


А.П. Смирнов, Е.С. Риттер , Д.В. Риттер, А.А. Савостин, С.С. Молдахметов
Kozybayev University, Петропавловск, Казахстан
E-mail: esritter@ku.edu.kz

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОГО УРОВНЕМЕРА В НЕОДНОРОДНОЙ ЖИДКОСТИ И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ

Аннотация. В данной статье рассматривается принцип работы потенциометрического уровнемера для измерения уровня электропроводной жидкости в резервуаре. Для оценки точности измерений в статье представлена модель электрического поля внутри электролита с пеной, создаваемого сенсором потенциометрического уровнемера. Используются численные методы, основанные на методе конечных элементов, для расчета потенциалов и токов внутри электролита. Модель конечного элемента и конечно-элементная сетка позволяют рассмотреть передачу потенциалов между конечными элементами.

На основе полученной модели были определены погрешность измерения уровня жидкости и коэффициент влияния пены на погрешность измерения уровня жидкости.

Ключевые слова. Потенциометрический метод, измеритель уровня, уровнемер, численные методы моделирования, метод конечных элементов, погрешность измерения, пена.

Введение.

В современной промышленности датчики уровня играют ключевую роль в обеспечении эффективного контроля и управления процессами, связанными с жидкостями. Уровнемеры обеспечивают прецизионный мониторинг и автоматизацию различных производственных процессов с повышением производительности, качества продукции, экономии ресурсов, а также снижением рисков аварийных ситуаций. Поэтому важно обеспечить точность измерения уровня на производстве.

В виду многообразия условий применения уровнемеров в промышленности необходимо выполнять правильный выбор вида уровнемера для конкретных условий применения, которые могут быть не описаны изготовителем уровнемера. Для правильного выбора вида уровнемера необходима консультация специалиста изготовителя или другого источника информации [1, 2, 3].

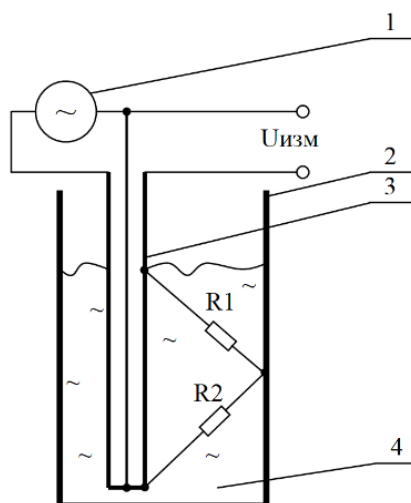
Принцип действия потенциометрического уровнемера известен давно [4, 5], но нелинейность передаточной функции измерителя не позволяет использовать измеренное значение сенсора без коррекции передаточной функции. Поэтому необходимо построить модель сенсора в электропроводной жидкости и определить факторы,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

Материалы и методы.

Принцип измерения уровня потенциометрическим уровнемером.

Погружной зонд уровнемера имеет форму трубы с низким электрическим сопротивлением, и его концы питаются от генератора переменного тока с частотой несколько килогерц. Между этой трубой и стенкой резервуара находится проводящая жидкость, которая можно рассматривать как бесконечное количество сопротивлений. Поскольку все эти сопротивления соединены с одной и той же электропроводной стенкой резервуара, их можно представить как два эквивалентных сопротивления, обозначенных

как R1 и R2. Они подключены с одной стороны к стенке резервуара и общему проводу, а с другой стороны – к поверхности зонда (рисунок 1).



- 1 – Генератор переменного тока
 - 2 – Электропроводящий резервуар с жидкостью
 - 3 – Зонд измерителя уровня
 - 4 – Измеряемая жидкость
- $U_{ИЗМ}$ – выходное напряжение для измерения

Рисунок 1 – Принцип работы потенциметрического метода измерения

Генератор создает переменный ток большой амплитуды, что приводит к появлению напряжения на поверхности зонда. Сопротивления R1 и R2 формируют делитель напряжения на зонде, погруженном в жидкость.

Измеренное напряжение $U_{ИЗМ}$ в нижней части зонда, относительно нулевого потенциала стенки резервуара, изменяется пропорционально уровню жидкости в резервуаре.

