ISNN 3030-3907

2026
JUNE
ISSUE - 6
VOLUME -5

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

IYUN 2026
Issue - 6, VOLUME – 5

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕХНОЛОГИЯМ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ЖИДКИХ ПРОДУКТОВ НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Юсупбеков Нодирбек Рустамбекович
Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Буронов Бобирмирзо Алишер угли
Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
E-mail: boburmirzo.uzb.7@gmail.com

Аннотация. Точное измерение уровня жидких продуктов в ёмкостях имеет важное значение для устойчивого управления и контроля технологических процессов на производственных предприятиях. Надёжное определение количества жидкости в резервуарах, технологических аппаратах и ёмкостях хранения способствует повышению производственной безопасности, контролю расхода сырья, а также точному учёту готовой продукции. Поэтому на промышленных объектах устройства измерения уровня рассматриваются как неотъемлемая часть технологической системы. В настоящее время для определения уровня жидкости применяются гидростатические методы, методы дифференциального давления, ёмкостные, ультразвуковые, радарные, оптические, радиометрические и другие методы. Данные методы отличаются друг от друга принципом действия, точностью измерения, надёжностью, наличием или отсутствием контакта с измеряемой средой, а также возможностями применения в промышленных условиях. В связи с этим сравнительный анализ методов измерения уровня жидких продуктов, а также оценка их метрологических возможностей и эксплуатационных характеристик представляют собой важную научно-практическую задачу данного направления.

Ключевые слова: промышленные ёмкости, уровень жидких продуктов, методы измерения уровня, уровнемерные устройства, контактное и бесконтактное измерение, метрологические характеристики, точность измерения, интеллектуальные датчики.

Annotation. The article provides a review and comparative analysis of liquid level measurement methods from the point of view of their applicability in industrial vessels. It is shown that, when contact methods are used, the interaction of the sensing element with the liquid medium may lead to corrosion, contamination, deposit formation, mechanical wear, as well as the influence of the physicochemical properties of the medium on the measurement results. Non-contact methods make it possible to determine the level without direct contact with

ISSN 3030-3907

the liquid, which is a significant advantage during operation under complex technological conditions. The results of the comparative assessment show that, when selecting a level measurement method, it is necessary to comprehensively consider accuracy, reliability, cost, installation conditions, and maintenance requirements. It is substantiated that the ultrasonic method is a promising direction for ensuring automated control of the level of liquid products in industrial vessels.
Keywords: industrial vessels, industrial tanks, liquid level, level gauges, contact methods, non-contact methods, ultrasonic level measurement, radar level measurement, measurement reliability.
Annotatsiya. Maqolada suyuqlik sathini o‘lchash usullari ularning sanoat sig‘imlarida qo‘llanilishi nuqtayi nazaridan ko‘rib chiqilgan va qiyosiy tahlil qilingan. Ko‘rsatib o‘tilganki, kontaktli usullardan foydalanilganda sezgir elementning suyuq muhit bilan o‘zaro ta’siri korroziya, ifloslanish, cho‘kindi hosil bo‘lishi, mexanik yeyilish, shuningdek, muhitning fizik-kimyoviy xossalarining o‘lchash natijalariga ta’sir qilishiga olib kelishi mumkin. Kontaktsiz usullar suyuqlik bilan bevosita kontaktsiz sathni aniqlash imkonini beradi, bu esa murakkab texnologik sharoitlarda ekspluatatsiya qilishda muhim ustunlik hisoblanadi. Qiyosiy baholash natijalari shuni ko‘rsatadiki, sathni o‘lchash usulini tanlashda aniqlik, ishonchlilik, narx, montaj sharoitlari va texnik xizmat ko‘rsatish talablarini kompleks hisobga olish zarur. Ultratovushli usul sanoat sig‘imlarida suyuq mahsulotlar sathini avtomatlashtirilgan nazorat qilishni ta’minlash uchun istiqbolli yo‘nalish ekanligi asoslab berilgan.
Kalit so‘zlar: sanoat sig‘imlari, sanoat rezervuarlari, suyuqlik sathi, sath o‘lchagichlar, kontaktli usullar, kontaktsiz usullar, ultratovushli sath o‘lchash, radarli sath o‘lchash, o‘lchash ishonchliligi.

ВВЕДЕНИЕ.

Под измерением уровня понимается определение высоты жидкой рабочей среды внутри технологического аппарата, резервуара или промышленной ёмкости [1, 2]. Специальный измерительный прибор, применяемый для этой цели, называется уровнемером [1]. Контролируемые вещества могут находиться в технологических аппаратах, резервуарах и загрузочных ёмкостях различной формы.

В промышленных ёмкостях и технологических аппаратах уровень жидкости является одним из важных технологических параметров при контроле производственного процесса. Информация, получаемая по данному параметру, необходима для устойчивого управления режимом работы оборудования, обеспечения технологической безопасности, а также для точного и автоматизированного учёта количества жидкого продукта в единицах объёма или массы в режиме реального времени [3, 4, 5].

ISSN 3030-3907

Для определения уровня жидкости в промышленных ёмкостях измерительное устройство во многих случаях устанавливается в верхней части резервуара. При этом датчик определяет расстояние d между точкой своего монтажа и поверхностью жидкости. Поскольку высота ёмкости h является заранее известной постоянной величиной, уровень жидкости L рассчитывается на основе данной геометрической зависимости [6, 7] (рис. 1).

$$L = h - d \qquad (1)$$

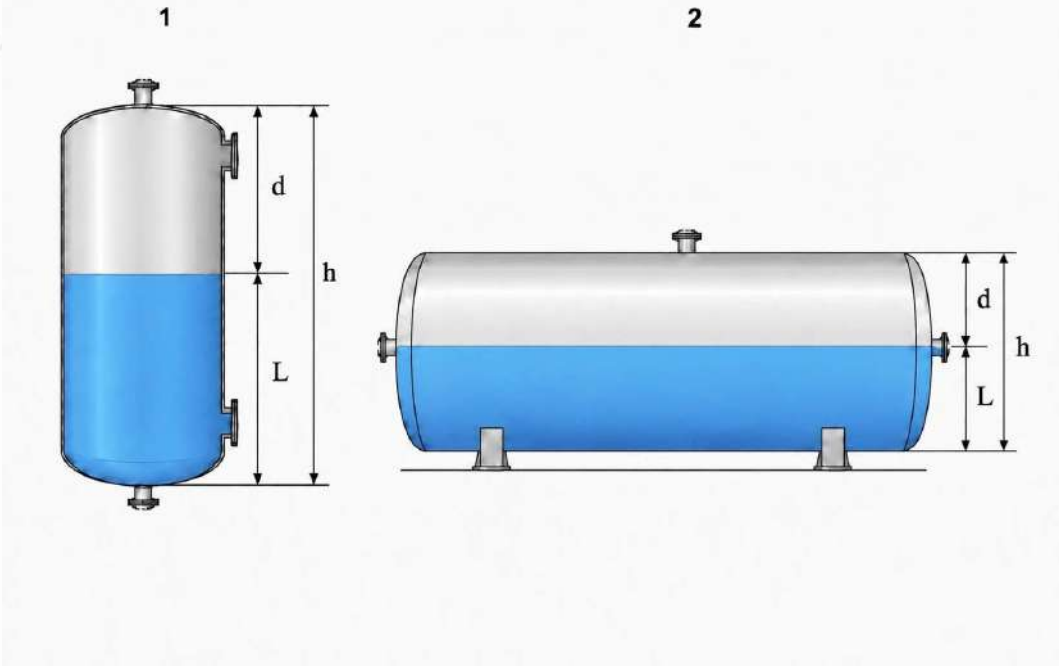


Рис. 1. Схема определения уровня жидкого продукта в промышленных ёмкостях различной формы: 1 — вертикальная цилиндрическая ёмкость; 2 — горизонтальная цилиндрическая ёмкость.

