конечными элементами на рисунке 3.

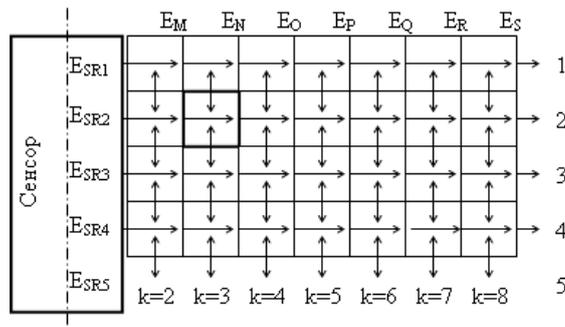


Рисунок 3 – Передачи потенциалов между конечными элементами в теле электролита в вертикальном слое

Число M, N, O означает порядковый номер концентрического слоя в электролите.

Число EM, EN означает потенциал дальней вертикальной грани конечных элементов.

Число k – количество контактирующих конечных элементов в горизонтальном слое.

Под действием электрического поля внутри электролита протекают электрические токи в направлении от большего потенциала к меньшему потенциалу перпендикулярно линиям равного потенциала. В результате протекания электрических токов внутри электролита образуется совокупность значений потенциалов электрического поля [12, 13].

Составим уравнение электрических токов в электролите по закону Кирхгофа [14], например, в конечном элементе N2, который выделен толстой линией на рисунке 3.

$$y_L(k-1)(E_{M2} - E_{N2}) + y_L k(E_{N1} - E_{N2}) + y_L k(E_{N3} - E_{N2}) + y_L(k+1)(E_{O2} - E_{N2}) = 0 \quad (1)$$

где  $y_L$  – удельная электропроводность электролита.

Решая уравнение, получим:

$$E_{N2} = \frac{\frac{k-1}{k}E_{M2} + E_{N1} + E_{N3} + \frac{k+1}{k}E_{O2}}{4} \quad (2)$$

Множители слагаемых в формуле учитывают увеличение конечных элементов в горизонтальном слое внутри электролита с увеличением радиуса от сенсора. Для остальных конечных элементов внутри электролита формула расчёта потенциала аналогична.

### Результаты исследования

Выполним численное моделирование передачи потенциала между конечными элементами внутри электролита в одном вертикальном слое расчётом в программе MatLab методом итерации вычислений потенциалов конечных элементов. При этом введем в модель краевые условия, что потенциал электропроводной цилиндрической стенки равен 0 и что ток в электропроводную цилиндрическую стенку, помещённую в поле потенциалов, равен 0. Подключим к краям сенсора источник тока такой, чтобы напряжение между конечными элементами сенсора изменялось на единицу напряжения, для наглядности.

На рисунке 4 приведено моделирование электрического потенциала внутри электролита с электропроводной цилиндрической стенкой, удалённой на расстояние  $8R$  от сенсора.

В центре таблицы помещён сенсор потенциометрического уровнемера на глубину от +20 до -20 единиц потенциала в сенсоре. Сенсор выделен в таблице серым цветом. Выше середины сенсора условно потенциал отрицательный, ниже середины сенсора условно потенциал положительный. Строка потенциалов на середине сенсора выделена зелёным цветом.

Слева, справа и ниже сенсора равномерно расположены секторы цилиндрической поверхности электролита. Шаг секторов цилиндрической поверхности электролита выбрано в единицах радиуса сенсора  $1R=5$  мм.



