МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ЖИДКИХ СРЕД

Матякубова Парогат Майлиевна
Заведующая кафедрой "Метрология, техническое регулирование, стандартизация и сертификация" ТГТУ, д.т.н., профессор,
E-mail: tgtu_mss@rambler.ru
Саидорипов Лазизжон Фуркатович
Первый заместитель директора Агентства по техническому регулированию Узбекистана,
E-mail: uzst@standart.uz

Annotatsiya. Maqolada zamonaviy optik-elektron o‘lchash vositalaridan foydalanish asosida suyuq muhitlar sathini o‘lchashning ishonchliligi va aniqligini oshirish masalalari ko‘rib chiqilgan. O‘lchash signalini olish, o‘zgartirish va qayta ishlash bosqichlarida shakllanadigan o‘lchash xatoligining asosiy tarkibiy qismlari strukturaviy jihatdan tahlil qilingan. Metodik va instrumental xatoliklar, shuningdek, o‘lchash tizimining ekspluatatsiya sharoitlari bilan bog‘liq qo‘shimcha xatoliklar ko‘rib chiqilgan. Suyuqlik sathining holatini kontaktsiz aniqlashga asoslangan lazer va lazer-akustik sathni o‘lchash usullarini tadqiq etishga alohida e’tibor qaratilgan. Harorat, bosim, texnologik uskunalarning tebranishi, optik elementlarning ifloslanishi, bug‘ va aerozollarning mavjudligi, shuningdek, suyuqlik yuzasining aks ettirish qobiliyatining o‘zgarishi o‘lchash tizimining metrologik xususiyatlariga ta’siri tahlil qilingan. Qayd etilayotgan signal kontrastini oshirish maqsadida lazer nurlanishining parazit aks etishlarini istisno qiluvchi o‘lchash idishining ichki yuzalariga mat qoplama qo‘llash imkoniyati ko‘rib chiqilgan. Lazerli masofa o‘lchagich, pezoelektrik nurlatgich, mikrokontroller va ossillografdan foydalanilgan lazer-akustik sath o‘lchagichning eksperimental tadqiqot tuzilmasi keltirilgan. Olingan natijalar o‘lchash tizimining asosiy funksional elementlariga qo‘yiladigan talablarni asoslash hamda suyuq muhitlar sathini kontaktsiz o‘lchashning aniqligi va ishonchliligini oshirish yo‘nalishlarini belgilash imkonini beradi.

Kalit so‘zlar: metrologik ta’minot, sathni o‘lchash, suyuq muhitlar, lazerli sath o‘lchagich, lazer-akustik sath o‘lchagich, optik-elektron o‘lchash vositalari, o‘lchash xatoligi, o‘lchash noaniqligi, parazit aks etish, pezoelektrik nurlatgich, fotopriyomnik, eksperimental stend.

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы повышения достоверности и точности измерения уровня жидких сред с применением современных оптико-электронных средств измерений. Проведён структурный анализ

ISSN 3030-3907

основных составляющих погрешности измерения, формирующихся на этапах получения, преобразования и обработки измерительного сигнала. Рассмотрены методические и инструментальные составляющие погрешности, а также дополнительные погрешности, обусловленные условиями эксплуатации измерительной системы. Особое внимание уделено исследованию лазерных и лазерно-акустических методов измерения уровня, основанных на бесконтактном определении положения поверхности жидкости. Проанализировано влияние температуры, давления, вибрации технологического оборудования, загрязнения оптических элементов, наличия паров и аэрозолей, а также изменения отражательной способности поверхности жидкости на метрологические характеристики измерительной системы. Для повышения контрастности регистрируемого сигнала рассмотрена возможность применения матового покрытия внутренних поверхностей измерительной ёмкости, исключающего паразитные отражения лазерного излучения. Представлена структура экспериментального исследования лазерно-акустического уровнемера с использованием лазерного дальномера, пьезоизлучателя, микроконтроллера и осциллографа. Полученные результаты позволяют обосновать требования к основным функциональным элементам измерительной системы и определить направления повышения точности и надёжности бесконтактного измерения уровня жидких сред.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, измерение уровня, жидкие среды, лазерный уровнемер, лазерно-акустический уровнемер, оптико-электронные средства измерений, погрешность измерения, неопределённость измерений, паразитное отражение, пьезоизлучатель, фотоприёмник, экспериментальный стенд.