В настоящее время уровнемерные устройства широко применяются в различных отраслях промышленности [8–10]. По назначению их можно разделить на две основные категории: к первой категории относятся устройства, предназначенные для непрерывного измерения уровня материала, ко второй — датчики, служащие для подачи сигнала при достижении материалом заданных предельных значений, то есть максимального или минимального уровня в технологических устройствах [10–13].

Устройства первой категории называются датчиками уровня или уровнемерами, а устройства второй категории относятся к сигнализаторам уровня [10, 11]. В зависимости от способа взаимодействия чувствительного элемента с измеряемой средой уровнемеры подразделяются на контактные и бесконтактные типы [8, 9, 14, 19, 20].

ISSN 3030-3907

Анализ литературы [8–22] показывает, что в практической деятельности для определения уровня применяются различные методы и способы измерения. При этом существуют разные подходы — от наиболее простых ручных методов измерения до современных измерительных технологий, не требующих непосредственного контакта с измеряемым материалом или средой. Вместе с тем отдельные методы благодаря широкой области применения и способности адаптироваться к различным технологическим условиям рассматриваются как универсальные методы измерения уровня.

Если средства измерения уровня сгруппировать по их общим признакам, принципу действия и особенностям применения, то их можно представить в виде классификации, состоящей из четырёх основных категорий и входящих в их состав подгрупп [8, 19–22].

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ			
РУЧНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ	ЭЛЕКТРО-МЕХАНИЧЕСКИЕ	ЭЛЕКТРОННЫЕ КОНТАКТНЫЕ	ЭЛЕКТРОННЫЕ БЕСКОНТАКТНЫЕ
Поплавковые	Буйковые	Емкостные	Лазерные
Измерительная рейка / зонд	Сервоприводные	Оптические	Тензометрические
Рулеточные	Резистивная лента	Тепловые	Радиоизотопные
Визуальные указатели	Магнитострикционные	Электропроводностные	Радарные
	Вращательные сигнализаторы	Датчики перепада давления	Ультразвуковые
		Волноводные уровнемеры	
		Вибрационный сигнализатор	

Рис. 2. Классификация методов контроля уровня

Далее рассматриваются основные преимущества и недостатки каждой подгруппы уровнемерных устройств [23–33].

Приборы, относящиеся к первой группе, характеризуются относительно простой конструкцией и несложным принципом работы. В частности, смотровые стёкла и измерительные рейки позволяют за короткое время определять уровень жидких продуктов в малогабаритных ёмкостях в статическом состоянии. Ещё одной важной особенностью таких устройств является их низкая стоимость [23, 24].

Уровнемерные устройства, относящиеся ко второй группе, как правило, состоят из нескольких механических и электромеханических элементов, имеющих подвижные части. По этой причине они требуют

ISSN 3030-3907

регулярного технического обслуживания. Особенно при измерении уровня вязких или химически агрессивных жидких сред измеряемая жидкость может попадать в электромеханические узлы уровнемера. Это, в свою очередь, приводит к возникновению коррозионных процессов в механических элементах. В результате требуется дополнительное время на очистку, проверку и повторную калибровку прибора [25, 26, 27]. Приборы третьей группы представляют собой электронные контактные уровнемеры, в конструкции которых отсутствуют подвижные части. Такие устройства также могут подвергаться воздействию жидкой рабочей среды, что приводит к образованию отложений или коррозии. Однако в связи с отсутствием подвижных механических узлов потребность в техническом обслуживании у них значительно ниже по сравнению с электромеханическими уровнемерами [28–30].

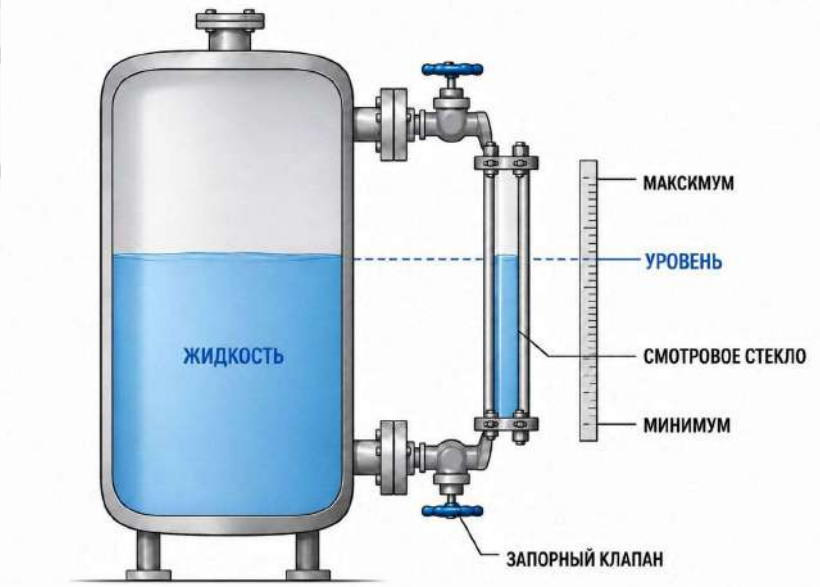
Приборы, входящие в последнюю группу, позволяют измерять уровень без непосредственного контакта с жидким продуктом. Отсутствие подвижных частей и прямого взаимодействия с измеряемой жидкой средой снижает требования к техническому обслуживанию до минимального уровня. Монтаж бесконтактных электронных уровнемеров также считается более удобным и простым по сравнению с другими средствами измерения уровня. Вместе с тем наличие пара или пены в измеряемой среде может оказывать влияние на точность измерения таких устройств [31–33].

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ЖИДКОСТЕЙ

1. Зонд или смотровое стекло

Методы прямого измерения уровня позволяют получать достаточно точные результаты и с их помощью можно определять количество жидкости [34, 35]. Эти методы и в настоящее время применяются на практике, поскольку оператор может непосредственно подойти к необходимым точкам измерения и выполнить расчётные операции [34]. При правильной геометрической форме резервуара вычисление объёма содержащейся в нём жидкости не вызывает затруднений [36]. Как показано на рис. 3, смотровое стекло обычно устанавливается вертикально на боковой части резервуара. Уровень жидкости наблюдается непосредственно через смотровое стекло [34, 35].

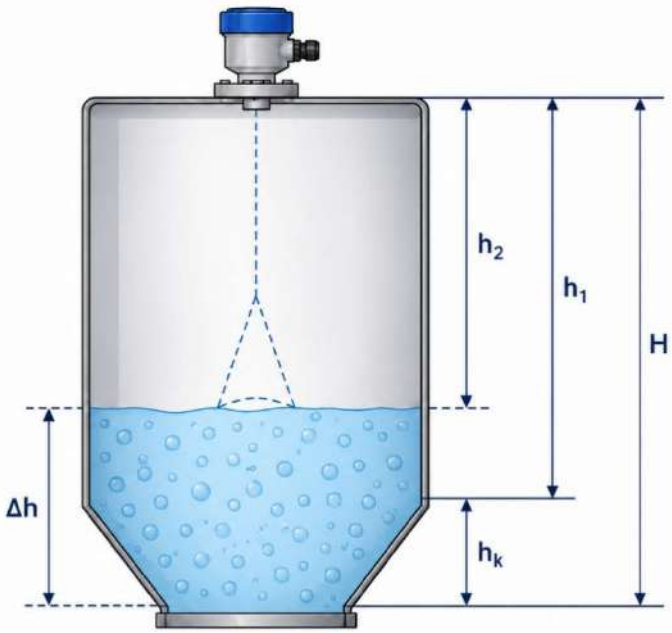
ISSN 3030-3907



(3)

Рис. 3. Трубчатое смотровое стекло для визуального контроля

Данный метод является одним из наиболее простых и применяется преимущественно в тех случаях, когда резервуар расположен в месте, удобном для визуального контроля оператором, а определение объёма жидкости с высокой точностью не требуется [4]. Его основной недостаток заключается в том, что после определённого периода эксплуатации стеклянная часть смотрового стекла мутнеет под воздействием растворённых химических веществ, содержащихся в конденсате. Поэтому стекло необходимо периодически очищать.



