

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ЛОКАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ЖИДКОСТИ  
НА ОСНОВЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО МЕТОДА****Ю.Е. Шишкин**

Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

*E-mail: iurii.e.shishkin@gmail.com*

Представлена система для автоматизации измерений локальной плотности жидкости с использованием микроконтроллеров и комплиментарной пары цифровых датчиков гидростатического давления. Применен способ измерения дифференциального давления жидкости как разности показаний герметично изолированных датчиков абсолютного давления газа, расположенных в контрольной и измеряемой среде соответственно. Приведены результаты имитационного моделирования, испытаний на лабораторном стенде и вывод рабочих формул для использования в технических системах измерения на базе предлагаемого подхода. Разработанная система позволила автоматизировать построение профиля локальной плотности жидкости по глубине и увеличить скорость точечных измерений по сравнению с классическими лабораторными методами.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, морская среда, локальная плотность жидкости, автоматизация измерений, экспресс анализ.

Поступила в редакцию: 10.08.2023. После доработки: 01.09.2023.

**Введение.** Одной из важнейших задач экологического и промышленного мониторинга является контроль состояния природных вод. Автоматизация измерения плотности жидкости, как ключевого параметра, определяющего ее физические свойства, необходима для обнаружения в ней неоднородностей естественной и антропогенной природы [1–3]. Для решения этой задачи разработаны различные технические и методические средства, такие как косвенные методы измерения плотности жидкости, SVP и ареометры для полевых и лабораторных условий соответственно, однако в большинстве своем они имеют ограничения в точности, удобстве и быстродействии [4–6]. В статье представлено развитие подхода к измерению плотности жидкости на основе использования комплиментарной пары датчиков гидростатического давления и анализа разности их показаний, который позволил упростить конструкцию прибора на его основе и увеличить его чувствительность за счет уменьшения диапазона рабочих глубин. Дифференциальное давление жидкости, являющееся основным параметром характеризующем локальную плотность, измеряется как разность по-

казаний герметично изолированных датчиков абсолютного давления газа, расположенных в контрольной и измеряемой среде соответственно. Примененный подход обеспечивает более высокую технологичность и экономичность изготовления измерителей плотности для малых глубин, сохраняя при этом приемлемую точность и более высокую скорость измерений по сравнению с классическими методами что критически важно для автоматизации съема, передачи и регистрации данных лабораторных измерений. Описанная в статье технология может найти широкое применение в различных отраслях экологического и промышленного мониторинга, обнаружения аномалий в водной среде, контроля технологических процессов и обеспечивает снижение влияния человеческой ошибки на измерения [7–9].

**Прототипы и методы решения задачи автоматизации.** В качестве прототипа использован базовый измеритель [10], включающий в себя дифференциальный датчик давления и систему перекачки жидкости [11]. Для измерений дифференциального давления использована комплементарная пара герметизированных датчиков абсолютного давле-

ния газа, разделенных перегородкой отделяющей эталонную и тестовую жидкости. Для регистрации цифровых показателей давления, температурной компенсации и расчета локальной плотности использован энергоэффективный микроконтроллер ESP8266. Собран экспериментальный стенд измерения локальной плотности жидкости на основе базового измерителя с использованием двух датчиков абсолютного давления и ПК для визуализации его показаний. Подготовлены образцы жидкостей с различной заведомо известной соленостью для калибровки датчиков давления, измерения плотности жидкости на экспериментальном стенде. Дополнительно использованы данные канала измерения температуры для компенсации температурного дрейфа измерений плотности.

В ходе экспериментов была определена зависимость между разностью давления жидкости в эталонной и тестовой областях и ее плотностью, эта зависимость в общем виде была использована для проведения автоматизированного измерения локальной плотности жидкости в лабораторных условиях.

**Базовая система и ее модель измерителя локальной плотности.** Оригинальная система использует цилиндр с эталонной жидкостью и датчик дифференциального давления, разделяющий области эталонной и измеряемой среды, предназначенный для работы в узком диапазоне разностных давлений на больших глубинах [12, 13]. Такие датчики являются довольно специфическими ввиду особых условий эксплуатации при больших давлениях и имеют крайне высокую стоимость что не позволяет их использовать в квази-одноразовых устройствах [14–16]. Тем не менее данная система направлена на обеспечение точных измерений плотности жидкости в широком диапазоне глубин и решает задачу эффективного экологического мониторинга в морской среде.