Abstract. The article considers the issues of improving the accuracy and reliability of liquid-level measurements using modern optoelectronic measuring instruments. A structural analysis of the main components of measurement error formed during the acquisition, conversion, and processing of the measurement signal is carried out. Methodological and instrumental error components, as well as additional errors caused by the operating conditions of the measuring system, are considered. Particular attention is paid to laser and laser-acoustic methods of liquid-level measurement based on non-contact determination of the liquid surface position. The influence of temperature, pressure, vibration of technological equipment, contamination of optical elements, the presence of vapors and aerosols, and changes in the reflective properties of the liquid surface on the metrological characteristics of the measuring system is analyzed. To

ISSN 3030-3907

improve the contrast of the recorded signal, the use of a matte coating on the internal surfaces of the measuring vessel is considered to eliminate parasitic reflections of laser radiation. The structure of an experimental study of a laser-acoustic level gauge using a laser rangefinder, piezoelectric transducer, microcontroller, and oscilloscope is presented. The results make it possible to substantiate requirements for the main functional elements of the measuring system and identify ways to improve the accuracy and reliability of non-contact liquid-level measurements.

Keywords: metrological assurance, level measurement, liquid media, laser level gauge, laser-acoustic level gauge, optoelectronic measuring instruments, measurement error, measurement uncertainty, parasitic reflection, piezoelectric transducer, photodetector, experimental setup.

Введение.

Измерение уровня жидких сред является одной из актуальных задач промышленной метрологии, поскольку достоверность получаемой информации непосредственно влияет на безопасность технологических процессов, эффективность эксплуатации оборудования и качество управления производственными объектами. Особую значимость данная задача приобретает при контроле жидкостей в ёмкостях и технологических аппаратах, где традиционные контактные методы измерения могут быть ограничены условиями эксплуатации, включая повышенную температуру и давление, наличие паров и аэрозолей, агрессивность среды, перемешивание и изменение состояния поверхности жидкости. Перспективным направлением развития средств измерения уровня является применение бесконтактных оптико-электронных методов, в том числе лазерных и лазерно-акустических технологий. Использование лазерного излучения позволяет осуществлять дистанционное определение положения поверхности жидкости без непосредственного контакта чувствительного элемента с измеряемой средой. При этом сочетание лазерного дальномера с акустическим воздействием открывает дополнительные возможности для повышения информативности измерительного процесса и повышения устойчивости измерений при изменении характеристик поверхности жидкости.

Вместе с тем достижение высокой точности при использовании оптико-электронных средств измерения связано с необходимостью учёта значительного числа факторов, влияющих на формирование конечного результата. К ним относятся характеристики лазерного источника и

