УДК 681.3.06

# РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ТЕРМОПРОФИЛЕМЕРОВ ТИПА “ЭЛЕКТРОННОЙ МЕРНОЙ РЕЙКИ”

***П.В. Гайский***

Институт природно-технических систем
г. Севастополь, ул. Ленина, 28
*E-mail: gaysky@inbox.ru*

*Измерение уровня в жидкостях и сыпучих средах является одной из важнейших задач жизнедеятельности человека, а также многих автоматизированных систем контроля окружающей среды. Альтернативой широко распространенным гидростатическим, контактным и дистанционным измерителям могут быть уровнемеры, построенные на распределенных датчиках температуры (термопрофилемерах).*

**Введение.** Возможность измерений уровня и границ раздела сред в автоматизированных системах с использованием распределенных датчиков температуры была предложена несколько лет назад [1, 2]. При участии автора были разработаны и запатентованы способы реализации соответствующих измерителей [3, 4].

Современные автоматические измерители уровня поздразделяются на гидростатические (с использованием датчиков давления различной конструкции), контактные (механические, поплавковые, вибрационные, емкостные, флажковые, магнитные) и дистанционные (ультразвуковые, радарные, микроволновые, оптические). Они, чаще всего, имеют узкоспециализированную направленность и не могут быть использованы для работы в различных средах, в условиях динамического верхнего заполнения емкостей, а также одновременно обеспечивать контроль нескольких границ раздела сред.

В широко распространенных гидростатических измерителях уровня жидкостей, в том числе СТД (с одновременным контролем температуры и солености) [5, 6], никак не учитывается вертикальное распределение плотности, температуры и скоростей внутренних потоков (течений). В акустических не учитывается изменение скорости звука по профилю из-за изменения температуры и плотности воздуха или воды. Все это существенно ограничивает точность измерений.

Измерители с промежуточными преобразователями уровня в аналоговый сигнал (напряжение, ток, частота или интервал времени) будут неизбежно иметь погрешность не менее погрешности этого преобразования. Поэтому целесообразно непосредственное преобразование пространственного положения уровня в цифру, т.е. реализация “электронной мерной рейки” (ЭМР). Такое преобразование осуществляется на основе распределенных термопрофилемеров, которые дополнительно позволяют фиксировать положение нескольких границ раздела сред с различным коэффициентом теплообмена, например, вода–воздух–лед–снег, воздух–лед–вода–осадочные отложения, воздух–снег–чернозем–песок–глина–гранит.

В частности, как показали эксперименты в силосе зернового элеватора, хорошо контролируется уровень во время верхней загрузки потоком сыпучего материала и разделение слоев влажного–сухого зерна. В данном применении, альтернативные распределенным термопрофилемерам технические решения на основе цепочки точечных датчиков температуры или дискретных механических устройств не обеспечивают высокой точности и надежности.

