

УДК 681.786.23 : 53.082.531

**БЕСКОНТАКТНОЕ ТРИАНГУЛЯЦИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ
РАССТОЯНИЯ ДО ЗЕРКАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ*****М. М. Мордасов, А. П. Савенков, М. Э. Сафонова, В. А. Сычев**

*Тамбовский государственный технический университет,
392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106
E-mail: savencow@yandex.ru*

Проведён метрологический анализ триангуляционных лазерных датчиков расстояния до зеркальных поверхностей. В результате теоретических и экспериментальных исследований установлено, что диапазон измерения расстояния зависит от угла падения лазерного луча, а основным фактором, влияющим на точность измерения, является поворот датчика в плоскости падения. Предложена схема бесконтактного детектора расстояния до поверхности жидкости, обеспечивающего сигнализацию достижения заданного значения. Приведён обзор триангуляционных измерительных систем.

Ключевые слова: триангуляционные системы, зеркальные поверхности, геометрические параметры, погрешность сигнализации расстояния.

DOI: 10.15372/AUT20180111

Введение. Для точных бесконтактных измерений расстояния обычно применяются оптические методы. Традиционные триангуляционные датчики [1–3] служат для определения расстояния до поверхностей, рассеивающих свет. Однако часто необходим бесконтактный контроль уровня жидкости, поверхность которой, как правило, является зеркальной. Триангуляционные датчики специальной конструкции, предназначенные для измерения расстояния до зеркальных поверхностей, используются, например, при выращивании кристаллов [4, 5], реализации аэрогидродинамических методов определения физических свойств жидкостей [6, 7], в стереолитографии [8], при работе с опасными веществами [9] и расплавами [10, 11].

При измерении расстояния до рассеивающих поверхностей триангуляционным методом угол падения лазерного луча не оказывает значительного влияния на результат (рис. 1, *a*). В случае определения расстояния до зеркальных поверхностей влияние этого угла, напротив, существенно (рис. 1, *b*). Поэтому минимальное изменение, которое необходимо внести в триангуляционные системы для измерения расстояния до зеркальных поверхностей, — стабилизация отличного от нуля угла падения лазерного луча [1, 4, 9, 12–14].

Линза 4 в датчике, схема которого представлена на рис. 1, *b*, позволяет согласовать диапазон перемещения отражённого луча при колебаниях уровня жидкости с диапазоном измерения перемещения позиционно-чувствительного фотоприёмника (ПЧФ) или ПЗС-матрицы 3 [13–15]. Однако тот же результат может быть достигнут путём варьирования угла φ между лазерным лучом и поверхностью жидкости. В связи с тем, что размер линзы накладывает ограничение на диапазон измерения расстояния, в ряде конструкций триангуляционных датчиков объектив отсутствует [5–8, 10, 16, 17]. Изменение расстояния до поверхности жидкости на ΔH непосредственно преобразуется в перемещение δ точки падения луча на поверхность ПЧФ 3 (рис. 1, *c*).

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 15-19-10028).

