

Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ “Военно-морская академия”,
г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Дано краткое описание нового метода определения плотности морской воды. Метод основан на совместной обработке сигналов четырех датчиков давления, расположенных в вершинах треугольной пирамиды. При этом важно, что выходной сигнал системы датчиков потенциально не зависит от ее ориентации в поле силы тяжести. Предложенный гидростатический измеритель рассмотрен в качестве возможного примера использования оригинальной научной идеи в качестве учебного материала.

Ключевые слова: научная идея; учебный материал; плотность морской среды; гидростатический измеритель; датчик давления

1. Введение

Данная работа является логическим продолжением предыдущей работы автора [1]. В ней рассматривается ещё один пример возможного использования оригинальной научно-технической идеи в качестве учебного материала на лекциях и практических занятиях по физике. Нисколько не умаляя важности изучения традиционного курса физики в процессе фундаментальной подготовки специалистов в технических вузах, следует снова (как и в [1]) подчеркнуть важность ознакомления обучающихся с новыми научными результатами, полученными в последние годы, но не вошедшими пока в учебную и методическую литературу по физике.

Одна из трудностей, возникающих при реализации подобных планов, заключается в правильном выборе указанных выше новых научно-технических идей. Необходимым условием рационального выбора является простота выбранной идеи, обеспечивающая ясность её изложения (преподавателем) и восприятия (студентами). Другое важное требование к выбору темы – это понимание актуальности и практической ценности рассматриваемой физической идеи, что повышает интерес к ней с обеих сторон образовательного процесса – и со стороны преподавателей, и со стороны студентов. Ведь интерес, как известно [2], представляет собой базовую эмоцию, составляющую основу познавательной деятельности.

Указанным условиям и требованиям удовлетворяет идея, лежащая в основе новой модификации гидростатического метода определения плотности морской воды [3].

Прямое оперативное измерение плотности морской среды в натуральных условиях – важная задача прикладной гидрофизики. Особая роль гидрофизического поля плотности заключается в том, что именно оно определяет силовое воздействие со стороны жидкости на погружённые/обтекаемые тела. Кроме того, информация о плотности является основой для вычисления характеристик других гидрофизических полей, входящих в уравнение состояния морской среды, уточнение которого является задачей, сохраняющей непреходящее значение в океанологии.

2. Содержание проблемы

Один из существующих в настоящее время методов определения плотности жидкости – гидростатический метод. Он основан на том, что давление в жидкости изменяется с глубиной, причем перепад давления на верхней и нижней границах столба жидкости пропорционален плотности жидкости. Отсюда следует рабочая формула метода:

$$\rho = \frac{|gradP|}{g}. \quad (1)$$

Здесь ρ – искомая плотность жидкости, $|gradP|$ – модуль вектора градиента гидростатического давления, g – ускорение свободного падения.

Для реализации классического варианта гидростатического метода необходимо иметь два датчика давления, расположенных на заданном расстоянии друг от друга. Если прямолинейный отрезок,

соединяющий чувствительные элементы датчиков (ось системы датчиков), ориентирован вертикально, то

$$\rho = \frac{P_1 - P_2}{gl}. \quad (2)$$

Здесь P_1 и P_2 – показания датчиков, расположенных на большей и меньшей глубине соответственно, l – расстояние между датчиками. Если же ось системы двух датчиков ориентирована не вертикально, то равенство (2) не выполняется и возникает проблема: появляется связанная с этим дополнительная погрешность определения плотности, которая может достигать значений, недопустимо больших для решения конкретной задачи.

3. Решение проблемы

В работе [3] предложен гидростатический измеритель плотности морской воды, представляющий собой систему четырёх жестко связанных датчиков давления, не лежащих в одной плоскости. Искомая плотность определяется путём совместной обработки сигналов датчиков, образующих систему. Важнейшей особенностью предложенного измерителя является его потенциальная нечувствительность к наклону в морской среде, что расширяет функциональные возможности гидростатического метода и повышает точность определения плотности воды в реальных условиях.

В основу работы измерителя положено выражение для плотности жидкости (1), которое следует из условия равновесия несжимаемой жидкости во внешнем гравитационном поле. Плотность морской воды ρ определяется по измеренному модулю вектора градиента гидростатического давления в воде $|\text{grad}P|$ и по известной величине ускорения свободного падения g . Следовательно, в рамках принятой модели задача определения плотности воды сводится фактически к определению модуля вектора градиента гидростатического давления в воде.

