

**ТРЕБОВАНИЯ
К МЕТРОЛОГИЧЕСКИМ
ХАРАКТЕРИСТИКАМ
И АЛГОРИТМАМ
ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ
ИЗМЕРИТЕЛЕЙ УРОВНЯ ВОДЫ**

*В.И.Забурдаев, П.В.Гайский,
А.Н.Логвинчук*

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г.Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

Рассматривается основное измерительное уравнение гидростатических уровнемеров. Устанавливается связь погрешностей измерительных каналов давления, температуры, электропроводимости, а также погрешности определения ускорения свободного падения с классом точности измерителя уровня, даются формулы вычисления солёности и плотности, соответствующие этому классу точности.

Введение. В настоящее время в связи с дальнейшим развитием миниатюризации и степени интеграции электро-радио-компонентов, первичных измерительных преобразователей (датчиков) давления, температуры, электропроводимости при их высоких метрологических характеристиках, широкое распространение получили гидростатические измерители уровня жидкости как в быту, так и в промышленности и научных исследованиях, экологических мониторингах и т.п.

Однако, как правило, в массовой рекламной информации не даются совсем или приводятся в неполном объеме сведения как о принципе действия гидростатического уровнемера жидкости, так и о метрологических характеристиках изделия в целом или о его отдельных измерительных каналах. Это приводит к определенным трудностям в выборе нужного изделия потребителями, особенно в случае высоких требований к точности измерения уровня жидкости.

Цель настоящей работы заключается в анализе принципа действия гидростатического измерителя уровня жидкости и в установлении связи допустимых погрешностей измерения уровня с погрешностями отдельных измерительных каналов, входящих в состав изделия, и алгоритмов обработки данных.

Принцип действия гидростатического измерителя уровня жидкости и основное уравнение измерения. Взаимосвязь между уровнем жидкости Z и гидростатическим давлением P столба жидкости в точке расположения измерителя давления устанавливается на основании уравнения гидростатики в интегральной форме [1]

$$\int_0^Z g \cdot dZ = \int_0^P V \cdot dP, \quad (1)$$

где g - ускорение свободного падения;
 $V = V(S, t, P)$ - удельный объем жидкости в зависимости от концентрации, минерализации или солёности, а также от температуры и давления, при которых находится жидкость.

Ускорение свободного падения зависит от географической широты места и от глубины расположения приемника давления (см., например, [1])

$$g = g_0(\varphi) + \gamma \cdot Z, \quad (2)$$

где $g_0(\varphi)$ - ускорение свободного падения на поверхности жидкости в месте с широтой φ ;

$$\gamma = \frac{dg}{dZ} \quad - \text{зависимость ускорения}$$

свободного падения от глубины (от расстояния до центра Земли).

Интегрируя левую часть выражения (1), получим

$$Z \left[g_0(\varphi) + \frac{1}{2} \gamma \cdot Z \right] = \int_0^P V \cdot dP, \quad (3)$$

Слагаемое $\frac{1}{2} \gamma \cdot Z$ в левой части уравнения (3) можно заменить [1] на $\frac{1}{2} \gamma' \cdot P$, где

$$\gamma' = \frac{dg}{dP}, \text{ а } P \text{ - гидростатическое давление в}$$

децибарах. Такая замена приводит к погрешности $\Delta Z = \pm 10^{-5} \cdot Z$ (т.е. около 0,001% от измеряемого уровня Z), которой при относительно малых значениях измеряемого уровня мож-

но пренебречь. Учитывая все сказанное, можно написать

$$Z = \frac{\int_0^P V \cdot dP}{g_0(\varphi) + \frac{1}{2} \gamma' \cdot P} \quad (4)$$

Заменяя в выражении (4) текущее значение удельного объема V на среднее значение \bar{V} между изобатами 0 и P , получим

$$Z = \frac{\bar{V} \cdot P}{g_0(\varphi) + \frac{1}{2} \gamma' \cdot P} \quad (5)$$

Если давление P выражается в децибарах (1 дбар = 10^4 Па = 10^4 кг/м²), уровень Z – в метрах, удельный объем – в м³/кг, а ускорение свободного падения – м/с², то выражение (5) примет вид

$$Z = \frac{\bar{V} \cdot P}{g_0(\varphi) + \frac{1}{2} \gamma' \cdot P} \cdot 10^4 \quad (6)$$

Вводя вместо удельного объема \bar{V} плотность жидкости $\bar{\rho} = \frac{1}{\bar{V}}$, выражение (6) примет вид

$$Z = \frac{P}{\bar{\rho} \left[g_0(\varphi) + \frac{1}{2} \gamma' \cdot P \right]} \cdot 10^4 \quad (7)$$

Выражения (4), (5), (6), (7) являются основным измерительным уравнением гидростатического уровнемера.