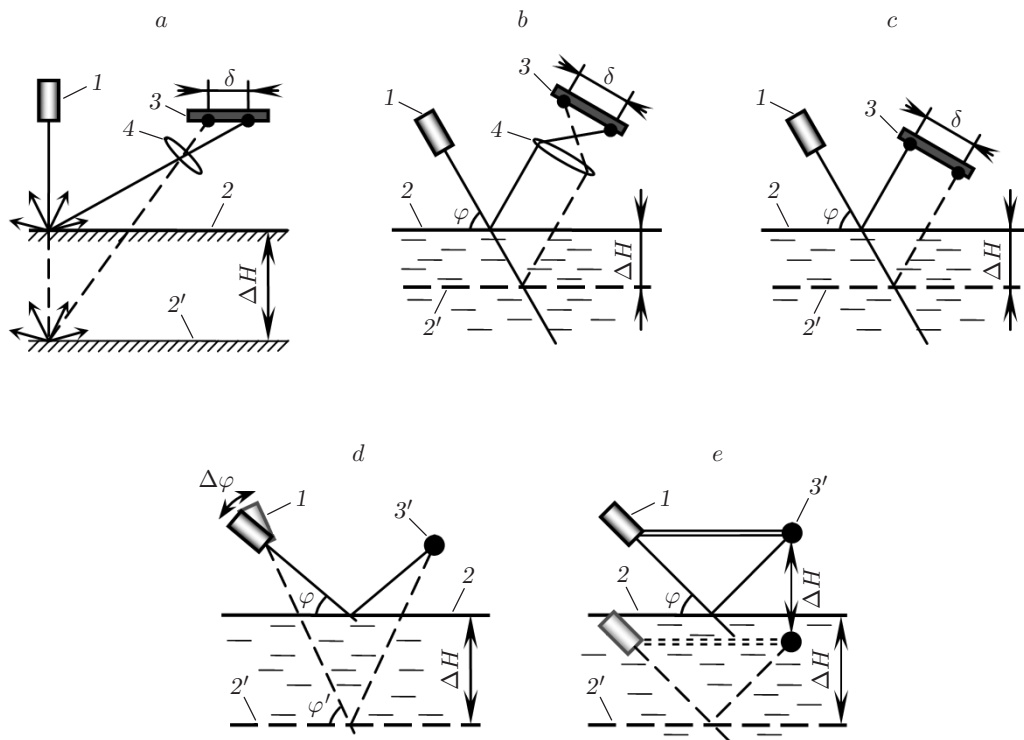


Рис. 1. Схемы триангуляционных датчиков расстояния: 1 — лазерный диод; 2 и 2' — разные положения поверхности, до которой определяется расстояние; 3 — позиционно-чувствительный фотоприёмник; 3' — точечный фотодетектор; 4 — линза

Угловое (рис. 1, *d*) или линейное (рис. 1, *e*) перемещение элементов датчика для измерения расстояния до поверхности жидкости позволяет вместо ПЧФ использовать фотодетектор, сигнализирующий о падении луча в заданную точку его поверхности. В датчике, схема которого представлена на рис. 1, *d*, при изменении уровня жидкости производится поворот диода 1 так, чтобы отражённый лазерный луч воздействовал на фотодетектор 3'. Об отклонении уровня жидкости на ΔH судят по значению $\Delta\varphi = \varphi' - \varphi$ [16]. Для повышения точности измерения уровня в работе [17] реализован переход из угловых координат во временную область. Лазерный луч непрерывно с постоянной скоростью вращается в вертикальной плоскости. На выходе фотодетектора формируются два импульса в моменты действия луча напрямую с лазерного диода и луча, отражённого от поверхности жидкости. Об уровне жидкости судят по разнице во времени поступления импульсов с выхода фотодетектора. Такой датчик позволяет эффективно осуществлять многократные измерения, что способствует снижению влияния на результат случайной составляющей погрешности, обусловленной, например, хаотическими колебаниями поверхности жидкости. Принцип вращения луча также применён вместо ПЧФ в фотоприёмнике, предложенном в работе [11].

При поддержании определённого уровня жидкости или установке оборудования на заданном расстоянии от её поверхности не требуется вычисления текущего значения расстояния, а нужна лишь сигнализация единственного фиксированного. Для решения этих задач может быть применён детектор расстояния, схема которого изображена на рис. 1, *e*. Действие луча лазерного диода 1 на фотодетектор 3' сигнализирует о достижении заданного значения расстояния. Посредством вертикального перемещения такого детектора он может быть использован и для измерения уровня жидкости. Перемещение детектора на ΔH соответствует изменению уровня на ту же величину [18].