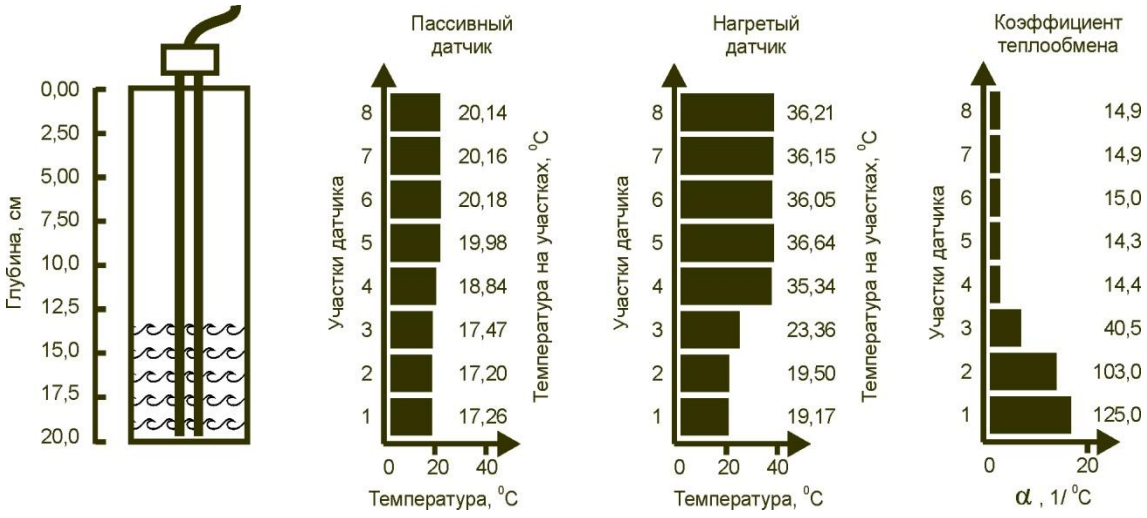
**Основная часть.** Разработка системы контроля уровня и границ раздела сред с помощью непрерывных в пространстве распределенных датчиков теммпературы (термопрофилемеров) требует реализации индивидуальных алгоритмов управления электроникой измерителей и обработки измерительной информации. Так называемая “электронная мерная рейка”, осуществляющая стационарный непосредственный контроль уровней по заданному профилю размещения, может быть реализована различными способами.

Для отработки интересующих наиболее актуальных для внедрения методик были разработаны и изготовлены измерители на базе одного (периодически подогреваемого) и двух параллельно расположенных (пассивного и нагреваемого) распределенных датчиков.

На рис. 1 представлена обобщенная последовательность получения первичных измерительных данных для дальнейшей алгоритмически-программной обработки в случае уровнемера, построенного на двух датчиках. Полученный дискретный профиль коэффициента теплообмена датчиков со средой интерполируется. Первично по максимальной производной в изменчивости профиля определяется участок, на котором обнаружена(ы) граница(ы) раздела сред. В простейшем случае пропорция между приращениями коэффициентов теплообмена граничного участка с соседними позволяет по линейному закону определить точное мгновенное значение уровня (границы). Различное конструктивное исполнение (размер и количество участков), а также траектория укладки распределенного датчика позволяют достигнуть необходимой точности измерений.

Для измерителя с периодическим нагревом последовательность вычислительных операций осуществляется аналогичным образом, за исключением того, что данные о дискретном профиле теплообмена нагретого и ненагретого распределенного датчика получаются в заданном интервале времени (периоде нагрева–остывания). Этот интервал времени может быть определен экспериментально в зависимости от индивидуальной тепловой инерционности кабеля-датчика и условий теплообмена со средой. Кроме того, при расчетах, полезной составляющей является динамика изменения температуры датчика. Недостатком данного метода является невозможность получения мгновенного значения уровня, поэтому его целесообразно использовать при контроле процессов с относительно слабо выраженной динамикой.

Алгоритмически-программное обеспечение микроконтроллера измерителя и компьютера системы контроля обеспечивает реализацию указанных математических методик. Дополнительно для окончательного расчета уровня используется статистическая коррекция и учет индивидуальных особенностей использования конкретной установки и назначения датчика.




Р и с. 1. Определение профиля коэффициента теплообмена для двух распределенных датчиков температуры (нагретого и ненагретого)

На рис. 3 представлен пример опытных результатов с лабораторным экспериментальным измерителем (рис. 2), построенным на двух распределенных датчиках (пассивном и нагревном), уложенных в трубках длиной по профилю 20 см и внешним диаметром 1 мм. На графике отображена динамика изолиний реальной температуры среды и расчетная граница уровня раздела воздух – вода при заполнении – опорожнении емкости. Программное обеспечение компьютера обеспечивает для пользователя вывод в реальном времени изолиний полей температур и коэффициента теплообмена электронной мерной рейки с внешней средой по всему профилю. Обобщенно, точное значение уровня определяется из соотношения:

$$\frac{dT_{i-1}-dT_i}{dT_{i-1}-dT_{i+1}}, \qquad (1)$$

где

$$dT_i = T_{i\ \text{мгн.нагр.}} - T_{i\ \text{мгн.среды}}, \qquad (2)$$

$T_{i\ \text{мгн.нагр.}}$ – мгновенная температура на $i$-ом участке нагретого распределенного датчика;

$T_{i\ \text{мгн.среды}}$ – мгновенная температура на $i$-ом участке ненагретого распределенного датчика (температура среды).