Основной проблемой такой системы является ее высокая стоимость из-за специфических датчиков дифференциального давления, больших размеров и массы, и низкой разрешающей способности по глубине из-за больших габаритов бака с эталонной жидкостью, что

затрудняет ее использование в качестве одноразового устройства для промышленных и научных целей [17, 18]. Существенной проблемой существующих лабораторных технических решений для обнаружения аномалий неоднородности плотности жидкости на базе эталонов является необходимость использования человеческих ресурсов для проведения измерений, что приводит к проблемам связанных с человеческим фактором: ошибкам при измерениях, несоответствиям условий измерений стандартным требованиям (температура, давление, вибрация) и др. [19, 20].

**Развитие структуры и параметров автоматизированной системы измерения локальной плотности.** Предлагаемая автоматизированная система оснащена герметизированными датчиками абсолютного давления газа что подходит для работы в более узком диапазоне глубин и направлена на измерение плотности жидкости в лабораторных условиях в режиме реального времени, что актуально при мониторинге и контроле плотности жидкости в промышленных процессах, экологическом мониторинге в морских условиях. Данный подход отличается от базового подхода тем, что используется пара датчиков абсолютного давления воздуха и датчик температуры, подключенные к микроконтроллеру. Датчики воздушного давления рассчитаны на меньший диапазон рабочих глубин, как правило до 2 метров водного столба, но обладают соразмерно более высокой разрешающей способностью. Это позволяет уменьшить минимально необходимый размер контейнера с эталонной жидкостью, повысить точность измерений плотности за счет температурной компенсации в режиме реального времени и обеспечить эффективный мониторинг природных и технических систем.

**Лабораторная установка автоматизированной системы измерения плотности.** В лабораторной установке использованы герметизированные чувствительные датчики атмосферного давления, что позволило за счет уменьшения максимальной рабочей глубины сократить минимальную длину колбы с эталонной жидкостью. Герметизация осуществлена за счет силиконовых мем-

бран, которые не позволяют соленой жидкости повредить чувствительные элементы датчиков при этом беспрепятственно передавая давление на них, за мембраной может быть помещено масло для улучшения передачи давления. Дифференциальное давление, используемое в расчетных формулах, получается путем вычитания показаний абсолютно-го давления датчиков. Лабораторная установка состоит из компонентов, показанных на рис. 1.

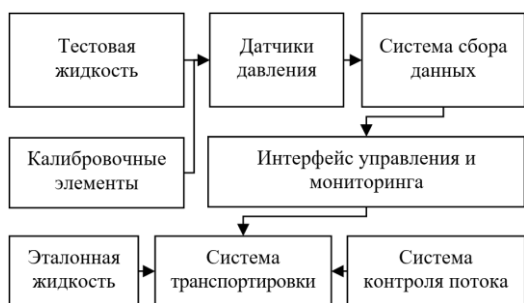


Рис. 1. Компоненты лабораторной установки и связи между ними

Fig. 1. Components of the laboratory setup system and their connections

Компоненты лабораторной установки представим в виде набора функциональных блоков а)–д):

а) Датчики давления – ВМР280. Диапазон рабочих давлений 300–1100 гПа, относительная точность  $\pm 0.12$  гПа. Эти датчики, защищенные силиконовыми мембранами, располагаются внутри пути потока жидкости. Датчики выбираются экспертом с учетом их чувствительности, точности и требуемого рабочего диапазона так, чтобы обеспечивались надежные и точные измерения дифференциального давления на требуемой глубине;

б) Система контроля потока – RS-360S. Напряжение V: 4–12 В, выходная мощность: 3–9 Вт, производительность 240 л/ч. Используется погружной насос, предназначенный для работы в агрессивной среде, какой является морская вода и другие коррозионные жидкости. Совместно с измерителем скорости потока они обеспечивают поддержание постоянной скорости потока жидкости во время измерений. Система состоит из клапанов для регулирования потока,

датчиков скорости потока, насоса и механизма управления;