Согласно изложенной в [3] методике, величина $|\text{grad}P|$ определяется по измеренным ортогональным проекциям b_1, b_2, b_3 вектора градиента давления на оси косоугольной системы координат $O\xi, O\eta, O\zeta$, если известны углы $\alpha_{12}, \alpha_{13}, \alpha_{23}$ между положительными направлениями этих осей. Следующие соотношения позволяют экспериментально определить величины b_i ($i = 1, 2, 3$):

$$b_i = \frac{\Delta P_i}{l_i} = \frac{P_i - P_0}{l_i}. \quad (3)$$

Здесь l_i – координаты входа i -го датчика давления: $l_1 = \xi_1, l_2 = \eta_2, l_3 = \zeta_3$, при условии, что вход нулевого датчика расположен в начале координат. P_i – значение давления на входе i -го датчика. Расстояния между чувствительными элементами датчиков давления l_1, l_2, l_3 и углы $\alpha_{12}, \alpha_{13}, \alpha_{23}$ выбираются с учетом требований, обусловленных конструктивными особенностями используемых датчиков давления и носителя гидрофизической аппаратуры.

Рабочие формулы метода упрощаются, если расположение датчиков обладает свойством симметрии. Например, рассмотрим такое расположение, при котором оси, на которых расположены датчики, составляют друг с другом одинаковые углы, то есть

$$\alpha_{12} = \alpha_{13} = \alpha_{23} \equiv \alpha. \quad (4)$$

В этом случае датчики давления располагаются в вершинах треугольной пирамиды, причем при одной из вершин все три угла равны. Тогда, как это следует из результатов работы [3],

$$|\text{grad}P| = \sqrt{\frac{(1+c)(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2) - 2c(b_1b_2 + b_1b_3 + b_2b_3)}{(1-c)(1+2c)}}; \quad (5)$$

где $c \equiv \cos \alpha$. В частном случае, когда углы между осями (углы при вершине треугольной пирамиды) равны $\pi/3$, рабочая формула ещё более упрощается:

$$|\text{grad}P| = \sqrt{\frac{3}{2}(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2) - (b_1b_2 + b_1b_3 + b_2b_3)}. \quad (6)$$

Эта конфигурация датчиков давления соответствует, например, их расположению в вершинах правильного четырехгранника – тетраэдра. Самая простая рабочая формула получается в случае трех прямых углов при вершине пирамиды:

$$|\text{grad}P| = \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + b_3^2}. \quad (7)$$

Такая конфигурация соответствует расположению трех датчиков на трех взаимно перпендикулярных осях, а четвертого (под номером ноль) – в точке пересечения этих осей.

4. Заключение

В работе кратко представлена новая модификация гидростатического метода определения плотности морской воды, расширяющая его функциональные возможности. Метод основан на совместной обработке сигналов четырех жестко связанных между собой датчиков давления при произвольных расстояниях между входами датчиков.

Приведены алгебраические выражения, реализующие алгоритм обработки сигналов и позволяющие в реальном времени определить плотность морской воды по измеренным значениям гидростатического давления и по известным параметрам, характеризующим пространственную конфигурацию датчиков давления, образующих систему.

Предложенная модификация обладает практической ценностью, которая заключается в том, что выходной сигнал измерителя, несущий информацию о градиенте гидростатического давления, нечувствителен к наклону этой системы в исследуемой морской среде. Тем самым устраняется влияние важного источника помехи, присутствующего в натуральных экспериментах, в результате чего повышается точность определения плотности морской воды в реальных условиях гидростатическим методом.

Представленный в статье простой и ясный метод решения актуальной научно-технической задачи является еще одним возможным примером использования оригинальной физической идеи в качестве учебного материала на аудиторных занятиях и при самостоятельной работе.

Список литературы:

1. Федотов Г. А. Пример использования новой физической идеи в качестве учебного материала. / Г. А. Федотов // «Современное образование: содержание, технологии, качество». Материалы XXIX международной научно-методической конференции. С.550–553. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. – 582 с.
2. Изард К. Э. Психология эмоций / пер. с англ. // СПб.: Питер, 2006. 464 с.
3. Федотов Г. А. Новая модификация гидростатического метода определения плотности морской воды / Г. А. Федотов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2013. – Т. 6. – № 1. С. 58–65.

G. A. Fedotov

A new example of using an original physical idea as an educational material

*Naval Polytechnical Institute of the Educational and Research Center “Naval Academy”,
Saint Petersburg, Russia*

Abstract. A brief description of a new method for determining the density of seawater is given. The method is based on the co-processing the signals from four pressure sensors located at the vertices of a triangular pyramid. It is important that the output signal of the sensor system is potentially independent of its orientation in the gravity field. The proposed hydrostatic meter is considered as a possible example of using an original scientific idea as an educational material.

Keywords: scientific idea; educational material; density of the marine environment; hydrostatic meter; pressure sensor