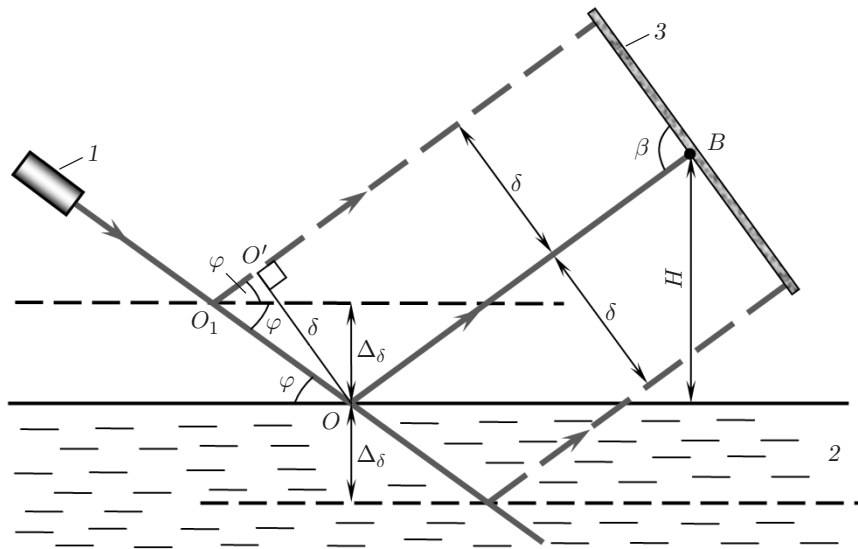


Рис. 2. Схема определения погрешности Δ_δ сигнализации расстояния H , обусловленной погрешностью δ фотоприёмника (обозначения 1–3 соответствуют рис. 1)

В [13, 14] производится оценка погрешности триангуляционных систем определения профиля зеркальной поверхности, имеющих в своей конструкции объектив (см. рис. 1, б). На результат измерения расстояния триангуляционными устройствами без объектива влияющие факторы действуют иначе.

Цель данной работы — теоретические и экспериментальные исследования влияния геометрических параметров триангуляционных систем без объектива на погрешность измерения. Полученные результаты справедливы для средств измерения, схемы которых приведены на рис. 1, с, е.

Теоретический анализ погрешности измерения. Одним из источников погрешности измерения расстояния до зеркальной поверхности триангуляционным методом является погрешность δ определения точки на поверхности фотоприёмника, в которую падает лазерный луч. Для получения зависимости погрешности Δ_δ , обусловленной несовершенством фотоприёмника, от угла φ рассмотрим схему, представленную на рис. 2.

Анализ распространения лазерного излучения при работе триангуляционных систем с зеркальными поверхностями позволил выделить два геометрических параметра, определяющих метрологические характеристики измерительных устройств: угол φ между падающим лазерным лучом и зеркальной поверхностью и расстояние H от неё до заданной точки B поверхности фотоприёмника 3.

При достижении расстояния H до поверхности жидкости 2 отражённый от неё луч, изображённый на рис. 2 сплошной линией, падает в точку B , в результате чего на выходе электронной схемы детектора (на рисунке не показана) формируется соответствующий дискретный сигнал. Из-за конечных размеров луча срабатывание детектора происходит в некоторой окрестности $\pm\delta$ точки B . Это приводит к появлению погрешности $\pm\Delta_\delta$ сигнализации заданного расстояния H . Соответствующие положения поверхности жидкости относительно элементов 1 и 3 детектора и отражённые лучи показаны штриховыми линиями.