в) Система сбора и передачи данных на базе микроконтроллера ESP8266. Использование контроллера со встроенным WiFi, позволяет создавать пользовательские интерфейсы и интегрировать такие системы с ПК в беспроводном режиме. Модуль играет ключевую роль в захвате, обработке и анализе данных, полученных от датчиков дифференциального давления, температуры, калибровочных таблиц и других сопутствующих инструментов. Включает в себя 10-битный аналого-цифровой преобразователь, модули передачи данных и пользовательский интерфейс. Система дублирует во внутреннюю память разницу давлений, температуру и другие параметры, необходимые для расчета плотности. Такое сочетание модулей позволяет осуществлять мониторинг данных в режиме реального времени, сохранять и анализировать их впоследствии. Показания датчика температуры среды используются для коррекции температурных дрейфов датчиков в системе расчетов;

г) Эталонная жидкость – физрастворы 1%, 2%, 4%, дистиллированная вода и другие калибровочные жидкости. Подбираются с учетом рабочего диапазона плотности измеряемой жидкости. Такие стандарты являются сертифицированными веществами с заведомо известными плотностями и служат опорными точками для калибровки системы и обеспечения точности измерений. Кроме того, одна из калибровочных жидкостей используется в качестве эталона в самом приборе. Выбор жидкости осуществляется таким образом, чтобы ее плотность, по возможности, была равна плотности измеряемой водной среды;

д) Интерфейс управления и мониторинга – программа на основе Python 3.10. Предоставляет интерфейс для мониторинга и управления компонентами автоматизированной системы и позволяет оператору устанавливать такие параметры, как скорость потока, начало и окончание измерений, объем

выборки, а также просматривать все данные измерителя в режиме реального времени. Интерфейс осуществляет простое и понятное графическое отображение состояния системы, обеспечивая эффективное управление системой и мониторинг хода экспериментов.

В результате интеграции этих компонентов в лабораторную установку полученная автоматизированная система обеспечивает надежное и точное решение задачи измерения локальной плотности жидкости. Конкретный набор используемых в лабораторной установке чувствительных элементов представлен для примера в рамках общей предлагаемой концепции, конечная же реализация для других начальных условий может отличаться с учетом данных выше рекомендаций.

**Математическая модель системы измерения плотности.** Построим систему уравнений (1) для использования в устройствах измерения плотности в соответствии с уравнением гидростатики для системы со структурой на рис. 2.

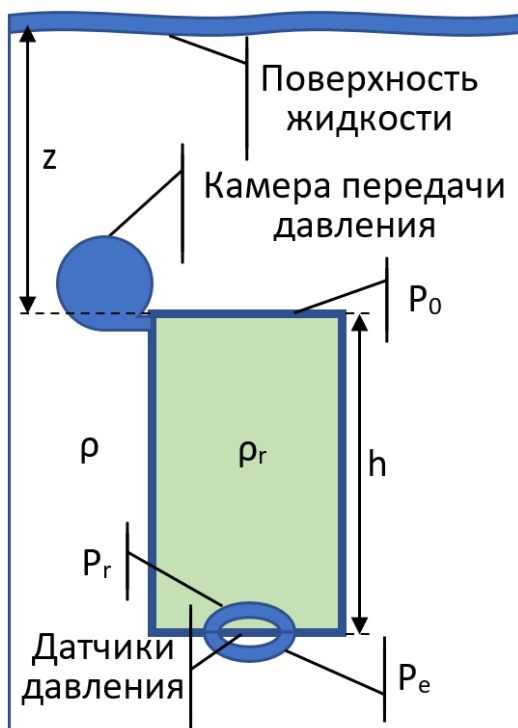


Рис. 2. Схематическое изображение структуры измерителя локальной плотности жидкости

Fig. 2. Schematic representation of a liquid local density meter structure

Для этого в первом уравнении выразим давление в нижней области цилиндра с эталонной жидкостью и во втором – давление в измеряемой области вне устройства, но на той же глубине. В модели будем считать, что на измеритель оказывается внешнее давление  $P_0$ , включающее в себя атмосферное давление и давление колонны воды на устройство:

$$\begin{cases} P_r = \rho_r g(\varphi, z)h + P_0 \\ P_e = \rho g(\varphi, z)h + P_0 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\rho_r$  – плотность эталонной жидкости,  $\rho$  – плотность измеряемой жидкости,  $P_r$  – давление на датчик в области с эталонной жидкостью,  $P_e$  – давление на датчик в области измеряемой жидкости,  $h$  – высота цилиндра с калибровочной жидкостью,  $g(\varphi, z)$  – ускорение свободного падения в географической точке измерения с широтой  $\varphi$  и глубиной  $z$ .