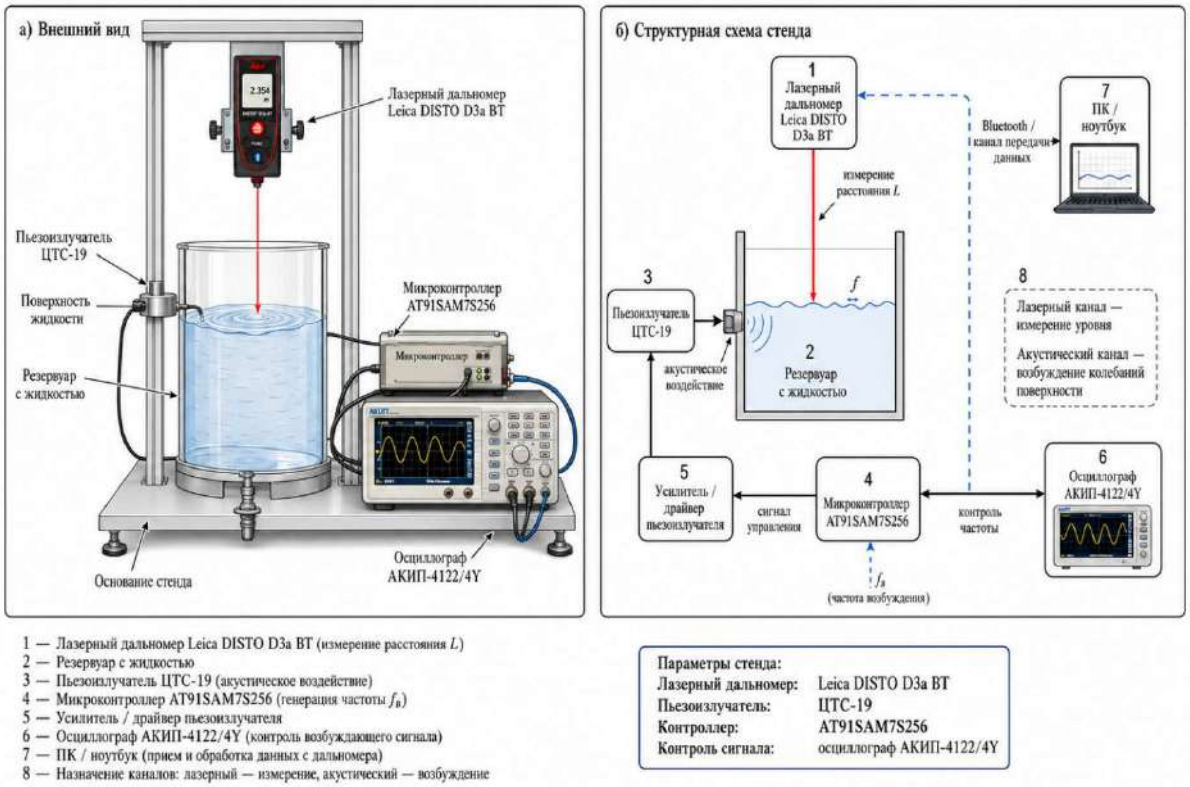
ISSN 3030-3907

приёмного устройства, стабильность геометрии измерительного тракта, параметры электронной обработки сигнала, свойства поверхности жидкости, а также внешние условия эксплуатации. Дополнительные погрешности могут возникать вследствие вибрации технологического оборудования, температурных воздействий, загрязнения оптических поверхностей, наличия паров и аэрозолей и изменения отражательной способности контролируемой среды.

Особую проблему при лазерном измерении представляет паразитное отражение излучения от стенок измерительной ёмкости. Для прозрачных или малопрозрачных жидкостей отражённый от стенок сигнал может сопоставляться по интенсивности с полезным сигналом, поступающим от поверхности жидкости. Это приводит к снижению контрастности регистрируемого сигнала и, как следствие, к увеличению неопределённости определения положения поверхности. Поэтому при экспериментальных исследованиях необходимо предусматривать конструктивные меры, направленные на снижение влияния паразитных оптических сигналов.

Для исследования указанных факторов представляет интерес применение лабораторного испытательного стенда лазерно-акустического уровнемера, включающего лазерный дальномер, измерительную ёмкость с жидкостью, акустический излучатель, микроконтроллерный модуль формирования управляющего воздействия и осциллограф для контроля параметров сигнала. Такая структура позволяет исследовать взаимосвязь между воздействием на поверхность жидкости, формированием оптического отклика и последующей регистрацией измерительной информации. На лабораторном стенде (рис. 1) проводилось исследование лазерно-акустического уровнемера, совмещающего лазерный дальномер Leica DISTO D3a BT с пьезоизлучателем ЦТС-19 для возбуждения колебаний поверхности жидкости. Частота акустического воздействия задавалась микроконтроллером AT91SAM7S256 и контролировалась осциллографом АКИП-4122/4Y.

ISSN 3030-3907



1 — Лазерный дальномер Leica DISTO D3a BT (измерение расстояния L)
2 — Резервуар с жидкостью
3 — Пьезоизлучатель ЦТС-19 (акустическое воздействие)
4 — Микроконтроллер AT91SAM7S256 (генерация частоты $f_в$)
5 — Усилитель / драйвер пьезоизлучателя
6 — Осциллограф АКИП-4122/4Y (контроль возбуждающего сигнала)
7 — ПК / ноутбук (прием и обработка данных с дальномера)
8 — Назначение каналов: лазерный — измерение, акустический — возбуждение

Параметры стенда:	
Лазерный дальномер:	Leica DISTO D3a BT
Пьезоизлучатель:	ЦТС-19
Контроллер:	AT91SAM7S256
Контроль сигнала:	осциллограф АКИП-4122/4Y

Рис 1. Лабораторный испытательный стенд лазерно-акустического уровнемера: а) внешний вид; б) структурная схема стенда.

Элементы стенда: 1 — лазерный дальномер; 2 — акустический излучатель (ЦТС-19); 3 — акустический волновод; 4 — лабораторный штатив; 5 — ёмкость с контролируемой жидкостью; 6 — генератор сигналов (микроконтроллер AT91SAM7S256).