Рассмотрим треугольник OO_1O' , в котором

$$OO_1 = \delta / (\sin 2\varphi). \quad (1)$$

Используя длину отрезка OO_1 , определим погрешность

$$\Delta_\delta = OO_1 \sin \varphi. \quad (2)$$

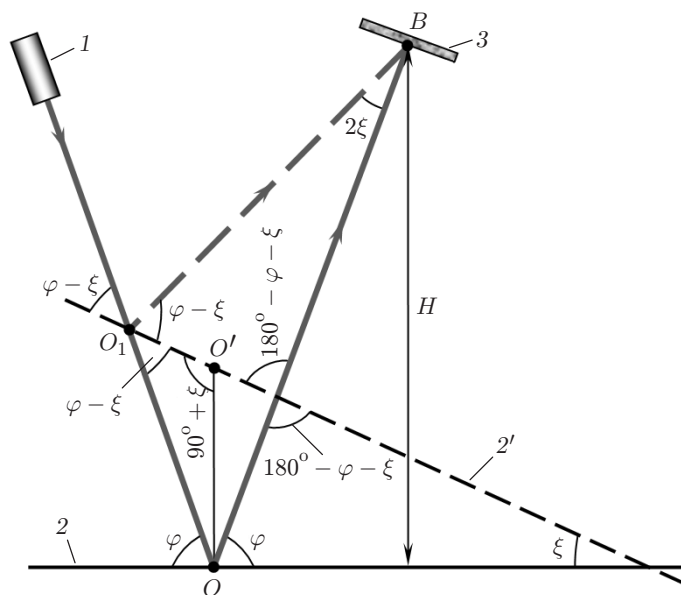


Рис. 3. Схема определения погрешности Δ_ξ сигнализации расстояния H , обусловленной поворотом детектора на угол ξ (обозначения 1–3 соответствуют рис. 1)

Подставив (1) в (2), получим нормированную по погрешности δ фотоприёмника погрешность сигнализации расстояния H триангуляционным детектором:

$$\Delta_\delta / \delta = 1 / (2 \cos \varphi). \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что погрешность Δ_δ возрастает с увеличением угла φ и не зависит от заданного расстояния H .

Другим источником погрешности в рассматриваемом детекторе является неправильная установка его элементов относительно поверхности жидкости. На рис. 3 поверхность 2 соответствует заданному расположению элементов 1 и 3 детектора, а поверхность 2', изображённая штриховой линией, — повороту детектора в плоскости падения лазерного луча на угол ξ от заданного положения. При повороте детектора точка отражения O смещается в O_1 . В реальной измерительной системе возможны лишь малые значения углов ξ (не более 2°). Это позволяет в качестве погрешности Δ_ξ сигнализации расстояния H , обусловленной поворотом элементов детектора на угол ξ , выбрать длину отрезка OO' , перпендикулярного поверхности 2.

Длина отрезка OO' определяется из соотношений, полученных для треугольников O_1BO и $O_1O'O$ исходя из теоремы синусов:

$$\frac{OO_1}{\sin O_1BO} = \frac{OB}{\sin OO_1B}, \quad \frac{OO_1}{\sin O_1O'O} = \frac{OO'}{\sin OO_1O'}$$

откуда

$$OO' = OB \frac{\sin OO_1O' \cdot \sin O_1BO}{\sin O_1O'O \cdot \sin OO_1B}. \quad (4)$$

Определив расстояние OB через H и выполнив элементарные тригонометрические преобразования, из (4) получим зависимость погрешности Δ_ξ от угла ξ :

$$\Delta_\xi = OO' = H \frac{\sin \xi}{\sin \varphi \cdot \cos(\varphi - \xi)}. \quad (5)$$

Теоретический анализ уравнения (5) показал, что в диапазоне от 20 до 70° угол φ слабо влияет на погрешность Δ_ξ . В середине диапазона при $\varphi \approx 45^\circ$ наблюдается минимум зависимости $\Delta_\xi(\varphi)$. На границах диапазона погрешность увеличивается приблизительно в 1,6 раза относительно минимума. За пределами указанного диапазона зависимость $\Delta_\xi(\varphi)$ резко возрастает до бесконечности в точках 0 и 90° . Такие выводы справедливы для любых значений H и значений ξ близких к нулю. Зависимость $\Delta_\xi(\xi)$ при малых ξ близка к функции прямой пропорциональности.

Эксперимент. Для экспериментальной проверки уравнений (3) и (5) использован триангуляционный детектор расстояния, электрическая схема которого представлена на рис. 4. Питание лазерного диода VD2 осуществляется от источника тока, собранного на транзисторе VT1. Подстроечный резистор R2 предназначен для регулировки тока диода VD2. В ходе экспериментов величина тока варьировалась в диапазоне 10–30 мА.