Удельный объем или плотность чистых жидкостей вычисляются по значениям температуры и давления. Если исследуемая среда представляет собой смесь чистой воды и растворенных солей или взвесей, то удельный объем и плотность вычисляются по уравнениям состояния по данным минерализации (для пресноводных бассейнов, рек, эстуариев), солёности (для морских и океанских вод), концентрации взвеси и температуры и давления.

Если удельный объем или плотность жидкости постоянны во всем слое между изобатами 0 и P , то \bar{V} или $\bar{\rho}$ могут быть вычислены по данным измерений температуры, солёности или минерализации в одной точке слоя.

Если удельный объем (плотность) постоянен по глубине, тогда в зависимости от точности измерений уровня первоначально необходимо получить профиль распределения удельного объема, а уже затем находить среднее значение удельного объема или вычислять интеграл в выражении (4). Вычисление удельного объема по средним значениям температуры и солёности может привести к погрешности из-за нелинейной зависимости удельного объема от температуры, давления и солёности.

Требования к метрологическим характеристикам измерительных каналов. Как видно из основного уравнения измерений (3 – 5), уровень измеряется косвенным способом. Предполагая независимость погрешностей измерений удельного объема \bar{V} или плотности $\bar{\rho}$, гидростатического давления P и вычисления ускорения свободного падения $g_0(\varphi)$, а также их случайную природу, можно написать

$$(\Delta Z)^2 = \left[\frac{\partial Z}{\partial \bar{\rho}} \cdot \Delta \bar{\rho} \right]^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial P} \cdot \Delta P \right)^2 + \left[\frac{\partial Z}{\partial [g_0(\varphi)]} \cdot \Delta g_0(\varphi) \right]^2 \quad (8)$$

где ΔZ , $\Delta \bar{\rho}$, ΔP , $\Delta g_0(\varphi)$ – погрешности измерения или вычисления уровня, средней плотности жидкости, давления и ускорения свободного падения соответственно.

Задавая условием равного вклада каждого слагаемого в правой части выражения (8) в общую погрешность и пренебрегая вторым слагаемым в знаменателе выражения (5) из-за его малого влияния на частные производные, получим

$$(\Delta \bar{\rho})_{\text{дон}} \leq \frac{(\Delta Z)_{\text{дон}}}{\sqrt{3} \cdot \left| \frac{\partial Z}{\partial \bar{\rho}} \right|_{\text{max}}} \quad (9)$$

$$(\Delta P)_{\text{дон}} \leq \frac{(\Delta Z)_{\text{дон}}}{\sqrt{3} \cdot \left| \frac{\partial Z}{\partial P} \right|_{\text{max}}} \quad (10)$$

$$[\Delta g_0(\varphi)]_{\text{дон}} \leq \frac{\Delta Z_{\text{дон}}}{\sqrt{3} \cdot \left| \frac{\partial Z}{\partial g_0} \right|_{\text{max}}} \quad (11)$$

Переходя к относительным погрешностям измерения, формула (8) примет вид

$$\left(\frac{\Delta Z}{Z} \right)^2 = \left(\frac{\Delta \bar{\rho}}{\bar{\rho}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta P}{P} \right)^2 + \left(\frac{\Delta g_0(\varphi)}{g_0(\varphi)} \right)^2 \quad (12)$$

и, следовательно, выражения (9) – (11) трансформируются следующим образом

$$\left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right)_{\text{дон}} \leq \left(\frac{\Delta Z}{Z} \right)_{\text{дон}} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}; \quad (13)$$

$$\left(\frac{\Delta P}{P} \right)_{\text{дон}} \leq \left(\frac{\Delta Z}{Z} \right)_{\text{дон}} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}; \quad (14)$$

$$\left(\frac{\Delta g_0(\varphi)}{g_0(\varphi)} \right)_{\text{дон}} \leq \left(\frac{\Delta Z}{Z} \right)_{\text{дон}} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}. \quad (15)$$

По выражению (12) можно определить ожидаемый класс точности уровнемера в зависимости от классов точности измерительных каналов, а выражения (13) – (15) определяют необходимый класс точности измерительных средств, используемых в уровнемере, исходя из допустимой относительной погрешности измерения уровня.

В табл. 1 приведены оценки допустимых относительных погрешностей (в %) $\frac{\Delta \bar{\rho}}{\bar{\rho}}$, $\frac{\Delta P}{P}$, $\frac{\Delta g_0(\varphi)}{g_0(\varphi)}$ для различных допустимых погрешностей уровнемера.