Измеренное напряжение $U_{ИЗМ}$ в нижнем конце сенсора относительно стенки резервуара будет пропорционально уровню жидкости в резервуаре относительно нулевого потенциала стенки резервуара:

$$U_{ИЗМ} = U_{ГЕН} \frac{L_m}{L_s} \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad (1)$$

где L_m - измеряемый уровень жидкости;
 L_s - длина сенсора уровнемера.

Сопротивления резисторов R1 и R2 различаются распределением электрических токов сверху и снизу сенсора, то есть являются функцией граничных условий в верхней части и в нижней части сенсора. Различие граничных условий приводит к изменению сопротивлений R1 и R2, что, в свою очередь, вызывает появление дополнительной погрешности измерения уровня Δm .

$$L_m = \frac{U_{ИЗМ}}{U_{ГЕН}} \frac{R_1 + R_2}{R_2} L_s = \frac{U_{ИЗМ}}{U_{ГЕН}} \cdot 2 \cdot L_s - \Delta m, \quad (2)$$

$$\Delta m = \frac{U_{ИЗМ}}{U_{ГЕН}} \frac{R_1 + R_2}{R_2} L_s - \frac{2 \cdot U_{ИЗМ}}{U_{ГЕН}} \cdot L_s = L_m. \quad (3)$$

Моделирование пены.

Если в растворе появятся пузырьки газа, то на их поверхности начнут адсорбироваться молекулы поверхностно-активных веществ, если они содержатся в растворе. Пузырьки всплывают к поверхности жидкости под воздействием силы гравитации. Большое число пузырьков на верхней поверхности жидкости приводит к образованию пены. Пена представляет собой дисперсию газа (чаще всего воздуха) в жидкой дисперсионной среде. В пенах заполненные газом ячейки разделены пленками дисперсионной среды.

Пены обладают относительной устойчивостью. В течение времени жидкость из пены стекает под действием сил гравитации и капиллярных сил всасывания, пузырьки попарно соединяются через тонкие жидкие пленки в один большой пузырёк в виде пентагонального додекаэдра. Плёнки пены верхнего слоя утончаются и затем разрываются. В результате динамического процесса зарождения и разрушения пузырьков на поверхности раствора формируются слои пузырьков разных размеров – внизу пены – пузырьки малого размера, в середине пены – пузырьки среднего размера, вверху пены – пузырьки большого размера [6, 7].

Важной характеристикой пены является кратность пены β :

$$\beta = \frac{V_F}{V_L} \quad (4)$$

где V_F – объем пены, V_L – объем жидкости, которая использована для получения пены.

Примем модель пены как показано на рисунке 2: кратность пены β одинаковая на одном уровне и линейно увеличивается с увеличением номера слоя пены.

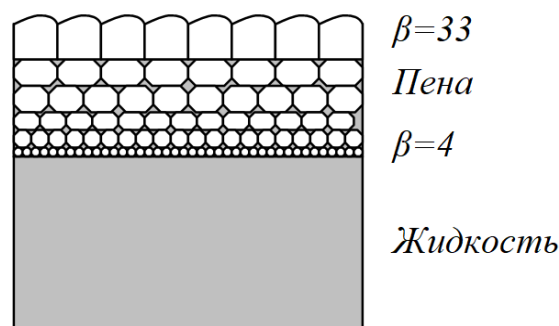


Рисунок 2 – Пена над жидкостью в вертикальной плоскости

Результаты и обсуждение.

Электропроводной в пене является только жидкая фаза, поэтому удельная электропроводность пены y_F зависит от содержания жидкой фазы в пене и удельной электропроводности жидкой фазы y_L [7].

$$\frac{y_F}{y_L} = \frac{1}{\beta B} \text{ или } \frac{\rho_F}{\rho_L} = \beta B, \quad (5)$$

где ρ_F и ρ_L – удельное сопротивление пены и жидкости, соответственно,

B – коэффициент формы, зависящий от кратности пены и распределения жидкой фазы между каналами и пленками в пене.