В целях снижения погрешности δ определения точки падения лазерного луча, отражённого от поверхности жидкости, в детекторе применён дифференциальный фотоприёмник [18, 19]. Выходы фотопреобразователей на фотодиодах VD3 и VD6 подключены ко входам дифференциального каскада на транзисторах VT2 и VT3. Активные поверхности фотодиодов расположены выше и ниже заданной точки B , показанной на схеме рис. 2. Допустим, фотодиод VD3 находится выше точки B . При действии луча на поверхность фотодиода VD6 на выходе 2 детектора формируется напряжение уровня логической единицы и загорается светодиод VD5. Это сигнализирует о том, что расстояние до поверхности жидкости больше заданного. Аналогично зажигание светодиода VD4, вызванное падением луча на фотодиод VD3, сигнализирует о значении расстояния меньше заданного. При падении луча на границу поверхностей фотодиодов VD3 и VD6 (точка B на рис. 2) последние принимают одинаковые световые потоки. Напряжения на выходах детектора соответствуют уровню логического нуля, свечение светодиодов отсутствует. Такое состояние выходов свидетельствует о достижении заданного расстояния до поверхности жидкости. Таким образом, представленный детектор позволяет не только определять достижение заданного расстояния, но и получать информацию о направлении необходимого перемещения.

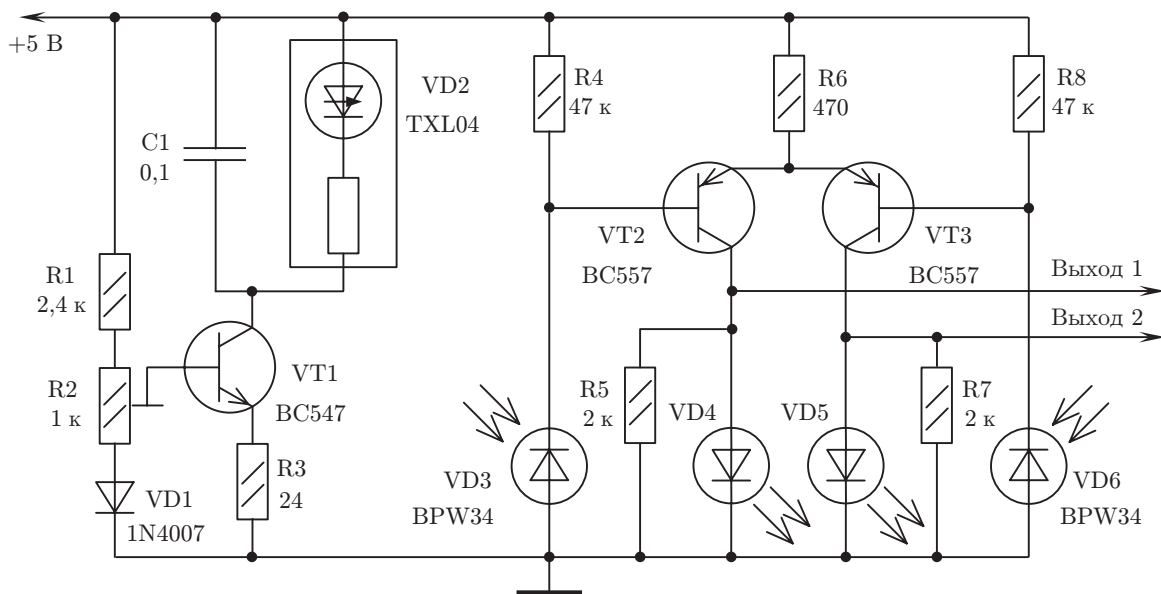


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема бесконтактного детектора расстояния до поверхности жидкости

Конструкция детектора, применяемого в экспериментах, обеспечивает возможность изменения и фиксации параметров φ и H в широком диапазоне значений. Для перемещения детектора по вертикали использован микровинт, для контроля поворота на угол ξ — гидростатический указатель уровня с высокой чувствительностью. При оптимальных конструктивных параметрах детектора обеспечивается погрешность Δ_δ сигнализации расстояния не более $\pm 0,01$ мм. Светодиоды VD4 и VD5 могут быть исключены из схемы детектора с повышением точности сигнализации расстояния.