Поскольку плотность измеряется косвенно по данным измерения температуры, солености (минерализации), взвеси и давлению, то по заданной допустимой погрешности измерения плотности можно оценить допустимые погрешности измерения солености ΔS , температуры Δt и давления ΔP , а также допустимую погрешность алгоритма вычисления плотности $\Delta \rho_{\text{алг}}$.

Предполагая случайность и независимость всех составляющих погрешности измерения плотности, можно написать

$$(\Delta \rho)_{\text{дон}} = \left[\left(\frac{\partial \rho}{\partial S} \cdot \Delta S \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot \Delta t \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \cdot \Delta P \right)^2 + (\Delta \rho)_{\text{алг}}^2 \right]^{1/2}. \quad (16)$$

Также как и ранее, допуская равенство друг другу всех слагаемых в правой части выражения (16), найдем

$$(\Delta S)_{\text{дон}} \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \rho_{\text{дон}}}{\left| \frac{\partial \rho}{\partial S} \right|_{\text{max}}}, \quad (17)$$

$$(\Delta t)_{\text{дон}} \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \rho_{\text{дон}}}{\left| \frac{\partial \rho}{\partial t} \right|_{\text{max}}}, \quad (18)$$

$$(\Delta P)_{\text{дон}} \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \rho_{\text{дон}}}{\left| \frac{\partial \rho}{\partial P} \right|_{\text{max}}}, \quad (19)$$

$$(\Delta \rho)_{\text{алг}} \leq \frac{1}{2} \cdot (\Delta \rho)_{\text{дон}} \quad (20)$$

Диапазон изменчивости частных производных $\frac{\partial \rho}{\partial S}$, $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ в зависимости от температуры и солености приведены в таблице 2 и таблице 3 соответственно.

Поскольку частная производная плотности от давления имеет максимальное значение при малых давлениях (конкретно при $P=0$, соответствующее максимальной сжимаемости воды), в таблице 4 приведен диапазон изменчивости

Таблица 1- Допустимые относительные погрешности измерения средней плотности ($\Delta\rho/\rho$), давления ($\Delta P/P$), погрешности определения ускорения свободного падения ($\Delta g/g$) при заданной погрешности измерения уровня ($\Delta Z/Z$)

Погрешность измерения уровня $\Delta Z/Z, \%$	Погрешности измерения:		Погрешность определения ускорения $\Delta g_0(\varphi)/g_0(\varphi), \%$
	плотности $\Delta\rho/\rho, \%$	давления $\Delta P/P, \%$	
10	5,8	5,8	5,8
5	2,9	2,9	2,9
1	0,58	0,58	0,58
0,5	0,29	0,29	0,29
0,25	0,14	0,14	0,14
0,1	0,058	0,058	0,058
0,05	0,029	0,029	0,029
0,01	0,0058	0,0058	0,0058
0,005	0,0029	0,0029	0,0029
0,001	0,0006	0,0006	0,0006

Таблица 2 - Оценки значений частной производной $\frac{\partial\rho}{\partial S}$ в зависимости от температуры и солёности [2]

Температура, °C	Частная производная $\partial\rho/\partial S, (\text{кг/м}^3)/\text{еПС}$				
	S=0	S=10	S=20	S=30	S=40
-2 + 30	0,823 + 0,746	0,815 + 0,742	0,811 + 0,742	0,811 + 0,746	0,815 + 0,754

Таблица 3 – Оценки значений частной производной $\frac{\partial\rho}{\partial t}$ в зависимости от температуры и солёности [2]

Температура, °C	Частная производная $\partial\rho/\partial t, (\text{кг/м}^3)/^\circ\text{C}$				
	S=0	S=10	S=20	S=30	S=40
-2	0,106	0,065	0,027	- 0,007	- 0,040
0	0,067	0,030	- 0,005	- 0,037	- 0,068
5	- 0,017	- 0,047	- 0,076	- 0,104	- 0,130
10	- 0,088	- 0,113	- 0,137	- 0,160	- 0,183
15	- 0,151	- 0,171	- 0,191	- 0,210	- 0,229
20	- 0,207	- 0,224	- 0,240	- 0,256	- 0,271
25	- 0,256	- 0,271	- 0,285	- 0,298	- 0,309
30	- 0,302	- 0,316	- 0,328	- 0,338	- 0,346

Таблица 4 – Оценки значений частной производной $\frac{\partial \rho}{\partial P} \cdot 10^3$ (кг/м³)/дбар в зависимости от температуры и солёности при атмосферном давлении (P=0) [2]