Ключевым результатом экспериментов стало подтверждение теоретически предсказанного увеличения коэффициента отражения прозрачных жидкостей при акустическом возбуждении их поверхности. Для воды при частоте колебаний $f = 10\ Hz$ коэффициент отражения возрастал с $G_0 = 0{,}03$ до $G = 0{,}20$, что обеспечило надёжную работу дальномера.

Зависимость коэффициента отражения от амплитуды колебаний поверхности соответствует математической модели: чем больше амплитуда U_m, тем выше осреднённое значение G. Погрешность измерения уровня воды при лазерно-акустическом методе составила ±1,0 mm, что совпадает с результатом, полученным для тёмных жидкостей прямым лазерным методом.

Следует отметить, что для жидкостей с наклонной поверхностью (угол наклона до ±10°) погрешность возрастала до ±2,5 mm. Применение алгоритма скользящего усреднения с окном N = 100 снизило остаточную погрешность при наклоне поверхности до уровня ±1,5 mm.

ISSN 3030-3907

В таблице 1. приведены численные результаты эксперимента лабораторно испытательного стенда лазерно-акустического уровнемера в виде расчётных данных.

Таблица 1

№	Расстояние d, мм	Уровень H, мм
1	100	400
2	150	350
3	200	300
4	250	250
5	300	200
6	350	150
7	400	100

А так же показан график 1. зависимости уровня жидкости от измеряемого расстояния.

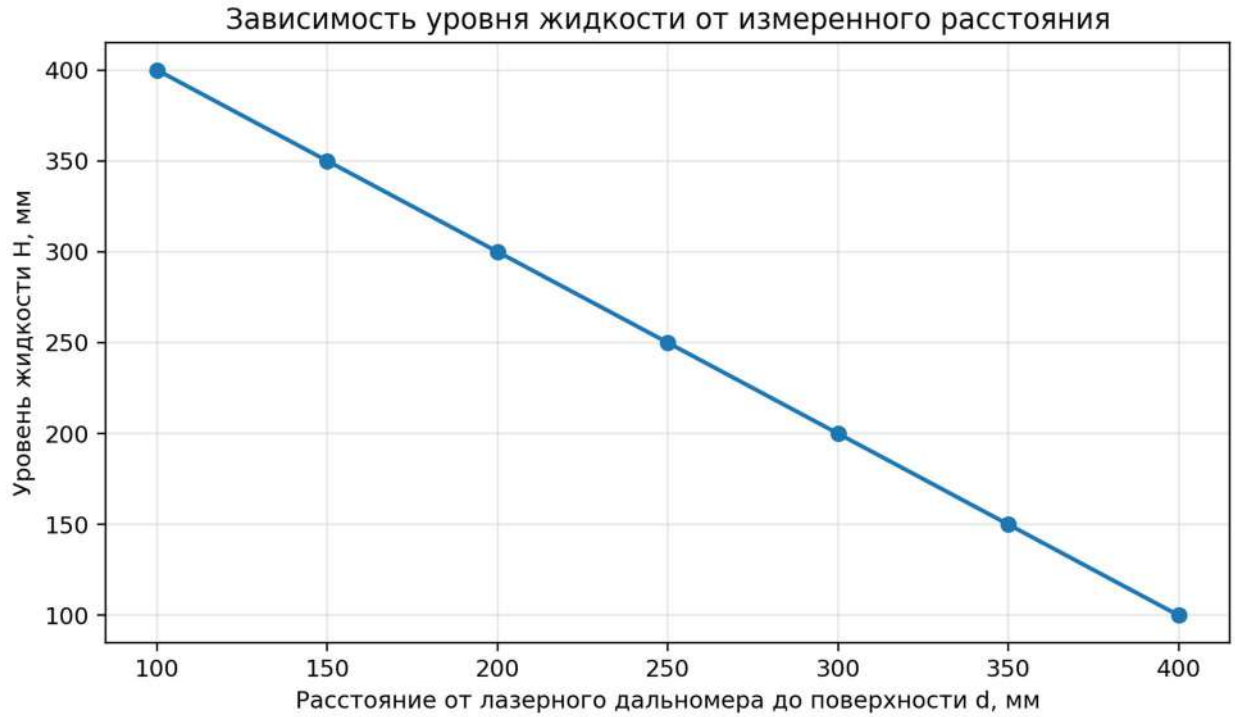


График 1 . Зависимость уровня жидкости от измеренного расстояния

Расчётная зависимость: $H = H_0 - d$, где H_0 — условная высота установки лазерного дальномера, d — расстояние от дальномера до поверхности жидкости, H — определяемый уровень жидкости.