Результаты и их обсуждение. На рис. 5 представлена зависимость нормированной погрешности сигнализации расстояния, обусловленной погрешностью фотоприёмника, от угла φ . Из графика видно, что экспериментальные данные соответствуют теоретическим при различных значениях заданного расстояния H .

Для детектора расстояния (см. рис. 1, е) погрешность сигнализации расстояния возрастает с увеличением угла φ , следовательно, для повышения точности работы нужно выбирать меньшие значения этого угла. При углах $\varphi < 60^\circ$ погрешность Δ_δ детектора меньше погрешности δ фотоприёмника. На практике не лишено смысла уменьшение φ приблизительно до 30° .

На рис. 2 показано нормальное расположение поверхности фотоприёмника к отражённому лазерному лучу ($\beta = 90^\circ$). Для повышения точности сигнализации расстояния возможно уменьшение угла β . При использовании детектора, схема которого изображена на рис. 4, это не приведёт к значимым результатам, так как при уменьшении β сократится и падающий на фотодиоды световой поток, что, в свою очередь, отрицательно повлияет на точность сигнализации расстояния. Эффективное изменение угла β для повышения точности сигнализации возможно при большем усилении разности сигналов от фотодиодов.

Для триангуляционных датчиков расстояния (см. рис. 1, с) с ПЧФ или ПЗС-матрицами зависимость погрешности измерения от угла φ не характерна. Это объясняется следующим образом. Параметр δ можно трактовать и как абсолютную погрешность ПЧФ или матрицы, и как диапазон измерения. Варьирование угла φ вызывает пропорциональное изменение этих метрологических характеристик, в результате чего приведённая погрешность измерения расстояния остаётся неизменной и равной исходной погрешности фотоприёмника (матрицы). Аналогичные рассуждения справедливы и для угла β . Параметры φ и β целесообразно использовать для изменения диапазона измерения расстояния. Увеличению чувствительности и уменьшению диапазона измерения способствует уменьшение углов φ и β . Для дополнительного повышения чувствительности в работе [10] предложено использовать в фотоприёмнике вогнутое зеркало.

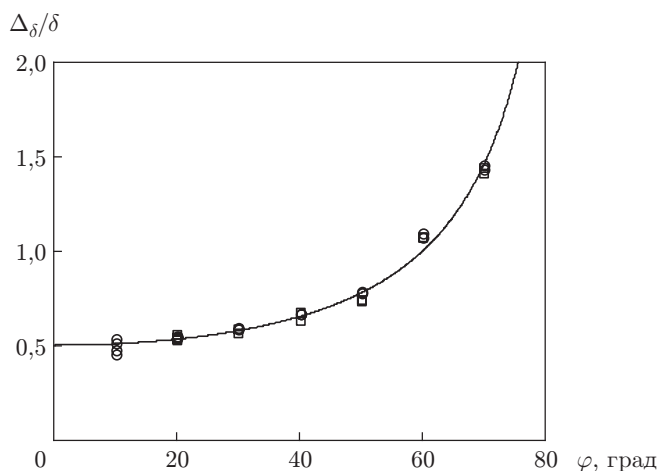


Рис. 5. Зависимость нормированной погрешности $\Delta\varphi_\delta$ от угла φ при различных значениях заданного расстояния H (о — 15 мм, □ — 40 мм, кривая — уравнение (3))