Таблица 2 – Зависимость абсолютной и относительной погрешностей измерения уровня от глубины сенсора в электролите

Глубина сенсора в электролите L, мм	30	45	70	100	150	225	340	500	750	1100
Абсолютная погрешность измерения уровня $\Delta m$ , мм	-3,70	-4,38	-5,14	-5,24	-5,50	-5,68	-5,82	-5,90	-5,96	-6,00
Относительная погрешность измерения уровня $\delta$ , %	12,33	9,73	7,34	5,24	3,67	2,52	1,71	1,18	0,79	0,55

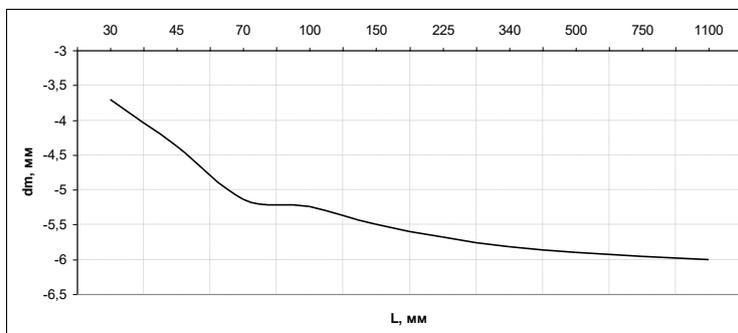


Рисунок 6 – Зависимость абсолютной погрешности измерения уровня от глубины сенсора в электролите внутри вертикальной электропроводной цилиндрической стенкой

Если помещать горизонтальную стенку на расстоянии  $4R...30R$  ниже сенсора, то распределение поля потенциалов изменится. Влияние расстояния от сенсора до горизонтальной стенки в электролите на абсолютную и относительную погрешности измерения уровня приведено в таблице 3 и рисунке 7. Вычисления проводились при погружении зонда на глубину 200 мм.

Таблица 3 – Зависимость абсолютной и относительной погрешностей измерения уровня от расстояния сенсора до горизонтальной стенки

Расстояние от сенсора до горизонтальной стенки S, мм	20	30	45	70	100	150
Абсолютная погрешность измерения уровня $\Delta m$ , мм	-38,56	-21,54	-11,02	-6,58	-5,72	-5,64
Относительная погрешность измерения уровня $\delta$ , %	19,28	10,77	5,51	3,29	2,86	2,82

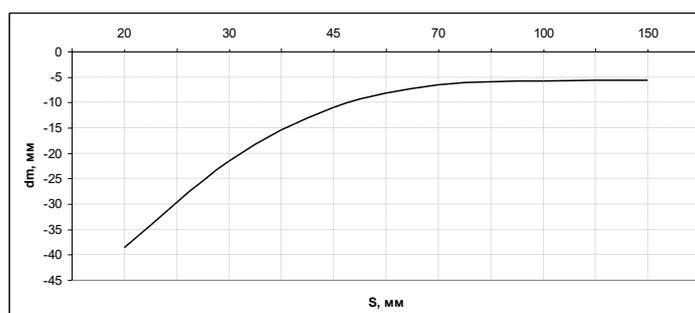


Рисунок 7 – Зависимость абсолютной погрешности измерения уровня от расстояния сенсора до горизонтальной стенки

### Обсуждение научных результатов

В результате моделирования стержневого уровнемера в электролите выявлено, что:

1. Стержневой уровнемер имеет систематическую погрешность измерения уровня 3,7–6,0 мм, представленную в рисунке 6, что соответствует относительной погрешности измерения  $\delta=0,55\text{--}12,3\%$ . Систематическая погрешность измерения уровня проявляется в изменении поля потенциалов в электролите при изменении глубины стержневого уровнемера в электролите. Измеряемый уровень электролита возможно вычислить по формуле  $L = k(U_s + \Delta s_{ist} + \Delta r_{and})$ ,

где  $k$  – масштабирующий коэффициент распределения потенциала в сенсоре в зависимости от длины сенсора;

$U_s$  – измеренное напряжение в нижнем конце сенсора относительно стенки резервуара;

$\Delta_{sist}$  – систематическая погрешность измерения напряжения;

$\Delta_{rand}$  – случайная погрешность измерения напряжения.

Если ввести в вычислитель таблицу коррекции систематической погрешности, то погрешность измерения уровня уменьшится.