(4)

Рис. 4. Измерение уровня с помощью лотного уровнемера

ISSN 3030-3907

2. Лотный уровнемер

Лотные уровнемеры применяются в промышленной практике для определения уровня жидких продуктов и степени заполнения резервуаров и ёмкостей [37, 39]. Такие уровнемеры отличаются простотой конструкции, а их диапазон измерения в зависимости от модификации может достигать 40 м; точность измерения при этом может составлять от 1 до 10 см (рис. 4) [37].

Процесс измерения начинается с освобождения лота, предварительно удерживаемого в верхнем положении. Под действием собственного веса лот опускается вниз. В этот момент сигнальное устройство, контролирующее натяжение гибкой связи, приводит в действие счётный механизм. Счётное устройство, в свою очередь, фиксирует величину перемещения лота относительно его верхнего предельного положения на основе движения гибкой связи [38].

Когда лот достигает поверхности жидкого продукта, натяжение гибкой связи уменьшается, и сигнальное устройство останавливает счётное устройство. Одновременно оно передаёт команду подъёмному механизму, возвращающему лот в исходное положение [38, 39].

Показания, зафиксированные счётным устройством, позволяют определить текущий уровень жидкости. Перед выполнением следующего измерения показания счётного устройства необходимо привести к нулевому положению [37, 38].

Механические уровнемеры, работающие на основе чувствительных элементов, могут применяться для дискретного измерения уровня жидкости [39, 40]:

$$\Delta h = (H - h_2) = (h_1 - h_2) + h_k$$

где H — высота резервуара; h_1 — высота цилиндрической части резервуара; h_2 — показание уровнемера в определённом положении; Δh — значение уровня жидкости.

После определения уровня жидкого продукта можно достаточно точно рассчитать объём или массу продукта, находящегося в резервуаре [37, 40].

Важные особенности и преимущества лотных уровнемеров заключаются в возможности их применения для измерения уровня различных жидких сред, а также в простоте монтажа. При этом общее состояние среды внутри резервуара не оказывает существенного влияния на работу прибора [37, 40].

В качестве недостатка таких уровнемеров отмечается то, что волнообразование или колебания на поверхности жидкости могут влиять на точность измерения [39, 40].

3. Гидростатический метод измерения уровня

ISSN 3030-3907

Система гидростатического измерения уровня основана на учёте давления, создаваемого жидкостью, а также атмосферного давления, действующего на поверхность жидкости [9, 11, 41]. Она относится к системам косвенного измерения и считается одним из наиболее традиционных и давно применяемых методов определения уровня [12, 13]. Вместе с тем данный метод позволяет получать результаты измерения с высокой точностью [10, 42].

Гидростатическое давление столба жидкости прямо пропорционально его глубине, то есть высоте уровня поверхности жидкости [9, 11, 41]. Поскольку плотность жидкости изменяется в зависимости от температуры, для уточнения результатов измерения может применяться температурная компенсация [10, 42].

По сравнению со многими бесконтактными технологиями измерения уровня гидростатический датчик не ограничивается только оценкой текущей высоты поверхности жидкости, но также позволяет определять уровень по любой выбранной контрольной точке внутри резервуара [9, 41]. Такая контрольная точка может быть выбрана в любом месте между дном резервуара и поверхностью жидкости, поскольку гидростатические датчики уровня обычно устанавливаются ниже поверхности жидкости [11, 41].

Данный принцип измерения уровня применяется в открытых и герметичных сосудах, а также в промышленных резервуарах [11, 12, 42]. В общем случае гидростатическое давление столба жидкости определяется по следующей зависимости:

$$P = \rho g h,$$

где P — гидростатическое давление, Па; ρ — плотность жидкости, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; h — высота столба жидкости, м. В полностью герметичных резервуарах для оценки высоты уровня жидкости применяется метод дифференциального давления [10, 11, 42]. Такая система должна устанавливаться на одном уровне с минимальной высотной точкой резервуара [11, 41]. Это во многих случаях может затруднять монтаж или надёжное закрепление уровнемера [41].

Данный метод широко применяется благодаря высокой надёжности и относительной простоте установки, однако его эффективность зависит от типа жидкости, её плотности и условий эксплуатации резервуара [9, 10, 41, 42].

4. Лазерный метод измерения уровня

По своему принципу действия лазерный метод измерения уровня близок к радарной измерительной системе [24, 35, 43]. В данном методе лазерный луч направляется на поверхность жидкости в резервуаре, а

ISSN 3030-3907

отражённый сигнал принимается датчиком [24, 35, 43, 44]. Оценивается время распространения и возврата сигнала, в результате чего появляется возможность определить уровень жидкости внутри резервуара [24, 43, 47].

Лазерные измерительные технологии применяются в промышленности в различных условиях, поскольку они напрямую не зависят от воздействия высокой температуры или вакуума в зоне измерения [23, 34, 44, 47, 48]. Данный метод считается пригодным для жидких продуктов с низкой диэлектрической проницаемостью, жидких сред, поглощающих звук, и других подобных случаев [23, 35, 44, 48].

По сравнению с некоторыми другими бесконтактными методами измерения уровня импульсные лазерные устройства являются относительно более дорогостоящими [43, 46, 47, 48, 49]. Поскольку данная технология основана на принципе отражения света от поверхности среды, отличающейся оптическими свойствами, различные факторы, создающие световые помехи в рабочей среде, в том числе загрязнённость среды, могут существенно ухудшать метрологические характеристики прибора [5, 35, 43, 46, 49].

5. Ультразвуковой метод измерения уровня

Данный метод основан на принципе отражения звуковых волн от поверхности измеряемой среды. Время прохождения ультразвуковой волны от излучателя до поверхности жидкости и обратно к приёмнику является измерительным параметром, по которому определяется значение уровня.



(5)

Рис. 5. Измерение уровня ультразвуковым методом

При локации через слой жидкости время задержки отражённого сигнала относительно излучённого сигнала определяется по следующей формуле [14, 20, 50]

$$\tau = \frac{2h}{a} \quad (4)$$

ISSN 3030-3907

где h — высота уровня жидкости; a — скорость распространения звука в жидкой среде.

При локации через газовую среду время распространения ультразвуковых колебаний выражается следующей формулой (5) [51, 55]:

$$\tau = \frac{2(H-h)}{a} \quad (5)$$

где H — общая высота резервуара; h — высота уровня жидкости; a — скорость распространения звука в газовой среде.

Следует отметить, что скорость распространения ультразвуковых волн изменяется под воздействием температуры воздуха в среде их распространения [56]. Ультразвуковое поле, возникающее в жидкости, может приводить к заметному повышению температуры [15, 31, 55]. В сосудах обычных размеров такое повышение температуры во многих случаях может достигать нескольких градусов в минуту [3, 51].

Причиной образования тепла в данном процессе является поглощение звуковой энергии облучаемой жидкостью [15, 31, 55]. Количество тепла, выделяющегося в заданном слое жидкости, рассчитывается по формуле (6). Согласно данной формуле, мощность, поглощённая в слое толщиной x, выражается следующим образом [3, 31]:

$$j = j_o(1 - e^{\{-2\alpha x\}}) \quad (6)$$

В качестве примера можно отметить, что в тетрахлориде углерода при частоте 1 МГц, в слое толщиной 5 см и площади поперечного сечения 1 см² при мощности звука 1 Вт/см² поглощается мощность около 0,05 Вт [15].

В таблице 1 приведены данные о повышении температуры различных веществ при одинаковой площади поперечного сечения, равной 2 см², и воздействии ультразвукового поля в течение 10 секунд [3, 51, 56].