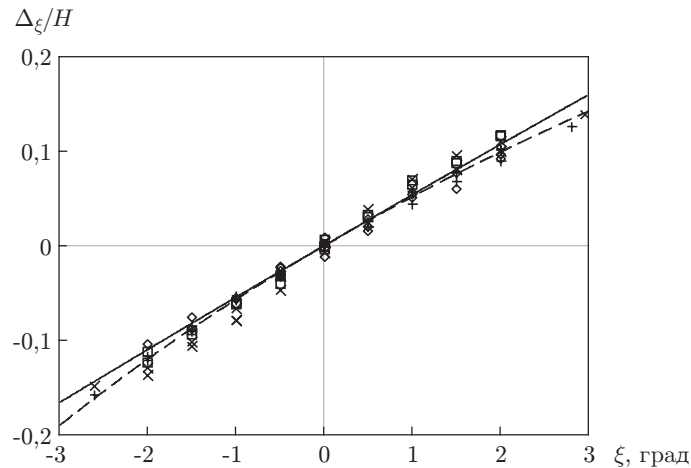


Рис. 6. Зависимость относительной погрешности сигнализации расстояния H от угла ξ при $\varphi = 20^\circ$ (сплошная кривая, \diamond и \square) и $\varphi = 70^\circ$ (штриховая кривая, $+$ и \times); маркёры \diamond , \square , $+$, \times соответствуют расстоянию H равному 10, 26, 18, 42 мм; кривые получены по уравнению (5)

На рис. 6 представлена зависимость относительной погрешности сигнализации расстояния H от угла ξ отклонения элементов оптической системы детектора от заданного расположения. Из графиков видно, что экспериментальные данные соответствуют уравнению (5) при различных значениях расстояния H и угла φ .

В диапазоне углов ξ равном $\pm 1^\circ$ зависимости, показанные на рис. 6, могут быть аппроксимированы функцией прямой пропорциональности с погрешностью не более 5 %. Это позволяет получить упрощённое выражение для оценки предельной погрешности в диапазоне изменения угла φ от 20° до 70° :

$$\Delta_\xi = 0,0543H\xi, \quad (6)$$

где ξ выражено в градусах. В диапазоне угла φ от 40° до 50° погрешность Δ_ξ не менее чем в 1,5 раза ниже результатов расчёта по формуле (6).

Найдём предельную относительную погрешность измерения расстояния до поверхности жидкости с помощью уравнения (6) для угла φ из диапазона от 20° до 70° . В условиях гравитации поверхность жидкости в сосуде горизонтальна. Для контроля поворота датчика целесообразно использовать гидростатический указатель уровня, который способен обеспечить отклонение угла ξ не более $\pm 0,5^\circ$. Из уравнения (6) получим относительную погрешность $\Delta_\xi/H \approx 2,7\%$.

Влияние поворота оптической триангуляционной системы на точность измерения расстояния следует признать значительным. Для снижения этого влияния в работе [5] предложено использовать двухлучевую схему измерения.

Кроме поворота элементов триангуляционной системы угол ξ также определяет изменение локального угла наклона поверхности жидкости при наличии на ней капиллярных волн, а уравнение (6) характеризует чувствительность триангуляционных датчиков к соответствующим колебаниям. Это особенно важно учитывать при измерении расстояния до невязких жидкостей, где капиллярные волны присутствуют почти всегда.

Заключение. Теоретические и экспериментальные исследования бесконтактных триангуляционных датчиков расстояния до зеркальных поверхностей показали, что основным фактором, влияющим на точность измерения, является поворот датчика в плоскости падения лазерного луча.

Влияние конструктивного параметра триангуляционной системы — угла между лазерным лучом и поверхностью жидкости — проявляется двояко. С одной стороны, он определяет диапазон измерения расстояния, а с другой — влияет на чувствительность датчика к углу его поворота.