2. Стержневой уровнемер имеет дополнительную погрешность измерения уровня от положения уровнемера, представленную на рисунке 7. При условии, что положение уровнемера не будут регулировать, и это вероятно, то эта дополнительная погрешность измерения уровня становится случайной погрешностью измерения уровня. А эта дополнительная погрешность соответствует относительной погрешности измерения уровня  $\delta=2,8-19,3\%$ , что является не допускаемой величиной в сравнении с другими уровнемерами.

3. Уменьшить дополнительную погрешность измерения уровня и, следовательно, уменьшить случайную погрешность измерения уровня возможно введением экранирования и изолирования электрического поля от случайных факторов воздействия путем улучшения конструкции измерителя.

### **Заключение**

Моделирование стержня в электролите методом конечных элементов позволяет моделировать любую конфигурацию среды с разными условиями электропроводности жидкости и расположения сенсора. Результаты моделирования позволяют оценить погрешность измерения устройства, основанного на потенциометрическом методе измерения. Описанный метод моделирования может быть применен для емкостного уровнемера с составлением уравнений диэлектрической проводимости измеряемой среды [15].

*Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP13268797).*

### **Список литературы**

1. Mohindru P. Development of liquid level measurement technology: A review / P. Mohindru // Flow Measurement and Instrumentation. – 2023. – № 89. – С. 30-43.
2. Седалищев В.Н. Методы и средства измерений неэлектрических величин: учеб. пособие / В.Н. Седалищев. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010. – 160 с.
3. Бегунов, А.А. Выбор средств и методик измерений / А.А. Бегунов, В.Л. Иванов, Е.А. Травина. – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 25 с.
4. Пат. US20190049282A1 США. Sensor array for the potentiometric measurement of a fill level in a container / Daniel B., Peter F.; заявитель и патентообладатель Baumer Electric AG.; опубл. 14.02.19. – 7 с.
5. Staff E. Potentiometric Level Measurement Principle [Электрон. ресурс] / E. Staff // Inst Tools. – 2017. URL: <https://instrumentationtools.com/potentiometric-level-measurement-principle> (дата обращения 02.09.23).
6. Алексеев, Г.В. Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений: учеб. пособие / Г.В. Алексеев. – Владивосток: Владивосточный федеральный университет, 2010. – С. 19-29.
7. Абиев Р.Ш. Алгоритмизация расчетов технологического оборудования. Введение в метод конечных разностей: учеб. пособие / Р.Ш. Абиев. – СПб.: Изд-во НИИ химии СПбГУ, 2016. – С. 19-59.
8. Enriched finite element approach for modeling discontinuous electric field in multi-material problems / C. Narváez-Muñoz, M.R. Hashemi, P.B. Ryzhakov et al // Finite Elements in Analysis and Design. – 2023. – № 225.
9. Dimitrios G. Essentials of the Finite Element Method / G. Dimitrios // Academic Press/ – 2015. – P. 1-18.

10. Tan C.M. Applications of Finite Element Methods for Reliability Study of ULSI Interconnections / C.M. Tan, W. Li, Z. Gan // *Microelectronics Reliability*. – 2012. – № 8. – P. 1539-1545.
11. An improvement of the finite-element method for computing the electric field of waveguides with complex geometry / S. Rodríguez-Mattalia, L. Nuño, L. Jódar, J.V. Balbastre // *Mathematical and Computer Modelling*. – 2005. – № 41. – P. 791-805.
12. Гайдукова, Е.В. Численные методы в гидрологии: учеб. пособие / Е.В. Гайдукова, Н.В. Викторова. – СПб.: РГГМУ, 2019. – С. 18-24.
13. Калиткин Н.Н. Численные методы. Методы математической физики: учебник для студ. учреждений высш. проф. Образования / Н.Н. Калиткин, П.В. Корякин. – М: Академия, 2013. – С. 103.
14. Матвиенко В.А. Основы теории цепей: учеб. пособие для вузов / В.А. Матвиенко. – Екатеринбург: УМЦ УПИ, 2016. – С. 42-32.
15. Датчики: Справочное пособие / В.М. Шарапов, Е.С. Полищук, Н.Д. Кошевой, Г.Г. Ишанин. – М: Техносфера, 2012. – 624 с.