При возрастании кратности пены β коэффициент формы B тоже увеличивается, и удельная электропроводность пены уменьшается. Экспериментальные данные для барботажных пен хорошо аппроксимируются уравнением:

$$B = 3 - 2,5 \left(\frac{y_F}{y_L}\right)^{1/3} + 0,5 \left(\frac{y_F}{y_L}\right)^2. \quad (6)$$

Решим уравнение относительно кратности пены β :

$$\frac{1}{\beta} = 3 \left(\frac{y_F}{y_L}\right) - 2,5 \left(\frac{y_F}{y_L}\right)^{4/3} + 0,5 \left(\frac{y_F}{y_L}\right)^3. \quad (7)$$

Моделирование электрического поля в электролите с пеной, созданного сенсором потенциометрического уровнемера.

Для решения математической модели на микроуровне применяются численные методы, основанные на дискретизации непрерывных 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 [8, 9, 10, 11, 12, 13].

Будем выполнять моделирование электрического поля в электролите в статическом режиме, то есть установившемся во времени. 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 построить картину потенциалов и токов.

1. Создадим модель конечного элемента.

Разобьём тело электролита на равные кубики в декартовых координатах.

Схема передачи потенциалов между конечными элементами внутри электролита показана на рисунке 3. Передачи потенциалов происходит через контактирующие грани соседних конечных элементов, что показано стрелками.

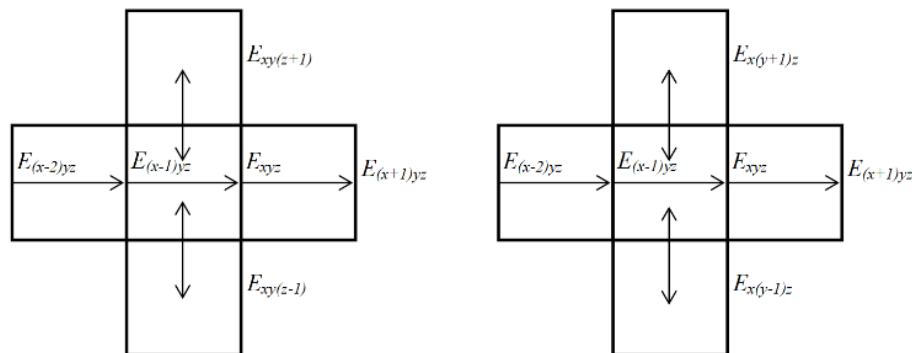


Рисунок 3 – Схема передачи потенциалов между конечными элементами внутри электролита в вертикальной и горизонтальной плоскостях

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.

Составим уравнение электрических токов в электролите по закону Кирхгофа, например, в конечном элементе xyz .

$$\frac{E_{xy(z+1)} - E_{xyz}}{\frac{(\rho_z + \rho_z)}{2}} + \frac{E_{(x-1)yz} - E_{xyz}}{\rho_z} + \frac{E_{(x+1)yz} - E_{xyz}}{\rho_z} + \frac{E_{x(y+1)z} - E_{xyz}}{\rho_z} + \frac{E_{x(y-1)z} - E_{xyz}}{\rho_z} + \frac{E_{xy(z-1)} - E_{xyz}}{\frac{(\rho_z + \rho_z - 1)}{2}} = 0. \quad (8)$$

Решая уравнение, получим:

$$E_{xyz} = \frac{\frac{\rho_z}{\rho_L + \rho_L} E_{xy(z+1)} + \frac{1}{\rho_z} (E_{(x-1)yz} + E_{(x+1)yz} + E_{x(y+1)z} + E_{x(y-1)z}) + \frac{\rho_z}{\rho_L + \rho_L} E_{xy(z-1)}}{\frac{\rho_z + 1}{\rho_L + \rho_L} + \frac{\rho_z}{\rho_L} + \frac{\rho_z}{\rho_L} + \frac{\rho_z - 1}{\rho_L}}. \quad (9)$$

2. Построение конечно-элементной сетки.