Кроме того, как скорость распространения ультразвука сильно зависит от температуры, так и при повышении давления воздуха она также возрастает [51, 57]. В таблице 2 отражена скорость распространения ультразвуковых волн в различных средах [16, 51].

ISSN 3030-3907

Таблица 1.

Повышение температуры при облучении ультразвуковым полем

1. ПОВЫШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

№	Вещество	Повышение температуры, °C (при 0°C)
1	Вода	2
2	Спирт	3,5
3	Глицерин	10
4	Парафиновое масло	10
5	Раствор желатина	1
6	Гель желатина	1
7	Стеариновая кислота	36
8	Воск	44

2. СКОРОСТЬ ЗВУКА В РАЗЛИЧНЫХ ГАЗАХ (ПРИ 0°C)

№	Газ	Скорость звука, м/с (при 0°C)
1	Воздух	331
2	Аммиак	415
3	Диоксид углерода	259
4	Этилен	317
5	Гелий	965
6	Хлороводород	206
7	Метан	430
8	Азот	334
9	Кислород	316
10	Диоксид серы	213

Основные преимущества ультразвуковых методов заключаются в сравнительно низкой стоимости и компактности прибора, малом времени, необходимом для измерения, возможности применения в загрязнённых жидких средах, а также в том, что результаты измерения практически не зависят от плотности контролируемой жидкости [19, 57, 58, 61].

К недостаткам относятся распространение излучения в виде конуса с большим углом раскрытия, возникновение погрешностей измерения из-за сигналов, отражённых от движущихся или неустойчивых препятствий, значительное затухание ультразвукового сигнала в среде, а также зависимость показаний уровнемера от состояния атмосферы и условий измерения [59, 60].

6. Радарный метод измерения уровня

Радарные датчики, в отличие от ультразвуковых датчиков, используют не звуковые волны, а микроволновое излучение [62, 63, 65]. Подобно ультразвуковым устройствам, радарные датчики уровня также не имеют непосредственного контакта с жидким продуктом [64, 66, 70]. Это позволяет применять их в агрессивных жидких средах и в сложных эксплуатационных условиях [67, 68, 72].

В ряде работ рассмотрены история развития радарных уровнемеров, а также основные принципы их работы [63, 65]. По сравнению с ультразвуковыми уровнемерами радарные датчики способны обеспечивать более высокую точность измерения, имеют меньшую мёртвую зону и могут работать в условиях высокого давления внутри резервуара [70, 71].

ISSN 3030-3907

Рабочая частота радарных уровнемеров, независимо от их типа, обычно изменяется в диапазоне от 5,8 до 26 ГГц; при этом стандартной частотой считается 10 ГГц [67, 69, 71]. Чем выше частота сигнала, тем уже диаграмма направленности луча и тем выше концентрация энергии излучения, в результате чего отражённый сигнал регистрируется более уверенно [67, 69, 73]. Поэтому высокочастотные уровнемеры позволяют измерять уровень жидких сред с низкой диэлектрической проницаемостью и слабой отражательной способностью [74, 76]. Кроме того, они удобны для применения в резервуарах, где имеются различные внутренние элементы оборудования, ограничивающие свободную зону, необходимую для работы радара [72, 75].

В работе представлены результаты численного моделирования, основанного на теории решения обратной задачи Штурма–Лиувилля, предложен алгоритм его реализации, а также показана возможность применения данного метода в интеллектуальных устройствах. Рассматриваемый метод измерения уровня использует частотно-модулированную непрерывную волну для устранения помех, возникающих в закрытых резервуарах [69, 73, 76]. Он позволяет измерять уровень различных жидких продуктов на расстоянии от 0 до 60 метров [66, 70, 78].

7. Радиометрическое измерение уровня

Радиометрический метод измерения уровня основан на сравнительно простой по конструкции, но высокоэффективной измерительной схеме [79–81]. При этом с помощью стержневого или точечного источника излучения формируется поле гамма-излучения, воздействующее на технологическую ёмкость или резервуар с жидкостью в пределах требуемого диапазона измерения [79, 82].

ISSN 3030-3907

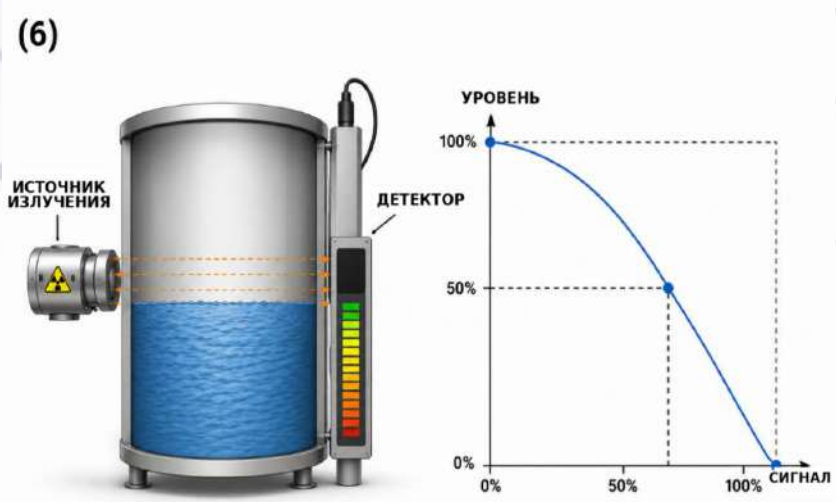


Рис. 6. Измерение уровня жидкости радиометрическим методом

При прохождении гамма-излучения через сосуд или резервуар его интенсивность ослабляется [79, 82]. По мере увеличения уровня жидкости в зоне измерения всё большая часть излучения поглощается жидкой средой [79, 80].

Определение уровня жидкости в радиоизотопном уровнемере основано на явлении поглощения γ-лучей при их прохождении через слой жидкости [79, 82]. Ослабление интенсивности гамма-излучения в жидкой среде выражается следующей экспоненциальной зависимостью [79]:

$$j_{-x} = j_0\, e^{\{-2\alpha x\}}$$

где J_x — интенсивность гамма-лучей после прохождения через слой жидкости толщиной x; J_0 — начальная интенсивность γ-излучения; μ — коэффициент ослабления γ-излучения, зависящий от природы жидкой среды и толщины слоя [79, 82]. Несмотря на высокую эффективность, данный метод измерения уровня обычно рассматривается как метод последнего выбора [79, 80]. Это связано с его высокой стоимостью, поэтому он в основном применяется в тех случаях, когда возможности использования других методов измерения ограничены [81, 83].

Сравнительный анализ методов и устройств измерения уровня

В промышленных условиях для измерения уровня в резервуарах, технологических ёмкостях и сосудах, предназначенных для хранения жидких продуктов, применяются различные методы [81, 82].

В таблице 3 приведён сравнительный анализ основных характеристик уровнемеров, применяемых в промышленности.

ISSN 3030-3907

Таблица 3.