Затем, вычитая уравнения системы (1), получаем дифференциальное давление на датчиках внутри и вне устройства

$$\rho_r g(\varphi, z)h - \rho g(\varphi, z)h + (P_0 - P_0) = P_r - P_e.$$

В результате получим выражение для расчета локальной плотности жидкости при известных давлениях  $P_r$ ,  $P_e$  и высоте устройства  $h$

$$\rho = \frac{\rho_r g(\varphi, z)h - (P_r - P_e)}{g(\varphi, z)h} = \rho_r - \frac{P_r - P_e}{g(\varphi, z)h}. \quad (2)$$

Примечательно, что внешнее давление  $P_0$  вычитается из уравнения и не участвует в расчетах. Стоит отметить, что параметр  $g$  зависит от места проведения измерений и не может быть определен по таблицам с необходимой точностью. Поэтому в выражении оно определяется во время калибровки как  $g(\varphi, z)$  с помощью следующей методики: поместить устройство в эталонную жидкость с известными характеристиками (с плотностью  $\rho_e$ ), выразить разницу плотностей в виде уравнения (3) подставив известную плотность  $\rho_e$  вместо  $\rho$ , получив уравнение (4), по которому и определяется параметр  $g$ :

$$\rho - \rho_r = -\frac{P_r - P_e}{g(\varphi, z)h}, \quad (3)$$

$$g(\varphi, z) = -\frac{P_r - P_e}{(\rho - \rho_r)h}. \quad (4)$$

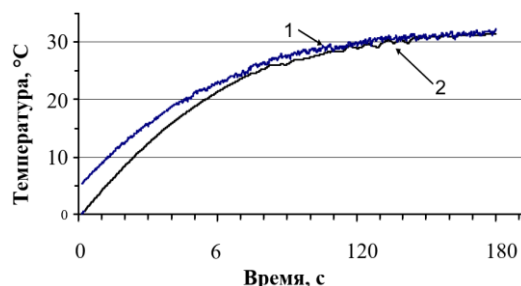
Таким образом при известных свойствах эталонной жидкости и габаритных размерах устройства получено уравнение для выражения локальной плотности жидкости  $\rho$  через значения датчиков давления  $P_r$  и  $P_e$ .

**Экспериментальные исследования динамики автоматизированных процессов измерений и анализ их результатов.** Проводимый ряд модельных экспериментов для оценки сходимости показателей автоматизированной системы измерения плотности жидкости осуществлялся путем последовательного перебора различных жидкостей с известными значениями плотности и температуры. Система регулирования потока обеспечивает постоянную скорость потока во время каждой итерации эксперимента, а модуль сбора данных и последующей обработки позволили проводить расчеты плотности в реальном времени.

При полностью погруженном закрытом объеме с эталонной жидкостью, в случае если ее плотность выше таковой у измеряемой жидкости, на внутреннем датчике создается более высокое давление чем на внешнем датчике, и наоборот, что позволяет определять плотность как на поверхности жидкости, так и на небольших глубинах. Ограничения глубины связаны с тем, что датчики атмосферного давления при своей высокой чувствительности не приспособлены к работе создаваемой столбом жидкости более 2 м.

Для коррекции температуры температурного дрейфа осуществляется измерение температуры датчика с погрешностью  $\pm 0,01^\circ\text{C}$  и выдержкой до 1 минуты. На рис. 3 показана временная характеристика запаздывания показаний датчика линия-1 от фактической температуры линия-2. Как можно видеть показания датчика имеют временную задержку относительно фактиче-

ских условий среды, что должно быть учтено при расчетах путем упреждения, либо устройство должно выдерживаться в среде в течение достаточного периода времени пока его показания не стабилизируются.