Погрешность измерения уровня может быть определена в статическом режиме. Для данного прибора она составляет менее 0,1 мм (< 0,5%). На рис. 5 представлен пример графика типовой записи контроля. Погрешность, связанная с инерционностью в основном зависит от инерционности самих распределенных датчиков. Для данного прибора она составляет 1,5 сек.

На рис. 4 представлены опытные результаты работ с экспериментальным измерителем для контроля границ раздела воздух – вода – донные осадочные отложения, построенном на одном распределенном датчике длиной 2 м в защитной металлической трубке внешним диаметром 8 мм. На графике отображена динамика изолиний реальной температуры датчика по профилю при периодическом нагреве–остывании в относительно стационарном режиме. Значение уровня может определяться обобщенно с использованием соотношения (1), где

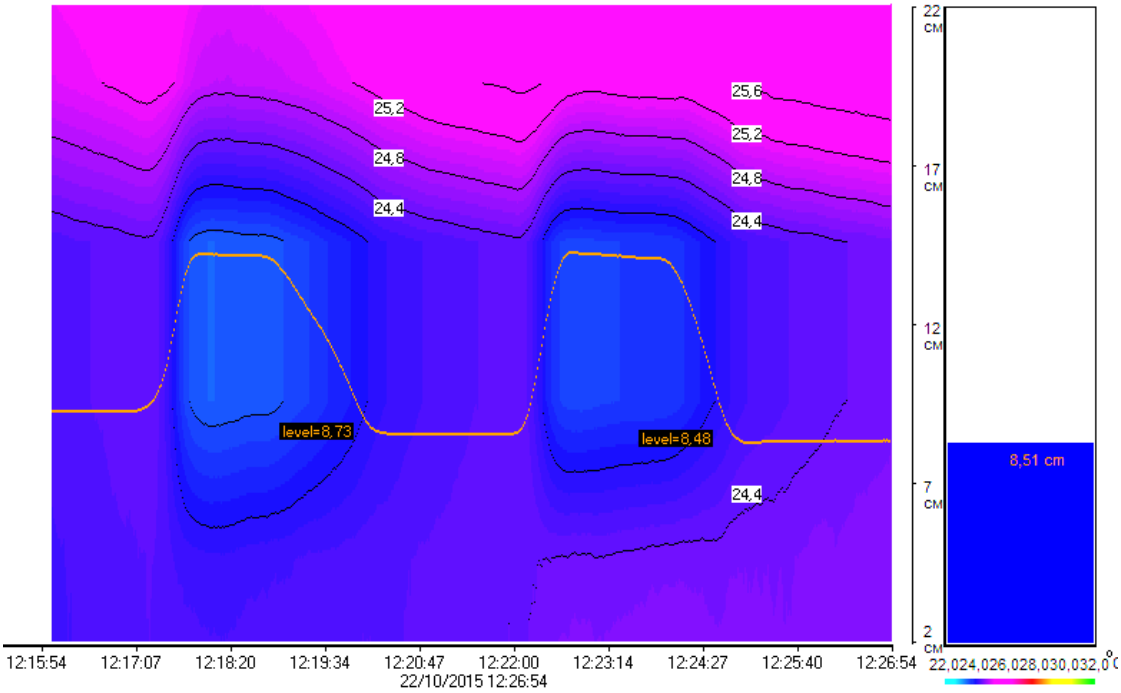
$$dT_i = T_{i\ \text{пер.нагр.}} - T_{i\ \text{пер.среды}}, \qquad (3)$$