Основные типы промышленных уровнемеров

Таблица 3. Основные типы промышленных уровнемеров

№	Наименование прибора и изготовитель	Измеряемая среда / продукт		Температура рабочей среды, °C	Рабочее давление среды, бар	Диапазон измерения уровня	Погрешность измерения уровня			Монтаж	Выходной сигнал		Типичные области применения
							Процент, %	При стандартных условиях измерения, %	HART		Выход 4–20 мА	Релейный выход	
1	Мультиуровень	+	+	−110 до 400 °C	1 до 500 бар	4	±2%	1000	–	+	+	–	все жидкости, интерфейс
2	Ультразвуковой Prosonic T	+	+	−40 до 80 °C	0,3 до 1,5 бар	15	0,5–1%	•	>1 мм	+	+	–	сухие сыпучие, светлые масла/углеводороды, химические реагенты
3	Ультразвуковой Prosonic U	+	+	−110 до 400 °C	0,3 до 3 бар	70	0,5–1%	•	>50 мм	+	+	–	сухие сыпучие, светлые масла/углеводороды, среды с конденсацией, пены
4	Радарный Levelflex	+	+	−110 до 400 °C	1 до 20 бар	20	1%	•	<20 мм	+	+	–	жидкости или сыпучие с неоднородными измерениями
5	Гидростатический Cerabar	–	+	−110 до 400 °C	−400 до 40 бар	0,1	1000	–	+	+	+	–	измерение уровня агрессивных жидкостей, сухих сыпучих, пены, жидких углеводородов, сыпучих материалов. Технология дифференциального давления
6	Гидростатический Deltabar	–	+	−110 до 400 °C	−400 до 30 бар	−0,05	1000	–	+	+	+	–	все жидкости в резервуарах. Глубина вакуумов
7	Гидростатический DeltaPilot	–	+	−110 до 400 °C	2 до 25 бар	0,1	1000	–	+	+	+	–	для общей промышленности с агрессивными средами, сыпучими средами. Удаленное измерение уровня
8	Кондуктометрический Proservo	–	+	−110 до 400 °C	16 до 38 бар	0,7	10	–	+	–	–	–	все проводящие среды в резервуарах
9	Радарный Micropilot m	–	+	−110 до 400 °C	1 до 20 бар	4 мм	•	–	+	–	–	–	сухие сыпучие, пыли, гранулы, светлые масла/углеводороды, химические реагенты
10	Радарный Micropilot s	+	+	−110 до 400 °C	1 до 35 бар	8 мм	•	–	+	–	–	–	измерение всех жидкостей, сыпучих, слабых пылей во взрывоопасных резервуарах
11	Микроволновый Sitradex	+	+	−110 до 400 °C	0,5 до 70 бар	1 мм 10 м гига	–	<20 мм	–	–	–	–	измерение концентрации частиц порошков и жидких сред
12	Радиоизотопный Gammapilot	+	+	−110 до 400 °C	–	8	2–5%	•	+	+	+	–	измерение абразивных и коррозийных сыпучих сред, пылей во взрывоопасных зонах

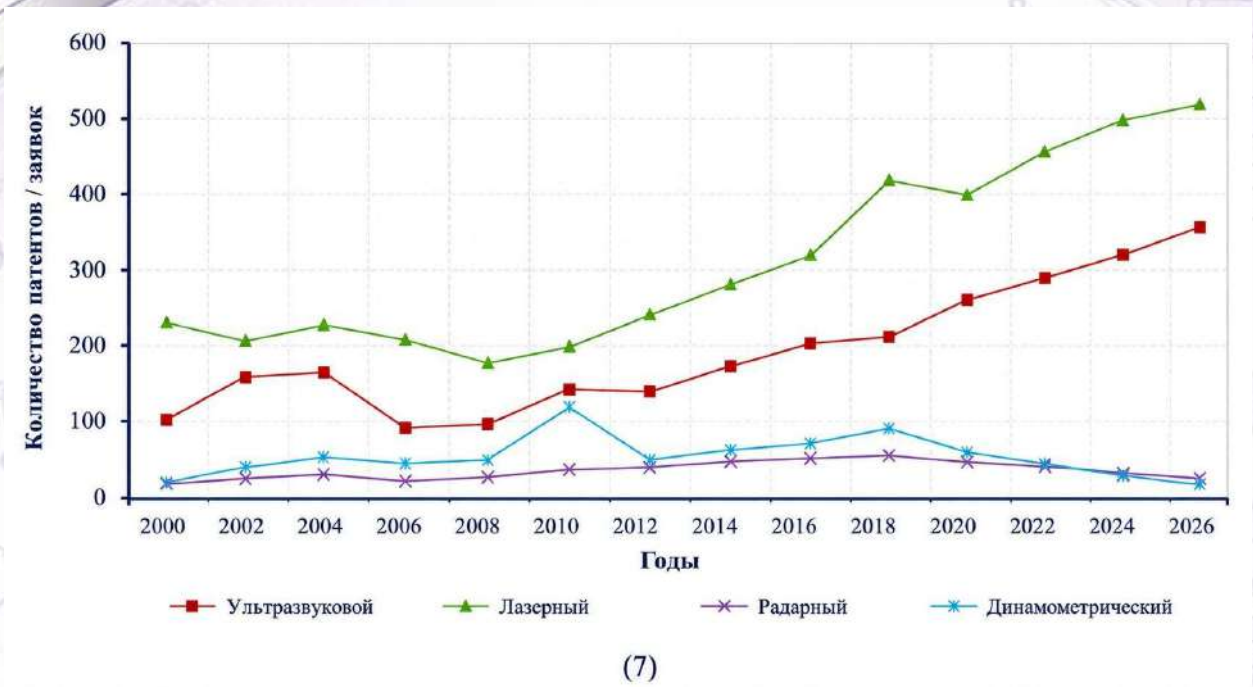
Примечание: + + — да, + – — иногда, – + — нет, – – — недоступно такой опции (по стандарту).

В отличие от большинства методов определения уровня, применяемых в течение последних пятнадцати лет, бесконтактные измерительные технологии рассматриваются как перспективное направление. Вместе с тем не существует единого универсального бесконтактного метода измерения уровня, который был бы одинаково пригоден для любой производственной задачи и любых эксплуатационных условий. Каждая бесконтактная технология измерения обладает собственными техническими и метрологическими особенностями, благодаря которым она может проявляться либо как удобное, либо как ограниченное решение для конкретной практической задачи.

Поэтому при выборе бесконтактной технологии измерения уровня необходимо учитывать не только принцип её действия, но и метрологические показатели, а также область применения. Такой подход служит важной основой для выбора оптимального принципа измерения в конкретных рабочих условиях. В современных промышленных отраслях к наиболее широко применяемым бесконтактным устройствам измерения уровня относятся лазерные, ультразвуковые, радарные и радиометрические приборы (рис. 7).

При выборе бесконтактной измерительной технологии основное внимание должно быть уделено свойствам жидкого продукта, метрологическим требованиям для заданной области применения прибора, а также конструктивным особенностям резервуара.

ISSN 3030-3907



(7)

Практическое применение каждого уровнемера во многом зависит от таких показателей жидкости, как температура, давление и вязкость. К другим свойствам среды, которые необходимо учитывать при решении конкретных технических задач, относятся: движение жидкости внутри резервуара; интенсивное испарение жидкого продукта; наличие взвешенных твёрдых частиц; пенообразование; резкое изменение плотности среды; мутность и другие факторы.

Несмотря на многообразие методов, каждый из них не всегда подходит для любых рабочих условий или различных жидких сред. Перед выбором системы измерения уровня для конкретного случая целесообразно начать с анализа технологического процесса и определения необходимых исходных данных:

Количество контролируемых уровней. Измерение уровня может выполняться в непрерывном режиме, то есть такое измерение не ограничивается одной конкретной точкой. Вместе с тем степень заполнения резервуара выражает фактический объём измеряемого жидкого продукта в процентах относительно общего объёма резервуара, принятого за 100%.

Измеряемая среда. Измеряемая жидкая среда может быть агрессивной, вязкой, пенящейся, испаряющейся или мутной. В отдельных случаях в составе жидкости могут присутствовать взвешенные твёрдые частицы, эмульсии, суспензии или смеси, образующие осадок. Кроме того, учитываются химическая природа жидкого продукта — коррозионная активность, кислотность, щёлочность или летучесть, диэлектрическая проницаемость в месте применения, влияние шумов и движение оборудования.

ISSN 3030-3907

Тип ёмкости. Форма конструкции, материал сосуда, а также его расположение и возможность доступа к нему являются важными факторами при выборе измерительной системы и способа её установки.