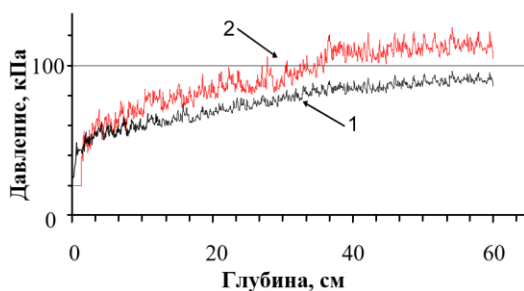


**Рис. 3.** Результаты моделирования зависимости показаний канала температуры и фактической температуры водной среды от времени

**Fig. 3.** Results of modeling the dependence of temperature channel readings and the actual temperature of the aquatic environment over time

Для оценки сходимости измерений проведены статистические исследования данных мониторинга давления при известных начальных условиях. При погружении устройства выходные сигналы датчиков давления приняли вид, показанный на рис. 4. Линия-1 показывает зависимость показаний датчика давления, расположенного снаружи устройства при погружении его на дно лабораторного контейнера глубиной 60 см, а линия-2 отображает аналогичную зависимость датчика, расположенного внутри цилиндра с эталонной жидкостью. По степени расхождения между этими показаниями, после выполнения температурой компенсации, определяется непосредственно измеренная плотность жидкости по формуле (2).

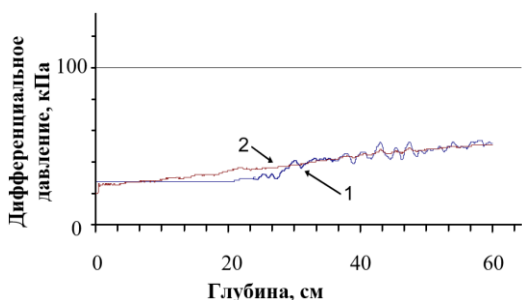
Как уже упоминалось ранее, флуктуации разности давлений могут быть вызваны аномалиями плотности жидкости, обусловленными градиентом температуры по глубине или присутствием примесей. Так как эксперимент проводился при идеальных условиях, можно предположить, что причина расхождения связана с инерционными свойствами средств измерений, а именно канала измерения температуры.



**Рис. 4.** Экспериментальная зависимость показаний датчиков давления в водной среде и в цилиндре с эталонной жидкостью

**Fig. 4.** Experimental dependence of readings of pressure sensors in an aqueous medium and in a cylinder with a reference liquid

Это хорошо прослеживается на экспериментальных результатах, представленных на рис. 5, где линия-1 показывает измерения без введенных коррекций и подвержена флуктуациям, в то время как линия-2 отображает дифференциальное давление при медленном погружении датчика достаточном для работы системы в устоявшемся режиме, с выполнением температурной коррекции.



**Рис. 5.** Результаты экспериментального определения дифференциального давления, и его коррекции с использованием канала температуры

**Fig. 5.** Results of experimental determination of differential pressure and its correction using the temperature channel

Математическое моделирование продемонстрировало достижимую точность измерения плотности жидкости в размере 0,05%, и в целом двухсенсорная модель автоматизированной системы измерения показала свою эффективность для решения целевой задачи. Интеграция комплекса датчиков дифференциального давления, системы контроля потока и системы сбора данных

позволила осуществлять мониторинг и расчеты локальной плотности в реальном времени. Проведенные эксперименты продемонстрировали продуктивность системы при решении задачи измерения плотности жидкости в лабораторных условиях.

**Закключение.** В процессе исследования предложена новая модель автоматизированной системы измерения плотности жидкости на основе метода измерения дифференциального давления, отличающаяся от известных, использованием двух датчиков абсолютного давления газа и температуры что в совокупности с другими решениями позволило значительно повысить технологичность измерителей, изготавливаемых на ее основе. В эту систему входит пара прецизионных датчиков для оценки дифференциального давления, система контроля потока, система сбора данных, калибровочные стандарты, система хранения и доставки жидкости, а также программный интерфейс управления и мониторинга.

Результаты математического моделирования показали эффективность и точность этой системы в измерении плотности жидкости на уровне 0,05% что является хорошим показателем для таких типов устройств. Контроллер, использованный в устройстве, имеет интегрированный интерфейс WiFi и передает данные на сервер в режиме реального времени, обеспечивая прямой доступ к полученным данным через веб-интерфейс любого портативного или стационарного устройства.