В результате проведённого исследования рассмотрены основные методические, инструментальные и эксплуатационные факторы, определяющие точность бесконтактного измерения уровня жидких сред оптико-электронными средствами. Установлено, что результирующая погрешность измерения формируется совокупным воздействием

ISSN 3030-3907

характеристик измерительного метода, параметров аппаратных компонентов, особенностей контролируемой среды и условий эксплуатации измерительной системы. Проведённый структурный анализ показал, что к наиболее значимым методическим составляющим относятся несовершенство физической и математической моделей измерения, допущения при формировании функции преобразования, изменение состояния поверхности жидкости и влияние её оптических характеристик. Инструментальные составляющие связаны с характеристиками лазерного источника, фотоприёмного устройства, измерительного и электронного трактов, а также с шумами и погрешностями преобразования и обработки сигнала.

Особое значение при эксплуатации лазерных уровнемеров имеют дополнительные погрешности, обусловленные воздействием внешней среды. К ним относятся изменения температуры и давления, вибрационные воздействия, наличие паров и аэрозолей, загрязнение оптических элементов и изменение отражательной способности поверхности жидкости. В условиях промышленной эксплуатации вибрация технологического оборудования может вызывать относительное перемещение элементов измерительной системы и изменение положения лазерного пятна. Загрязнение защитного окна пылью, конденсатом или технологическими продуктами, в свою очередь, приводит к изменению интенсивности проходящего и отражённого излучения, ухудшению отношения сигнал/шум и снижению достоверности определения положения поверхности.

Для прозрачных жидкостей существенным фактором является паразитное отражение лазерного излучения от внутренних стенок измерительной ёмкости. В рамках экспериментального подхода для снижения влияния данного фактора предусмотрено нанесение чёрного матового покрытия на внутреннюю боковую поверхность измерительной ёмкости.

Такое конструктивное решение позволяет уменьшить интенсивность паразитной составляющей отражённого светового потока и повысить контрастность полезного регистрируемого сигнала. Это создаёт более благоприятные условия для последующего определения положения поверхности жидкости и повышения устойчивости измерительного процесса.

В следствии чего, проведённый анализ показал, что точность измерения уровня жидких сред определяется совокупным воздействием методических, инструментальных и эксплуатационных факторов. Применение лазерных и лазерно-акустических методов позволяет обеспечить бесконтактный контроль уровня и расширить возможности измерений в сложных производственных условиях. Использование

ISSN 3030-3907

акустического воздействия совместно с лазерной регистрацией положения поверхности создаёт предпосылки для повышения информативности и устойчивости измерительного процесса. Снижение влияния паразитных отражений, вибрации, загрязнения оптических элементов и других внешних факторов является важным условием повышения достоверности результатов измерений. Полученные результаты подтверждают перспективность комплексного метрологического подхода при разработке и совершенствовании оптико-электронных средств измерения уровня жидких сред.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матякубова П.М., Кадирова Ш.А., Саидорипов Л.Ф. Вопросы инновационной экономики и метрологического обеспечения. “Milliy standart” Ilmiy-texnik jurnali. 2022/3-son. ISSN:2181-7634. 2019-yil 12-may, 7-9 betlar.
2. Chen L.; Dong, X.; Han, J.; Ye, P. Development of a Ultrasonic Instrument for the Sealed Container’s Liquid Level Measurement. In Proceedings of the World Congress on Intelligent Control & Automation, Dalian, China, 21–23 June 2006; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2006.
3. Kim S.J., Park J.H., Lee D.K., 2020, “High-Precision Magnetostrictive Level Measurement Technology for Industrial Tanks”, *Measurement*, 158, DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107698
4. Кулаков М.В. Технические измерения в химических производствах. – М.: Альянс, 2008. – 424 с
5. Antunes P., J. Dias, T. Paixão, E. Mesquita, H. Varum, and P. André, “Liquid level gauge based in plastic optical fiber,” Measurement, vol. 66, pp. 238–243, 2015.
6. Stano G., Di Nisio, A., Lanzolla, A. M., Ragolia, M. A., & Percoco, G. (2022). Additive manufacturing for capacitive liquid level sensors. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *123*(7–8), 2519–2529. https://doi.org/10.1007/s00170-022-10344-7
7. Ren K. The influence by temperature and product density to accuracy of magnetostrictive level gauge. In Proceedings of the IEEE International Conference on Information Acquisition, Hefei, China, 21–25 June 2004; pp. 248–251.