Моделирование электрического поля в электролите в декартовых координатах трудоёмкое потому, что необходимо выполнить расчёт потенциалов всего множества конечных элементов. Модель электролита в декартовых координатах будет иметь вид параллелепипеда размером xyz . Для высокой точности вычислений необходимо принять большие числа x , y и z . Для ограничения количества конечных элементов построим модель бесконечного пространства конечных элементов в гранях параллелепипеда линейной экстраполяцией в виде:

$$E_{X\infty} = E_{X\infty-1} - (E_{X\infty-2} - E_{X\infty-1}) = 2E_{X\infty-1} - E_{X\infty-2}, \quad (10)$$

$$E_{Y\infty} = 2E_{Y\infty-1} - E_{Y\infty-2}, \quad (11)$$

$$E_{Z\infty} = 2E_{Z\infty-1} - E_{Z\infty-2}, \quad (12)$$

где $E_{X\infty}$ – потенциал грани бесконечного пространства конечных элементов по оси x ;

$E_{Y\infty}$ – потенциал грани бесконечного пространства конечных элементов по оси y ;

$E_{Z\infty}$ – потенциал грани бесконечного пространства конечных элементов по оси z .

3. Расчёт потенциала в каждой точке объёма в электролите.

Выполним численное моделирование передачи потенциала между конечными элементами внутри электролита в параллелепипеде размером $xyz = 35 \times 40 \times 268$ конечных элементов электролита расчётом в программе MATLAB методом итерации вычислений потенциалов конечных элементов.

При этом подставим в уравнение электрических токов каждого слоя (9)

для жидкости $\frac{\rho_z}{\rho_L} = 1$,

для пены $\frac{\rho_z}{\rho_L}$ - значения из формулы (7).

Подключим к краям сенсора источник тока такой, чтобы напряжение между конечными элементами сенсора изменялось на единицу напряжения, для наглядности.

Примем в модель условие, что удельная электропроводность электролита постоянная и одинаковая во всех конечных элементах электролита.

4. Построение картины потенциалов.

В результате итерации вычислений потенциалов конечных элементов получим $x+y+z$ слоев картины электрического поля внутри электролита.

В центре таблицы помещён сенсор потенциометрического уровнемера на глубину 44 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. Жёлтым цветом выделен изолятор сенсора.

Слева, справа и ниже сенсора расположены конечные элементы электролита. Шаг конечных элементов электролита выбран в единицах радиуса сенсора $R=5$ мм.

Таблица 1 – Зависимость дополнительной погрешности измерения уровня потенциометрического уровнемера от уровня пены над жидкостью

Уровень пены L_f , мм	25	55	100	150
Относительный уровень пены, δ_L	0,113	0,250	0,455	0,681
Дополнительная абсолютная погрешность измерения уровня без учёта жидкости в пене Δm , мм	+1,42	+2,67	+5,31	+8,72
Дополнительная относительная погрешность измерения уровня без учёта жидкости в пене δm	+0,00646	+0,0121	+0,0242	+0,0396

Составим аппроксимирующее линейное уравнение дополнительной погрешности измерения уровня потенциометрического уровнемера от уровня пены над жидкостью:

$$\Delta m = \Delta m_{\max} / L_f_{\max} \cdot L_f = 0,058 \cdot L_f, \text{ мм}$$

Отсюда коэффициент влияния уровня пены на абсолютную погрешность измерения уровня:

$$K_{\text{вл}} = 0,058.$$

Заключение.

Моделирование уровнемера 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 [14].

В результате моделирования потенциометрического уровнемера в электролите выявлено, что:

1) Потенциометрический уровнемер имеет дополнительную погрешность измерения от уровня пены над жидкостью, линейно зависящую от уровня пены. Вычисленный коэффициент влияния на дополнительную погрешность измерения позволяет корректировать погрешность измерения по известному уровню пены.

2) Поплавковый уровнемер может иметь дополнительную погрешность измерения от уровня пены над жидкостью до половины диаметра поплавка, то есть до 20 мм. Потенциометрический уровнемер в сравнении поплавковым уровнемером имеет величину дополнительной погрешности измерения от уровня пены над жидкостью такого же порядка.

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

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Седалищев В.Н. Методы и средства измерений неэлектрических величин: Учеб. Пособие. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010. - 160 с.
- [2] Бегунов А.А., Иванов В.Л., Травина Е.А. Выбор средств и методик измерений. – СПб.: Университет ИТМО, 2019. – 25 с.