Эксперименты, проведенные с использованием автоматизированной системы, позволили получить точные и воспроизводимые измерения плотности при контролируемых условиях на стандартных калибровочных жидкостях.

Хотя система разработана в первую очередь для работы в лабораторных условиях, она также позволяет собирать локальные профили плотности на малых глубинах до 2 м. Точность измерений составляет 0,05% для плотности и  $\pm 0,01^\circ\text{C}$  для температуры.

Дальнейшие исследования и разработки направлены на расширение функциональных возможностей системы при сохранении уровня автоматизации в дальнейших исследованиях, на оптимизацию программного обеспечения в его алгоритмической части, и интеграцию дополнительных датчиков для одновременной регистрации нескольких физико-химических параметров. Эти усовершенствования позволят увеличить гибкость и применимость системы в широком спектре задач химической, нефтегазовой промышленности и экологического мониторинга.

*Работа выполнена по госбюджетной теме ИПТС «Разработка новых средств и измерительных информационных технологий исследований природных вод» (№ госрегистрации 121122300070-9).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Краснодубец Л.А.* Многоцелевая информационно-измерительная система для вертикального профилирования океанской среды // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 1 (43). С. 54–60.
2. *Федотов Г.А.* О точности определения плотности морской воды с помощью новой модификации гидростатического метода // Труды всероссийской конференции "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики". 2016. № 13. С. 205–208.
3. *Акуличев В.А., Буланов В.А.* Исследования неоднородностей морской среды методами акустического зондирования // Дальневосточные моря России. Москва, 2007. С. 129–231.
4. *Майоров Е.В., Онищук В.А.* Об инерционном способе одновременного измерения массового расхода жидкости и ее плотности // Прикладная физика. 2005. № 6. С. 18–23.
5. *Жиляев О.В.* Инерционный способ измерения расхода и плотности среды // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2019. № 1 (85). С. 22–31.
6. *Вакуумный двухкапиллярный пикнометр для прецизионных измерений плотности жидкостей в широкой области температур / А.Б. Батокович, З.А. Кегадуева, В.Г. Горчханов [и др.] // Приборы. 2013. № 11 (161). С. 18–23.*
7. *Ермолаев А.Н., Мельничук О.В.* Современные средства измерения плотности жидких дисперсных сред // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2017. Т. 13. № 4. С. 92–97.
8. *Применение фильтра Калмана при измерении уровня и плотности жидкости с помощью двух датчиков давления / А.Л. Шестаков, А.С. Семенов, И.Г. Корепанов [и др.] // Измерительная техника. 2007. № 6. С. 45–49.*
9. *Шишкин Ю.Е., Скاتков А.В.* Информационные технологии обнаружения аномалий в мониторинговых наблюдениях: монография. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2019. 368 с. ISBN 978-5-907198-32-6. DOI: 10.33075/978-5-907032-64-4.
10. *Гайский В.А.* Измеритель плотности жидкости и его варианты // Патент на изобретение РФ № 2792263; опубл. 21.03.2023, Бюл. № 9.
11. *Гайский В.А.* Способ измерения давления жидкости или газа и устройство для его осуществления // Патент на изобретение РФ № 2789106; опубл. 30.01.2023, Бюл. № 4.
12. *Галкин А.С., Лакеев А.И., Пискунов Н.Д.* Устройство для измерения уровня и плотности жидкости (варианты) // Патент на изобретение РФ № 2285908; опубл. 20.10.2006, Бюл. № 15.
13. *Федотов Г.А.* Новая модификация гидростатического метода определения плотности морской воды // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2013. Т. 6. № 1. С. 58–65.
14. *Гащенко Ю.В., Астапов В.Н.* Аналитический обзор и исследование устройств и методов измерения плотности жидкости // Научное обозрение. Технические науки. 2019. № 6. С. 21–27.
15. *Мамедов У.Г.О.* Комбинированное устройство для определения плотности и вязкости нефти на потоке // Датчики и системы. 2009. № 12. С. 7–11.