Точность измерения. Когда требуется высокая точность измерения, применяются многие сложные технологии; это относится только к непрерывным измерениям. В зависимости от размера резервуара или технологической ёмкости погрешность измерения может составлять менее ±1%, однако достижение такой точности требует значительных затрат. Наиболее важным является определение того, какая именно точность необходима для данного конкретного случая применения.

Надёжность средств измерения. Во многих случаях надёжность измерительных средств и систем управления информацией определяет надёжность всего производственного процесса. Без знания достоверных значений параметров технологического объекта невозможно управлять процессом или агрегатом. Поэтому применение точных и надёжных устройств позволяет снизить производственные затраты и обеспечить требуемое качество управления рабочим процессом на предприятии [1–2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В настоящее время развитие приборостроения направлено на создание более точных, надёжных и адаптивных средств измерения уровня жидких продуктов в промышленных ёмкостях. Данным направлением занимаются ведущие мировые производители контрольно-измерительных приборов, включая Siemens, Endress+Hauser, ABB, Vega, Emerson, Yokogawa и другие компании.

Многообразие типов приборов измерения уровня затрудняет выбор устройства, наиболее подходящего для конкретного технологического процесса. Несмотря на то что большая часть существующих методов измерения уровня может применяться в различных производственных процессах, единого универсального уровнемера, пригодного для всех эксплуатационных условий, не существует. Поэтому определение основных требований технологического процесса, оценка условий измерения и правильная постановка ключевых вопросов позволяют сузить область выбора и определить уровнемер, наиболее эффективно работающий в конкретных условиях.

Интенсивное развитие средств измерения привело к широкому внедрению в практику интеллектуальных датчиков, управляемых на основе микропроцессоров. Микропроцессор, входящий в состав интеллектуальных устройств, обеспечивает возможность программной обработки сигналов, анализа данных и применения соответствующих алгоритмов в процессе

ISSN 3030-3907

измерения. Таким образом, выбор метода измерения уровня жидких продуктов должен осуществляться с учётом свойств контролируемой среды, конструкции ёмкости, требуемой точности, условий эксплуатации и возможностей технического обслуживания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Johnson, C.D. Process Control Instrumentation Technology. — 8th Edition. — England: Pearson Education Limited, 2014. — P. 1–31. — ISBN 978-1-292-02601.
2. Bo‘ronov Bobirmirzo Alisher o‘g‘li. “Suyuqlik sathini o‘lchash parametrlarining tahlili va zamonaviy usullari” // Academic Research in Modern Science International Scientific-Online Conference. — 2025. — P. 152–157.
3. Yuriy P. Kondratenko, Oleksiy V. Kozlov, Andriy M. Topalov, Oleksandr S. Gerasin. “Computerized System for Remote Level Control with Discrete Self-Testing” // Advances in Intelligent Systems and Computing. — 2017.
4. Prashant Pandey, Rajan Mishra, R.K. Chauhan. “IoT-Enabled Liquid Level Measurement and Characterization Using Differential Pressure Sensor Method” // Clean – Soil, Air, Water. — 2025. — Vol. 53, Issue 7. — Wiley.
5. Nodirbek Rustambekovich Yusupbekov, Azamat Alijonovich Yusupov, Bobir Alisher ogli Boronov. “Improving the Accuracy of Measuring the Volume and Mass of Liquid Product in Horizontal Cylindrical Tanks” // Chemical Technology, Control and Management. — 2021. — Vol. 2021, No. 2 (98). — P. 33–40.
6. Mateus Rogienfisz, Laura Silva de Assis, Felipe da Rocha Henriques. “Liquid Monitoring System in Industrial Tanks with Ultrasonic Sensor” // Sociedade Brasileira de Telecomunicações Proceedings. — 2017.
7. Renwang Ge, Di Zhang, Renyuan Tong, Qingwen Li. “Non-contact sealed vessel liquid level measurement and device design based on ultrasonic principle” // International Conference on Modeling, Simulation and Process Control (ICMSP). — 2022. — P. 120–125.
8. Shenoy R., Kumar A., Nair P. и др. “An In-Depth Analysis of Liquid Level Measurement Techniques and Performance Evaluation Using Computational Fluid Dynamics” // Journal of Sensors. — 2025. — Wiley.
9. “Design and Development of Submersible Hydrostatic Level Sensor Using a GMR Sensor” // Measurement. — 2023. — Vol. 206. — Article 112310.
10. Esmaili P., Cavedo F., Norgia M. “Characterization of Pressure Sensor for Liquid-Level Measurement in Sloshing Condition” // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. — 2020. — Vol. 69, No. 7. — P. 4379–4386.
12.Smith J.O., Montrose R.C., Barth S. Closed tank fill level sensor: patent US20210310848A1, МПК G01F23/14, G01F23/18 / Independent Technologies LLC. — Application No. 17/349551; filed 16.06.2021; published 07.10.2021.

ISSN 3030-3907

13.Brackett A.W., Durham M.O., Perkins L.K., Thoman G.E. Tank gauging apparatus and method: patent US5315867A, Int. Cl. G01F23/00 / Emerson Electric Co. — Filed 12.05.1992; patented 31.05.1994. — 12 p.
14.Takacs G.W. Precise Volume Fluid Dispenser: patent US5568882A, Int. Cl. B67D5/08 / ABC Techcorp. — Appl. No. 08/383,445; filed 03.02.1995; patented 29.10.1996. — 11 p. — P. 1–10.
15.Gao W., Liu W., Hu Y., Wang J. “Study of Ultrasonic Near-Field Region in Ultrasonic Liquid-Level Monitoring System” // Micromachines. — 2020. — Vol. 11, No. 8. — Article 763.
16.Mukherjee D., Sen N., Singh K.K., Saha Sh., Mukhopadhyay S., Shenoy K.T., Marathe P.P. “Ultrasonic Method for Online Tracking of Interface and Dispersion Band in Gravity Settlers” // Industrial & Engineering Chemistry Research. — 2020.
17.Abdullayeva D.A., Bozorov E.O., Okhunboboyeva Ch.Z., Abduganiyev A.A., Azizova N.Sh. “Monitoring And Measuring The Level Of Water Objects By the Ultrasonic Method” // Solid State Technology. — 2020. — Vol. 63, Issue 5. — P. 5591–5597.
18.Escandón-Panchana P., Morante-Carballo F., Herrera-Franco G., Rodríguez H., Carvajal F. “Fluid Level Measurement System in Oil Storage. Python, Lab-Based Scale” // Mathematical Modelling of Engineering Problems. — 2022. — Vol. 9, No. 3. — P. 787–795.
19.Ambrozinski L., Lisowski M., Stepinski T., Uhl T. “Permanently Installed Guided-waves Based Liquid Level Sensors for Hermetically Sealed Tanks” // 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT). — 2014. — Prague, Czech Republic.
20.Sánchez-de-le-Lleve D. “Non-Contact Liquid Level Measurement Using the Talbot Effect and Adaptive Photodetectors” // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. — 2024. — Vol. 27. — P. 48–52.
21.Komatsu Y., Nobeshima T. “Flange-type Liquid-Level Sensor Based on Laser Light Reflection” // Sensors International. — 2023. — Vol. 4. — Article 100230.
22.Artan M., Soydemir M.U., Şahin S. “ARM Based Hybrid Measurement System Design for Liquid Level Measurement with High Accuracy under Vibrating Case” // European Journal of Science and Technology. — 2020. — Special Issue. — P. 381–388.
23.Мастепаненко М.А. Информационно-измерительная система непрерывного контроля уровня топлива в емкостях: диссертация кандидата технических наук: 05.11.16 — Информационно-измерительные и управляющие системы / М.А. Мастепаненко. — Ставрополь, 2014. — 223 с. — С. 1–20.