$T_{i\ \text{пер.нагр.}}$ – температура на $i$-ом участке распределенного датчика в момент полного нагрева;

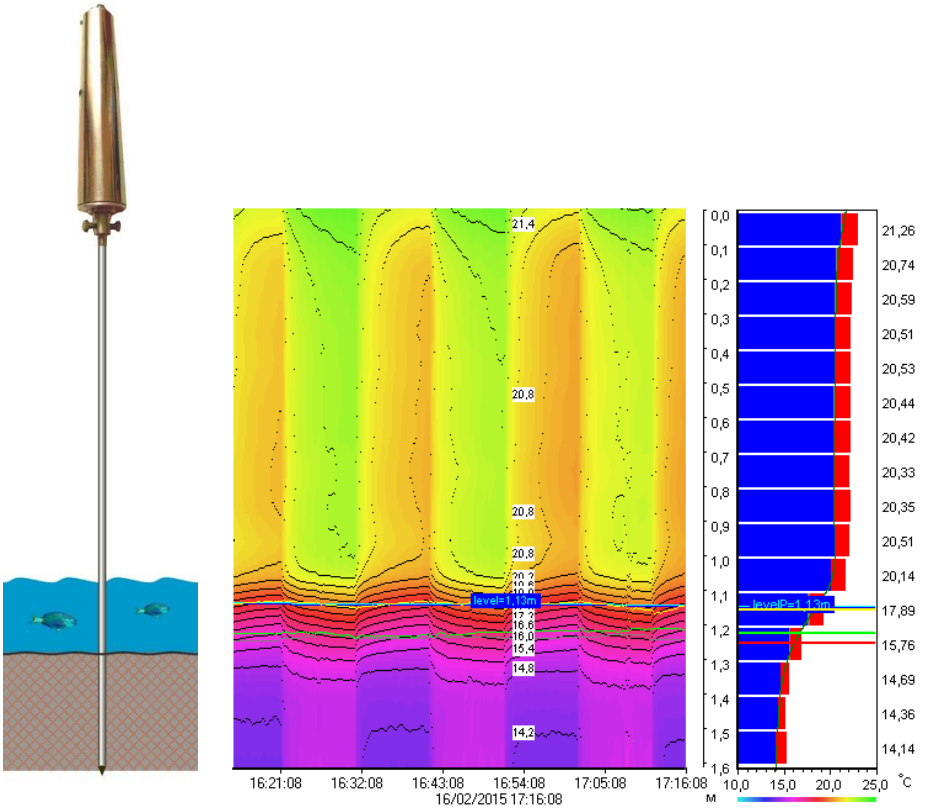
$T_{i\ \text{пер.среды}}$ – температура на $i$-ом участке распределенного датчика в момент полного остывания (температура среды).

Период цикла нагрев – остывание для данного измерителя экспериментально был определен в 10 минут. Это связано с достаточно большой инерционностью защитной оболочки распределенного датчика.