16. Гусейнов Т.К., Абдулова Н.А. Однотрубный резонатор с точечными массами для вибрационно-амплитудного плотномера жидкости // Современные технологии в нефтегазовом деле – 2017. сборник трудов международной научно-технической конференции в 2-х томах. 2017. С. 122–125.

17. Федотов Г.А. О влиянии конфигурации и ориентации системы датчиков давления на точность измерения плотности морской среды гидростатическим методом // Управление в морских системах (УМС-2022). 15-я Мультиконференция по проблемам управления. Материалы конференции. СПб. 2022. С. 110–113.

18. Краснодубец Л.А., Пеньков М.Н. Компьютерное моделирование гидростатического измерителя плотности мор-

ской воды // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 1 (39). С. 71–76.

19. Шишкин Ю.Е., Скاتков А.В. Программно-аппаратный модуль поддержки принятия решений о наличии качественных аномальных изменений в выборочных данных на базе информационных метрик / Системы контроля окружающей среды. 2021. № 2 (44). С. 142–151. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-2-142-151.

20. Мера Кульбака в задачах динамической кластеризации наблюдений состояния окружающей среды / А.В. Скатков, А.А. Брюховецкий, Д.В. Моисеев [и др.] // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 3 (37). С. 35–38. DOI: 10.33075/2220-5861-2019-3-35-38.

## LIQUID LOCAL DENSITY MEASUREMENT AUTOMATION BASED ON THE HYDROSTATIC METHOD

Y.E. Shishkin

Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

The article presents a developed automated system for measuring local fluid density using a complementary pair of hydrostatic pressure sensors. The method of measuring differential pressure is applied as the difference in readings of sealed absolute pressure gas sensors located in the control and measured environments, respectively. The article provides results of simulation modeling, laboratory testing, and derivation of working formulas for use in technical measurement systems based on the proposed approach. The proposed system has allowed for automating the construction of a local fluid density profile with depth and increasing the speed of point measurements compared to classical laboratory methods.

**Keywords:** mathematical modeling, marine environment, local liquid density, measurement automation, express analysis.

## REFERENCES

1. *Krasnodubets L.A.* Multifunctional information-measuring system for vertical profiling of the oceanic environment). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2021, No.1 (43), pp. 54–60.

2. *Fedotov G.A.* On the accuracy of determining the density of seawater using a new modification of the hydrostatic method). *Prikladnye tehnologii gidroakustiki i gidrofiziki*, 2016, No.13, pp. 205–208.

3. *Akulichev V.A. and Bulanov V.A.* Investigations of inhomogeneities in the marine environment using acoustic sounding). *Dalnevostochnye morya Rossii*. Moscow, 2007, pp. 129–231.

4. *Mayorov E.V. and Onishchuk V.A.* On the inertial method of simultaneous meas-



urement of the mass flow rate of liquid and its density). *Prikladnaya fizika*, 2005, No. 6, pp. 18–23.

5. Zhilyaev O.V. Inertsionnyy sposob izmereniya raskhoda i plotnosti sredy (Inertial method of measuring the flow rate and density of the medium). *Vestnik Ulyanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2019, No. 1 (85), pp. 22–31.

6. Batokovich A.B., Kegadueva Z.A., and Gorchkhanov V.G. Vakuurnyy dvukhkapillyarnyy piknometr dlya pretsizionnykh izmereniy plotnosti zhidkostey v shirokoy oblasti temperatur (Vacuum dual-capillary pycnometer for precision measurements of liquid densities over a wide temperature range). *Pribory*, 2013, No. 11 (161), pp. 18–23.

7. Ermolaev A.N. and Melnichuk O.V. Sovremennyye sredstva izmereniya plotnosti zhidkikh dispersnykh sred (Modern means for measuring the density of liquid dispersed media). *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy*, 2017, Vol. 13, No. 4, pp. 92–97.

8. Shestakov A.L., Semenov A.S., and Korepanov I.G. Primenenie filtra Kalmana pri izmerenii urovnya i plotnosti zhidkosti s pomoshchyu dvukh datchikov davleniya (The use of the Kalman filter in measuring the level and density of liquid using two pressure sensors). *Izmeritel'naya tekhnika*, 2007, No. 6, pp. 45–49.