ISSN 3030-3907

24.Rodríguez-Montero P., Sánchez-de-le-Lleve D. “Non-Contact Liquid Level Measurement Using the Talbot Effect and Adaptive Photodetectors” // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. — 2024. — Vol. 27. — P. 48–52.
25.María L. Pelayo-Fernández, José L. Arce-Diego, D. Pereda-Cubián, O. Ormachea, O.G. Romanov, A.L. Tolstik. “Liquid-level Sensor Based in Laser Feedback Interferometry for Oil Tanks Applications” // Proceedings of SPIE. — 2006. — Vol. 6180.
26.Juan Carlos Martínez Espinosa, Juan de Dios Ortiz Alvarado, Fidel Córdoba Valdes, Marcos Alberto Rodriguez Martinez, Marcos Leonardo Fuentes Avila, Rafael Guzmán Cabrera. “Volume Measurement System Based on Hall Effect Sensors Circularly Coupled and Arranged in a Quadrature Shape” // Computación y Sistemas. — 2021. — Vol. 25, No. 2. — P. 417–422.
27.“Understanding Magnetostrictive Level Technology Through the Features and Benefits of ABB’s LMT Series”. — ABB technical material.
28.“Research on magnetostrictive liquid level gauge for water level measurement of steam generator”. — Научная статья, 2024.
29.Toth Ferencz Nandor. A capacitive sensor for water level measurement in an oil tank: patent EP1072870A1, МПК G01F23/26 / Enraf B.V. (NL). — Application No. 00202580.7; filed 18.07.2000; published 31.01.2001. — 11 p.
30.Brajesh Kumar, G. Rajita, Nirupama Mandal. “A Review on Capacitive-Type Sensor for Measurement of Height of Liquid Level” // Measurement and Control. — 2014. — Vol. 47, No. 7. — P. 219–224.
31.M. Neumayer, H. Zangl. “Electrical Capacitance Tomography for Level Measurements of Separated Liquid Stacks” // SENSOR+TEST Conferences 2011 Proceedings. — Graz University of Technology, Austria. — 2011. — P. 433–438.
32.Yiyang Tian, Jinshui Qiu, Boyun Liu. “Measuring Halon Level Based on the Model of Residual Ultrasonic Waves in Container's Wall” // Proceedings of the 2012 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2012). — Atlantis Press, 2012. — P. 850–852.
33.Arunkumar Heddallikar, Raymond Pinto, Avik Bhattacharya, Y.S. Rao, Gulab Singh. “Precision Level Measurement using VNA based Radar Interferometry” // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). — 2023. — P. 1–4.
34.Baofeng Jia. “Application of the Improved Radar Level Gauge in Level Measurement of Liquid Tanks” // Industrial Instrumentation and Automation Equipment. — 2017.
35.Dr. S. Venkateswara Rao. “Architectural and Operational Aspects of A U-Shaped Solid Glass Rod Probe Multimode Fiber Optic Analog Liquid Level

ISSN 3030-3907

Sensor" // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). — 2017. — Vol. 6, Issue 11. — P. 47–50.
36.Kouji Suemori, Yuichiro Komatsu, Taiki Nobeshima. "Flange-type Liquid-Level Sensor Based on Laser Light Reflection" // Sensors International. — 2023. — Vol. 4. — Article 100230.
37.Rodrigo T. Bento, Roger W. O. Silva, Lucas A. Dias, André Ferrus Filho, Antônio J. C. Pitta. "Design, Development and Application of a Real-Time Capacitive Sensor for Automatically Measuring Liquid Level" // SN Applied Sciences. — 2019. — Vol. 1. — P. 734.
38.Chong-yong Su, Shu-ren Yang. "Application of Optical Fiber Sensing Technology in Oil Tank Level Measurement" // Advances in Engineering Research. — 2017. — Vol. 136. — Atlantis Press, China. — P. 149–152.
39.Изосин В.А. Дозатор для жидкого реагента: патент RU2023117061A, МПК B01F23/40, E21B37/06 / ООО Торговый Дом «Магнитогорский завод химических реагентов». — Заявка №2023117061; заявл. 19.08.2022; опубл. 19.02.2024. — 2 с.
40.Atalay Ö., Belli B., Sezgin O. "Improving level measurement techniques and measurement accuracy in vehicle fuel tanks" // International Journal of Automotive Engineering and Technologies. — 2022. — Vol. 11, No. 3. — P. 110–116.
41.Souza M., Carvalho E., Canuto J., Freire R., Brusamarello V. "Displacer-Type Liquid Level Sensor with Liquid Density Auto-Compensation" // Journal of Integrated Circuits and Systems. — 2020. — Vol. 15, No. 3. — P. 1–5.
42.Lowe J.W. Liquid Level Sensor: patent US6666085B1, Int. Cl. G01F23/00 / Jerry Watson Lowe. — Appl. No. 10/233,097; filed 28.08.2002; patented 23.12.2003. — 8 p. — P. 1–6.
43.Калашников А.А. Методы и средства повышения метрологической достоверности контроля уровня в технологических емкостях АЭС: диссертация кандидата технических наук: 05.13.05 — Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления / А.А. Калашников. — Москва, 2017. — 161 с. — С. 1–120.
44.Melchionni D., Norgia M. "Optical system for liquid level measurements" // Review of Scientific Instruments. — 2014. — Vol. 85, No. 7.
45.Lazaro R.C., Frizera A., Marques C., Leal-Junior A.G. "Optical Fiber Sensors Systems in Oil Tanks: Toward Structural Health Monitoring and Liquid-Level Estimation" // IEEE Sensors Journal. — 2023. — Vol. 23. — P. 10437–10443.
46.Dejband E., Manie Y.C., Deng Y.-J., Bitew M.A., Tan T.-H., Peng P.-C. "High Accuracy and Cost-Effective Fiber Optic Liquid Level Sensing System Based on Deep Neural Network" // Sensors. — 2023. — Vol. 23, No. 4. — Article 2360.

ISSN 3030-3907

47.Guo H., Zhang Y., Li Z. и др. “The liquid level monitoring with sub-millimeter resolution by discrete wavelength sampling method” // Sensors and Actuators A: Physical. — 2018. — Vol. 282. — P. 237–242.
48.Kim H., Balagopal B., Kerrigan S., Garcia N., Chow M.-Y., Bourham M., Fang T., Jiang X. “Noninvasive Liquid Level Sensing with Laser Generated Ultrasonic Waves” // SSRN Electronic Journal. — 2022. — North Carolina State University, USA.
49.Yin G., Yang P., Xiao H. и др. “High-Resolution and Large-Sensing-Range Liquid-Level Sensor Based on Optical Frequency Domain Reflectometry and No-Core Fiber” // Sensors. — 2022. — Vol. 22, No. 12. — Article 4480.
50.“Measuring Fluid Level through a Recalibrating-Free Hough Transform Methodology” // Научная статья, посвящённая бесконтактному определению уровня жидкости на основе компьютерного зрения, преобразования Хафа и методов обработки изображений.
51.Юсупова Феруза, Нематёнов Ж.С. “ZAMONAVIY MIKROKONTROLLERLAR, ARDUINO VA ULTRATOVUSHLI SATH DATCHIGI YORDAMIDA SUYUQLIK SATHINI O‘LCHASH TIZIMI” // Partner Conferences of the International Scientific Journal Research Focus. — 2025. — Т. 1, № 1. — С. 696–701.
52.Подчашинський Ю.О., Іщенко О.С. “Використання ультразвукових датчиків для вимірювання рівня та густини рідини в комп’ютеризованих інформаційно-вимірювальних системах” // Tehnìčna ìnženerìâ. — 2025. — № 1 (95). — P. 389–394.
53.Vellela S.S., Babu B.V., Mahendra D., Bharat Y. “IoT-Based Tank Water Monitoring Systems: Enhancing Efficiency and Sustainability” // International Journal for Modern Trends in Science and Technology. — 2024. — Vol. 10, Issue 02. — P. 291–298.
54.Iradukunda Y. “Smart Tanks Juice Level Monitoring System: A Case Study of Raha Beverages Company Limited Arusha, Tanzania” // Dissertation. — 2023.
55.Altin S., Bulut F. “Bluetooth Bağlantılı Ultrasonik Sıvı Seviyesi Ölçer Tasarımı ve Endüstriyel Proses Uygulamaları” // Journal of Engineering and Natural Sciences. — 2016. — Vol. 4, No. 1. — P. 19–21.
56.Saeed M. “Measurement System to Monitor Interface Level Between Oil and Water in a Rapidly Rotating System” // Master of Science Thesis MMK 2013:16 MDA 447. — KTH Industrial Engineering and Management, Sweden. — 2013.
57.Liu B., Xiao Y., Wang L., Wang W., Hu J. “A non-reference detection method of the external ultrasonic liquid level switch using the PZT” // Journal of Measurements in Engineering. — 2023. — Vol. 11, Issue 2. — P. 97–110.