- [3] Минигалиев Г.Б. Выбор датчиков уровня : учебное пособие. – Нижнекамск: ФГБОУ ВПО КНИТУ, 2015. – 58 с.
- [4] Sensor array for the potentiometric measurement of a fill level in a container: Пат. US20190049282A1 США; заявитель и патентообладатель Baumer Electric AG.; опубл. 14.02.19. – 7 с.
- [5] Staff, E. Potentiometric Level Measurement Principle // Inst Tools. – 2017. – URL: <https://instrumentationtools.com/potentiometric-level-measurement-principle> (дата обращения 02.09.23)
- [6] Гельфман М. И., Ковалевич О. В., Юстратов В. П. Коллоидная химия. 5-е изд. – СПб.: Лань, 2010. – 336 с.
- [7] Вилкова Н.Г. Свойства пен и методы их исследования: моногр. / Н.Г.Вилкова. – Пенза, ПГУАС, 2013. – 120 с.
- [8] Алексеев Г.В. Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений. Уч.пос. – Владивосток: Владивосточный федеральный университет, 2010, С. 19-29.
- [9] Абиев Р. Ш. Алгоритмизация расчетов технологического оборудования. Введение в метод конечных разностей: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во НИИ химии СПбГУ, 2016. – С. 19-59
- [10] Гайдукова Е.В., Викторова Н.В. Численные методы в гидрологии. Учебное пособие. – СПб.: РГГМУ, 2019. – С. 18-24.
- [11] Калиткин Н.Н., Корякин П.В. Численные методы. Методы математической физики. – Москва: Академия, 2013. – С. 103.
- [12] Dimitrios G. Essentials of the Finite Element Method. Academic Press, 2015. Pp. 1-18.
- [13] Tan C. M., Li W., Gan Z. Applications of Finite Element Methods for Reliability Study of ULSI Interconnections // Microelectronics Reliability. 2012. no. 8. Pp. 1539-1545.
- [14] Novák M. Introduction to sensors for electrical and mechanical engineers. – Boca Raton: CRC Press, 2020. – 215 p.

REFERENCES*

- [1] Sedalishhev V.N. Metody i sredstva izmerenij nejelektricheskikh velichin: Ucheb. Posobie. – Barnaul: Izd-vo AltGTU, 2010. - 160 s.
- [2] Begunov A.A., Ivanov V.L., Travina E.A. Vybora sredstv i metodik izmerenij. – SPb.: Universitet ITMO, 2019. – 25 s.
- [3] Minigaliev G.B. Vybora datchikov urovnja : uchebnoe posobie. – Nizhnekamsk: FGBOU VPO KNIITU, 2015. – 58 s.
- [4] Sensor array for the potentiometric measurement of a fill level in a container: Pat. US20190049282A1 SShA; zajavitel' i patentoobladatel' Baumer Electric AG.; opubl. 14.02.19. – 7 s.
- [5] Staff, E. Potentiometric Level Measurement Principle // Inst Tools. – 2017. – URL: <https://instrumentationtools.com/potentiometric-level-measurement-principle> (data obrashhenija 02.09.23)
- [6] Gel'fman M. I., Kovalevich O. V., Justratov V. P. Kolloidnaja himija. 5-e izd. – SPb.: Lan', 2010. – 336 s.
- [7] Vilkova N.G. Svoystva pen i metody ih issledovanija: monogr. / N.G.Vilkova. – Penza, PGUAS, 2013. – 120 s.
- [8] Alekseev G.V. Vvedenie v chislennye metody reshenija differencial'nyh uravnenij. Uch.pos. – Vladivostok: Vladivostochnyj federal'nyj universitet, 2010, S. 19-29.

[9] Abiev R. Sh. Algoritmizacija raschetov tehnologicheskogo oborudovaniya. Vvedenie v metod konechnyh raznostej: Uchebnoe posobie. – SPb.: Izd-vo NII himii SPbGU, 2016. – S. 19-59

[10] Gajdukova E.V., Viktorova N.V. Chislennye metody v gidrologii. Uchebnoe posobie. – SPb.: RGGMU, 2019. – S. 18-24.