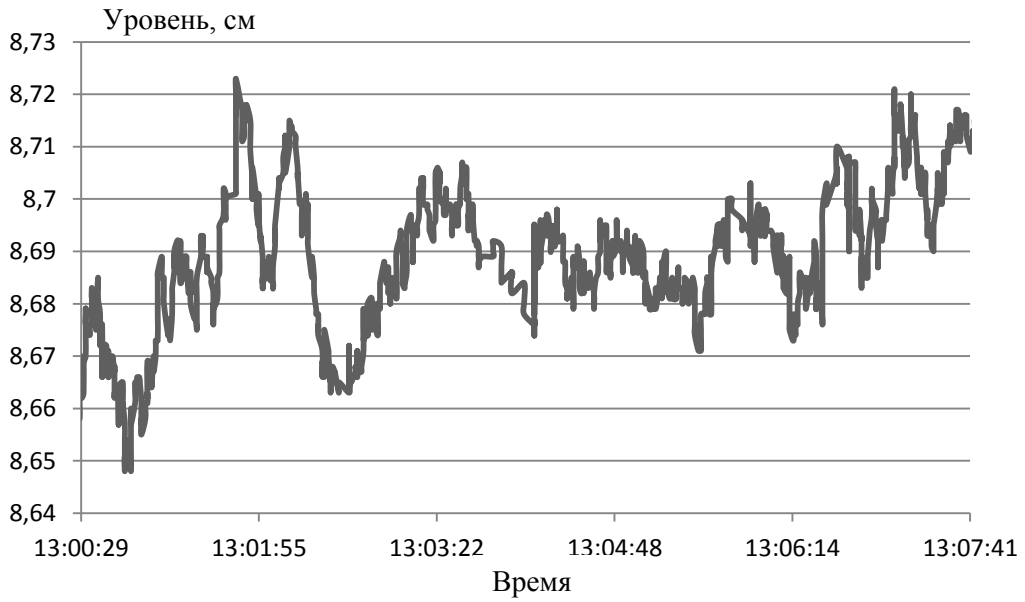
Р и с. 2. Экспериментальный лабораторный измеритель на базе двух распределенных датчиков (нагревного и пассивного) (измерительная база – 20 см)




Р и с. 3. Испытания экспериментального лабораторного измерителя "электронной мерной рейки", построенного на двух датчиках (нагревного и пассивного) (изолинии температуры среды во времени и расчетное значение уровня при частичном заполнении-опорожнении емкости)




Р и с. 4. Испытания экспериментального измерителя "электронной мерной рейки", построенного на одном распределенном датчике с периодическим нагревом (слева – изолинии температуры датчика во времени и результаты измерений границ раздела сред по 4-м методикам, справа – мгновенные, максимальные и минимальные значения дискретных температур по профилю за последний период нагрева с интерполяцией)




Р и с. 5. Пример измерений уровня в емкости (на базисе 20 см) в стационарном режиме (максимальная погрешность – 0,1 мм (0,5%))

**Заключение.** Надежность, долговечность, высокая точность и невысокая стоимость обеспечивают "электронной мерной рейке" перспективную конкурентноспособность. В ряде случаев применение таких измерителей с возможностью одновременного контроля профиля температуры среды и теплообмена не имеет альтернативы. Конструктивные особенности распределенных термопрофилемеров позволяют изготавливать датчики в диапазоне от нескольких см до сотен метров, однако, их применение требует индивидуального подхода в области алгоритмически-программной обработки измерительной информации при окончательном расчете уровня или границ раздела сред.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Гайский В.А., Гайский П.В.* Технологии измерения уровня // Морской гидрофизический журнал. – 2010. – № 4. – С. 58–73. ПЕРЕВОД: V.A. Gaiskii, P.V. Gaiskii Technologies of measurements of the sea level // Physical Oceanography. December 2010. – Vol. 20, Issue 4, pp. 294–307.
2. *Гайский В.А., Гайский П.В.* Модель “электронной мерной рейки” на базе распределенного термопрофилемера // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. – Вып. 16. – С. 9–15.
3. ПАТЕНТ РФ № 2250439. Способ определения положения границ раздела сред. Гайский В.А., Гайский П.В. Опубл. – 20.04.2005. – Бюл. №11.
4. ПАТЕНТ РФ № 2250440. Способ определения положения границ раздела сред. Гайский В.А., Гайский П.В. Опубл. – 20.04.2005. – Бюл. №11.
5. *Забурдаев В.И., Гайский П.В., Логвинчук А.Н.* Требования к метрологическим характеристикам и алгоритмам обработки данных гидростатических измерителей уровня воды // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2002. – Вып. 7. – С. 108–118.
6. *Забурдаев В.И., Гайский П.В., Логвинчук А.Н.* Методические и алгоритмически-метрологические аспекты разработки и эксплуатации гидростатических CTD-измерителей уровня моря // Морской гидрофизический журнал. – 2006. – № 1. – С. 62–76.