ISSN 3030-3907

58.Bello M.I., Gana S.M., Faruk M.I., Umar M.J. “Autonomous Ultrasonic Based Water Level Detection and Control System” // Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH). — 2018. — Vol. 37, No. 2. — P. 508–513.
59.Jan F., Min-Allah N., Saeed S., Iqbal S.Z., Ahmed R. “IoT-Based Solutions to Monitor Water Level, Leakage, and Motor Control for Smart Water Tanks” // Water. — 2022. — Vol. 14. — Article 309.
60.Workneh H., Raptis I.A. “A Comprehensive Experimental Liquid-Level Control System for Advancing Fault Diagnosis Research Innovation: Data, Models, and Procedures” // Advanced Control for Applications. — 2025. — Vol. 7, Issue 2. — Wiley.
61.Olejnik P., Awrejcewicz J. “Intelligent Mechatronics in the Measurement, Identification, and Control of Water Level Systems: A Review and Experiment” // Обзорная научная статья, посвящённая сравнительному анализу ультразвуковых, ёмкостных, оптических и гидростатических датчиков в системах измерения, идентификации и управления уровнем воды.
62.Newton G.F., Aondona T.I., Chile C.A. “Design and Implementation of a Wireless Fluid Level Display System Using Ultrasonic Sensing Technique” // Journal of Engineering Research and Reports. — 2020. — Vol. 14, No. 1. — P. 30–40.
63.Deng H., Chen H. “RadarEye: Robust Liquid Level Tracking Using mmWave Radar in Robotic Pouring” // arXiv preprint. — 2026. — arXiv:2602.10417.
64.Heddallikar A., Pinto R., Bhattacharya A., Rao Y.S., Singh G. “Precision Level Measurement using VNA based Radar Interferometry” // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). — 2023. — P. 1–4.
65.Jia B. “Application of the Improved Radar Level Gauge in Level Measurement of Liquid Tanks” // Industrial Instrumentation and Automation Equipment. — 2017.
66.Fusco L., Grassini S., Corbellini S., Parvis M. “Extending Industrial Applicability of TDR Liquid Level Monitoring through Flexible Probes” // IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). — 2013. — IEEE, USA.
67.Jia B. “Application of the Improved Radar Level Gauge in Level Measurement of Liquid Tanks” // Automation Application. — 2017.
68.Nagy L. “Microstrip Antenna Development for Radar Sensor” // Sensors. — 2023. — Vol. 23. — Article 909. — MDPI, Switzerland.
69.Nagle R.K., Hines J.B., Kurfess T.R. “Guided Wave Tank Level Sensor” // IEEE Conference Publication. — 2019. — IEEE, USA.

ISSN 3030-3907

70.Ma Y., Zhang Z., Fang Y. и др. “Design of 120 GHz FMCW Radar Liquid Level Measurement System” // IEEE Conference Publication. — 2023. — IEEE, USA.
71.Deng Zhi-guang, Zhu Bi-wei, Wu Qian, Wang Xue-mei, Xu Si-jie, Zhu Jia-liang, Dong Chen-long, Sun Yong-sheng. “Research on Application of High Temperature and High Pressure Radar Liquid Level Measurement in Nuclear Power Plant” // New Energy Power Generation Automation and Intelligent Technology. — Singapore: Springer, 2023. — P. 57–72.
72.Ehrentraut H., Jäger M., Dötzer W. “Silo and Tank Vision: Applications, Challenges, and Technical Solutions for Radar Measurement of Liquids and Bulk Solids in Tanks and Silos” // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. — 2017. — Vol. 20, No. 4. — P. 18–27.
73.Grose D. Tanker truck fluid level measurement systems and methods: patent US20210255020A1, МПК G01F22/00, G01F23/284, B67D7/22 / Dean Grose. — Application No. 17/024,673; filed 17.09.2020; published 19.08.2021. — 13 p.
74.Turner J. Tank Multi-Level Measurement Using Threaded Pie and Millimeter Wave Radar: patent US11555732B2, Int. Cl. G01F23/284, G01S13/08 / Laser Tech LLC. — Appl. No. 16/829,019; filed 25.03.2020; patented 17.01.2023. — 23 p.
75.Baker G.W., Jiang T., Luna J.A., Flower M., Naccarato L.R., Bowen M.D. Device, System and Method for Guided Wave Radar Measurement: patent US20230077375A1, Int. Cl. G01F23/282 / Rochester Sensors, LLC. — Appl. No. 17/873,059; filed 25.07.2022; published 16.03.2023. — 20 p.
76.Bergeron C.G., Lawrence R.R., Clark J.J., Hite D.R. Redundant Level Measuring System: patent US11391616B2, Int. Cl. G01F23/30, G01F23/296, G01F25/20 / Magnetrol International, Incorporated. — Appl. No. 16/999,333; filed 21.08.2020; patented 19.07.2022. — 12 p.
77.Wegner T.E., Gebhardt S., Del Galdo G. “Fill level measurement of low-permittivity material using an M-sequence UWB radar” // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. — 2023. — Vol. 15. — P. 1–9.
78.Yahya S.I. “A Multi-Level Storage Tank Gauging And Monitoring System Using A Nanosecond Pulse” // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). — 2013. — Vol. 5, No. 1. — P. 17–24.
79.Van Der Pol R. Distance measuring device especially for measuring the fill level in industrial tanks: patent EP0458678A1, Int. Cl. G01F23/28. — Published 27.11.1991. — 9 p.
80.Юсупбеков Н.Р., Юсупов А.А. “Review and Comparative Analysis of Modern Devices For Level Gauging In Checking System And Industrial Processing

ISSN 3030-3907

Control" // International Journal of Advanced Science and Technology. — 2020. — Vol. 29, No. 9s. — P. 5370–5380.
81.Restivo F., Silva T., Santos B., Lopes G. "Water level sensing: State of the art review and performance evaluation of a low-cost measurement system" // Measurement. — 2016. — Vol. 89. — P. 204–214.
82.Shenoy R., Kumar A., Nair P. и др. "An In-Depth Analysis of Liquid Level Measurement Techniques and Performance Evaluation Using Computational Fluid Dynamics" // Journal of Sensors. — 2025. — Wiley, USA.
83.Dunn W.C. Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control. — New York: McGraw-Hill, 2005. — 337 p. — ISBN 0-07-145735-6. — P. 1–27, 85–97, 201–216.
84.Primo J. Instrumentation & Process Control Automation Guidebook – Part 3. — PDH Online Course E444. — Fairfax: PDH Online, 2020. — 91 p. — P. 1–27.
85.Level measurement [Electronic resource]. — Available at: http://www.kipinfo.ru.
86.Questions on the level gauges [Electronic resource]. — Available at: http://www.rospribor.com.
87.Technical library [Electronic resource]. — Available at: http://lib.qrz.ru/book.
88.Zhdankin V.K. Level measurement by directional electromagnetic radiation. — Moscow, 2004.

ISSN 3030-3907