Результаты данной работы использованы при контроле уровня агрессивных жидкостей в установке для синтеза надпероксидов щелочных металлов, применяемых в качестве хемосорбентов в изолирующих средствах защиты органов дыхания [20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Байбаков А. Н., Ладыгин В. И., Пастушенко А. И. и др.** Лазерные триангуляционные датчики положения в промышленных системах контроля и диагностики // *Автометрия*. 2004. **40**, № 2. С. 105–113.
2. **Liebe C. C., Coste K.** Distance measurement utilizing image-based triangulation // *IEEE Sensors Journ.* 2013. **13**, N 1. P. 234–244. DOI: 10.1109/JSEN.2012.2212428.
3. **Булычев Ю. Г., Чепель Е. Н.** Квазиоптимальный метод решения задачи триангуляции в условиях априорной неопределённости // *Автометрия*. 2017. **53**, № 6. С. 83–91.
4. **Михляев С. В.** Применение методов оптической триангуляции для измерения уровня расплава при выращивании кристаллов // *Автометрия*. 2003. **39**, № 5. С. 30–41.
5. **Pat. 9228878 US.** Dual beam non-contact displacement sensor /T. Haw, G. Kercheck. Publ. 05.01.2016.
6. **Pat. 2836972 DE.** Verfahren zur berührungslosen messung der oberflächenspannung und der viskosität /E.-G. Lierke, W. M. Heide, M. Achatz. Offenlegungstag 06.03.1980.
7. **Мордасов М. М., Савенков А. П.** Бесконтактный неразрушающий аэрогидродинамический контроль вязкости жидкостей // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2008. **74**, № 2. С. 22–25.
8. **Xu G., Yan D., Wang Ya., Ju K.** Research of the liquid level detection system for integral stereolithography system // *Appl. Mech. and Mater.* 2013. **347–350**. P. 32–35. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.347-350.32.
9. **Pat. 7399985 US.** Optical non-contact sensor for detecting material level in a container /W. Mruk, M. Adams, W. Kilkerr et al. Publ. 17.01.2008.
10. **Pat. 8785898 US.** Device and method for detecting liquid level of molten silicon using laser reflected from curved mirror /Q. Li, N. Song, D. Liu. Publ. 22.07.2014.
11. **Pat. 4963731 US.** Optical level measurement system /Ch. King. Publ. 16.10.1990.
12. **Zhang W., Zhuang B. H.** Non-contact measurement of scratches on aircraft skins and windows // *Proc. SPIE*. 1997. **3204**. P. 90–94. DOI: 10.1117/12.294445.
13. **Михляев С. В.** Анализ оптических триангуляционных систем измерения профиля зеркальной поверхности // *Автометрия*. 2005. **41**, № 4. С. 78–91.
14. **Mikhlyaev S. V.** Influence of a tilt of mirror surface on the measurement accuracy of laser triangulation rangefinder // *Journ. Physics: Conf. Ser.* 2006. **48**. P. 739–744. DOI: 10.1088/1742-6596/48/1/140.
15. **Байбаков А. Н., Кучинский К. И., Плотников С. В., Титова Е. А.** Применение позиционно-чувствительных фотоприемников в триангуляционных системах размерного контроля динамических объектов // *Автометрия*. 2005. **41**, № 6. С. 53–61.
16. **Tao H., Liu W.** Measurement system for liquid level based on laser triangulation and angular tracking // *Journ. Computers*. 2010. **5**, N 9. P. 1444–1447. DOI: 10.4304/jcp.5.9.1444-1447.
17. **Pat. 6545286 US.** Method and apparatus for water level determination /J. H. Ross, E. C. Hayes. Publ. 08.04.2003.

18. **Savenkov A. P., Safonova M. E.** A non-contact sensor of distance to a liquid surface // Proc. of the 3rd Intern. Sci. and Practical Conf. of Young Scientists "The World of Science without Borders". Tambov: TSTU Publishing House, 2016. P. 128–132.
19. **Кириянов В. П., Кириянов А. В., Чуканов В. В.** Использование дифференциального метода измерений для контроля точности прецизионных углоизмерительных структур // Автометрия. 2016. **52**, № 4. С. 45–52.
20. **Мищенко С. В., Балабанов П. В., Кримштейн А. А., Пономарев С. В.** Динамика хемосорбции регенеративными веществами на основе супероксидов щелочных металлов и поглотителей // Вестн. ТГТУ. 2010. **16**, № 4. С. 870–881. DOI: 10.17217/issn.0136-5835.

Поступила в редакцию 21 апреля 2017 г.