### References

1. Mohindru P. Development of liquid level measurement technology: A review / P. Mohindru // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2023. – № 89. – S. 30-43. (In English).
2. Sedalishchev V.N. Metody i sredstva izmerenii neelektricheskikh velichin: ucheb. posobie / V.N. Sedalishchev. – Barnaul: IzD-vo AITGTU, 2010. – 160 s. (In Russian).
3. Begunov, A.A. Vybór sredstv i metodik izmerenii / A.A. Begunov, V.L. Ivanov, E.A. Travina. – SPb: Universitet ITMO, 2019. – 25 s. (In Russian).
4. Pat. US20190049282A1 SSHA. Sensor array for the potentiometric measurement of a fill level in a container / Daniel B., Peter F.; заявитель i patentoobladatel' Baumer Electric AG.; opubl. 14.02.19. – 7 s. (In English).
5. Staff E. Potentiometric Level Measurement Principle [Ehlektron. resurs] / E. Staff // *Inst Tools*. – 2017. URL: <https://instrumentationtools.com/potentiometric-level-measurement-principle> (data obrashcheniya 02.09.23). (In English).
6. Alekseev, G.V. Vvedenie v chislennyye metody resheniya differentsial'nykh uravnenii: ucheb. posobie / G.V. Alekseev. – Vladivostok: Vladivostochnyi federal'nyi universitet, 2010. – S. 19-29. (In Russian).
7. Abiev R.SH. Algoritmizatsiya raschetov tekhnologicheskogo oborudovaniya. Vvedenie v metod konechnykh raznostei: ucheb. posobie / R.SH. Abiev. – SPb.: Izd-vo NII khimii SPBGU, 2016. – S. 19-59. (In Russian).
8. Enriched finite element approach for modeling discontinuous electric field in multi-material problems / C. Narváez-Muñoz, M.R. Hashemi, P.B. Ryzhakov et al // *Finite Elements in Analysis and Design*. – 2023. – № 225. (In English).
9. Dimitrios G. Essentials of the Finite Element Method / G. Dimitrios // *Academic Press*/ – 2015. – P. 1-18. (In English).
10. Tan C.M. Applications of Finite Element Methods for Reliability Study of ULSI Interconnections / C.M. Tan, W. Li, Z. Gan // *Microelectronics Reliability*. – 2012. – № 8. – R. 1539-1545. (In English).
11. An improvement of the finite-element method for computing the electric field of waveguides with complex geometry / S. Rodríguez-Mattalia, L. Nuño, L. Jódar, J.V. Balbastre // *Mathematical and Computer Modelling*. – 2005. – № 41. – R. 791-805. (In English).
12. Gaidukova, E.V. Chislennyye metody v gidrologii: ucheb. posobie / E.V. Gaidukova, N.V. Viktorova. – SPb.: RGGMU, 2019. – S. 18-24. (In Russian).
13. Kalitkin N.N. Chislennyye metody. Metody matematicheskoi fiziki: uchebnik dlya stud. uchrezhdenii vyssh. prof. Obrazovaniya / N.N. Kalitkin, P.V. Koryakin. – M: Akademiya, 2013. – S. 103. (In Russian).
14. Matvienko V.A. Osnovy teorii tsepei: ucheb. posobie dlya vuzov / V.A. Matvienko. – Ekaterinburg: UMTS UPI, 2016. – S. 42-32. (In Russian).
15. Datchiki: Spravochnoe posobie / V.M. Sharapov, E.S. Polishchuk, N.D. Koshevoi, G.G. Ishanin. – M: Tekhnosfera, 2012. – 624 s. (In Russian).