[11] Kalitkin N.N., Korjakin P.V. Chislennye metody. Metody matematicheskoy fiziki. – Moskva: Akademija, 2013. – S. 103.

[12] Dimitrios G. Essentials of the Finite Element Method. Academic Press, 2015. Pp. 1-18.

[13] Tan C. M., Li W., Gan Z. Applications of Finite Element Methods for Reliability Study of ULSI Interconnections // Microelectronics Reliability. 2012. no. 8. Pp. 1539-1545.

[14] Novák M. Introduction to sensors for electrical and mechanical engineers. – Boca Raton: CRC Press, 2020. – 215 p.

Андрей Смирнов, докторант, Kozybayev University, Петропавл, Қазақстан, gprsboost03@mail.ru,

Екатерина Риттер, PhD, доцент, Kozybayev University, Петропавл, Қазақстан, esritter@ku.edu.kz

Алексей Савостин, т.ғ.к., профессор, Kozybayev University, Петропавл, Қазақстан, asavostin@ku.edu.kz

Дмитрий Риттер, т.ғ.к., профессор, Kozybayev University, Петропавл, Қазақстан, dritter@ku.edu.kz

Саят Молдахметов, PhD, доцент, Kozybayev University, Петропавл, Қазақстан, ssmoldahmetov@ku.edu.kz

ГЕТЕРОГЕНДІ СҰЙЫҚТЫҚТАҒЫ ПОТЕНЦИОМЕТРИЯЛЫҚ ДЕҢГЕЙ ӨЛШЕГІШТІ МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ҚАТЕНІ БАҒАЛАУ

Андатпа. Бұл мақалада резервуардағы электр өткізгіш сұйықтықтың деңгейін өлшеу үшін потенциометриялық деңгей өлшегіштің жұмыс принципі қарастырылады. Өлшеу дәлдігін бағалау үшін мақалада потенциометриялық деңгей өлшегіш сенсоры шығаратын көбік электролитінің ішіндегі электр өрісінің моделі келтірілген. Электролит ішіндегі потенциалдар мен токтарды есептеу үшін ақырғы элементтер әдісіне негізделген сандық әдістер қолданылады. Ақырғы элемент моделі және ақырғы элемент торы ақырғы элементтер арасындағы потенциалдардың берілуін қарастыруға мүмкіндік береді.

Алынған модель негізінде сұйықтық деңгейін өлшеу қателігі және сұйықтық деңгейін өлшеу қателігіне көбіктің әсер ету коэффициенті анықталды.

Түйінді сөздер. Потенциометриялық әдіс, деңгей өлшегіш, сандық модельдеу әдістері, ақырғы элементтер әдісі, өлшеу қателігі, көбік.

Andrey Smirnov, doctoral student, Kozybayev University, Petropavlovsk, Kazakhstan, gprsboost03@mail.ru,

Ekaterina Ritter, PhD, docent, Kozybayev University, Petropavlovsk, Kazakhstan, esritter@ku.edu.kz

Alexey Savostin, candidate of technical sciences, professor, Kozybayev University, Petropavlovsk, Kazakhstan, asavostin@ku.edu.kz

Dmitry Ritter, candidate of technical sciences, professor, Kozybayev University, Petropavlovsk, Kazakhstan, dritter@ku.edu.kz

Sayat Moldakhmetov, PhD, docent, Kozybayev University, Petropavlovsk, Kazakhstan, ssmoldahmetov@ku.edu.kz

MODELING OF A POTENTIOMETRIC LEVEL METER IN A HETEROGENEOUS LIQUID AND ERROR ASSESSMENT

Abstract. This article discusses the operating principle of a potentiometric level sensor for measuring the level of conductive liquid in a vessel. The article presents a model of the electric field inside the electrolyte with foam created by the potentiometric level sensor disposed in the vessel to assess the measurement accuracy. Numerical methods based on the finite element method are used to calculate potentials and currents within the electrolyte. The finite element model and mesh allow for the examination of potential transfer between finite elements.

Based on the obtained model, the error in measuring the liquid level and the coefficient of influence of foam on the error in measuring the liquid level were determined.

Keywords. Potentiometric method, level meter, level sensor, numerical modelling methods, finite element method, measurement error, foam.