9. Shishkin Iu.E. and Skatkov A.V. *Informatsionnye tekhnologii obnaruzheniya anomalii v monitoringovykh nablyudeniyyakh: monografiya* (Information technologies for anomaly detection in monitoring observations: monograph). Simferopol: IT "ARIAL", 2019, 368 p.

10. Gayskiy V.A. Izmeritel' plotnosti zhidkosti i ego varianty (Liquid density meter and its variants). Patent na izobreteniye RF №. 2792263; opubl. 21.03.2023, Byul. № 9. (Invention patent RF No. 2792263; publ. 21.03.2023, Bull. No. 9).

11. Gayskiy V.A. Sposob izmereniya davleniya zhidkosti ili gaza i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya (Method for measuring the pressure of liquid or gas and device for its implementation). Patent na izobreteniye RF № 2789106; opubl. 30.01.2023, Byul. № 4. (Invention patent RF No. 2789106; publ. 30.01.2023, Bull. No. 4).

12. Galkin, A.S., Lakeev, A.I., and Piskunov, N.D. Ustroystvo dlya izmereniya urovnya i plotnosti zhidkosti (v variantakh) (Device for measuring the level and density of liquid (variants)). Patent na izobreteniye RF № 2285908; opubl. 20.10.2006, Byul. № 15. (Invention patent RF No. 2285908; publ. 20.10.2006, Bull. No. 15).

13. Fedotov G.A. Novaya modifikatsiya gidrostaticheskogo metoda opredeleniya plotnosti morskoy vody (New modification of the hydrostatic method for determining the density of seawater). *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2013, Vol. 6, No.1, pp. 58–65.

14. Gashenko Yu.V. and Astapov V.N. Analiticheskiy obzor i issledovanie ustroystv i metodov izmereniya plotnosti zhidkosti (Analytical review and study of devices and methods for measuring the density of liquid). *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki*, 2019, No. 6, pp. 21–27.

15. Mamedov U.G.O. Kombinirovannoe ustroystvo dlya opredeleniya plotnosti i vyazkosti nefti na potok (Combined device for determining the density and viscosity of oil in flow). *Datchiki i sistemy*, 2009, No. 12, pp. 7–11.

16. Guseinov T.K. and Abdulova N.A. Odnorubnyy rezonator s tochechnymi massami dlya vibratsionno-amplitudnogo plotnomera zhidkosti (Single-pipe resonator with point masses for vibrational-amplitude fluid densitometer). *Sovremennyye tekhnologii v neftegazovom dele–2017*. Sbornik trudov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii v 2-x tomakh, 2017, pp. 122–125.

17. Fedotov G.A. O vliyanii konfiguratsii i orientatsii sistemy datchikov davleniya na tochnost izmereniya plotnosti morskoy sredy gidrostaticheskim metodom (On the influence of the configuration and orientation of the pressure sensor system on the accuracy of measuring the density of the marine environment by the hydrostatic method). *Upravlenie v morskikh sistemakh (UMS-2022)*. 15-ya Multykonferentsiya po problemam upravleniya. Materialy konferentsii. SPb, 2022, pp. 110–113.

18. *Krasnodubets L.A. and Pen'kov M.N.* Komp'yuternoe modelirovanie gidrostaticheskogo izmeritelya plotnosti morskoy vody (Computer modeling of the hydrostatic water density meter). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2020, No.1 (39), pp. 71–76.

19. *Shishkin Iu.E. and Skatkov A.V.* Programmo-apparatnyy modul' podderzhki prinjatiya resheniy o nalichii kachestvennykh anomal'nykh izmeneniy v vyborochnykh dannykh na baze informatsionnykh metrik (Software-hardware module for decision support on the presence of qualitative anomalous changes in selected data based on information metrics). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2021, No. 2 (44), pp. 142–151.

20. *Skatkov A. V., Bryukhovetskiy A. A., and Moiseev D. V.* Mera Kul'baka v zadachakh dinamicheskoy klasterizatsii nablyudeniy sostoyaniya okruzhayushchey sredy (Kul'bak's Entropy in Dynamic Clustering Problems of Environmental Observations). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2019, No. 3 (37), pp. 35–38. DOI: 10.33075/2220-5861-2019-3-35-38.