Температура, °C	Частная производная $\partial \rho / \partial P \cdot 10^3$, (кг/м ³)/дбар				
	S=0	S=10	S=20	S=30	S=40
-2 ÷ 30	5,18 ÷ 4,49	5,04 ÷ 4,41	4,91 ÷ 4,32	4,78 ÷ 4,24	4,65 ÷ 4,15

Таблица 5 – Допустимые погрешности измерения солёности, температуры, давления и алгоритма вычисления плотности для заданной допустимой погрешности измерения уровня и плотности

Допустимая погрешность измерения уровня жидкости, $\Delta Z/Z$, %	Допустимая погрешность измерения плотности, $(\Delta \rho)_{\text{доп}}$, кг/м ³	Допустимые составляющие погрешности измерения и вычисления:			
		солёности $(\Delta S)_{\text{доп}}$, епс	температуры $(\Delta t)_{\text{доп}}$, °C	давления $(\Delta P)_{\text{доп}}$, дбар	алгоритма $(\Delta \rho)_{\text{доп}}$, кг/м ³
10	62,0	38,0	89,5	5984	31
5	31,0	18,8	44,7	2992	15,5
2,5	15,5	9,4	22,4	1496	7,75
1,0	6,2	3,8	8,95	598	3,1
0,5	3,1	1,88	4,47	299	1,55
0,25	1,55	0,94	2,24	150	0,775
0,1	0,62	0,38	0,895	60	0,310
0,05	0,31	0,188	0,447	30	0,155
0,025	0,155	0,094	0,224	15	0,077
0,01	0,062	0,038	0,089	6	0,031
0,005	0,031	0,0188	0,045	3	0,0155
0,001	0,0062	0,0038	0,009	0,6	0,0037

$\frac{\partial \rho}{\partial P}$ только при атмосферном давлении ($P=0$)

для разных значений температуры и солености.

В таблице 5 приведены оценки допустимых погрешностей измерения солености $(\Delta S)_{\text{доп}}$, температуры $(\Delta t)_{\text{доп}}$, давления $(\Delta P)_{\text{доп}}$ и погрешности алгоритма $(\Delta \rho_{\text{алг}})_{\text{доп}}$, исходя из допустимых погрешностей измерения (вычисления) уровня $\left(\frac{\Delta Z}{Z}\right)_{\text{доп}}$ и плотности $(\Delta \rho)_{\text{доп}}$.

Значение $(\Delta \rho)_{\text{доп}}$ вычислено по формуле

$$(\Delta \rho)_{\text{доп}} = [\rho(S, t, P)] \cdot \left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)_{\text{доп}}, \quad (21)$$

$$\Delta S = \left[\left(\frac{\partial S}{\partial R} \cdot \Delta R \right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial t} \cdot \Delta t \right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial P} \cdot \Delta P \right)^2 + (\Delta_{\Sigma} S_{\text{алг}})^2 \right]^{1/2}. \quad (22)$$

Принимая условия равного вклада от всех составляющих погрешностей, найдем

$$(\Delta R)_{\text{доп}} \leq \frac{1}{2} \frac{(\Delta S)_{\text{доп}}}{\left| \frac{\partial S}{\partial R} \right|_{\text{max}}}; \quad (23)$$

$$(\Delta t)_{\text{доп}} \leq \frac{1}{2} \frac{(\Delta S)_{\text{доп}}}{\left| \frac{\partial S}{\partial t} \right|_{\text{max}}}; \quad (24)$$

$$(\Delta P)_{\text{доп}} \leq \frac{1}{2} \frac{(\Delta S)_{\text{доп}}}{\left| \frac{\partial S}{\partial P} \right|_{\text{max}}}; \quad (25)$$

$$(\Delta S_{\text{алг}})_{\text{доп}} \leq \frac{1}{2} \cdot (\Delta S)_{\text{доп}}. \quad (26)$$

В таблице 6, таблице 7 приведены оценки значений частных производных $\frac{\partial S}{\partial R}$ и $\frac{\partial S}{\partial t}$ в зависимости от солености и температуры. Максимальное значение $\frac{\partial S}{\partial P}$ наблюдается при

где $[\rho(S, t, P)]_{\text{min}} = 1000 \text{ кг} / \text{м}^3$.

Соленость, также как и плотность измеряется косвенно по удельной или относительной электропроводимости, температуре, гидростатическому давлению.

В связи с этим погрешность измерения солености будет зависеть от погрешностей прямых измерений относительной проводимости ΔR , температуры Δt , давления ΔP и суммарной погрешности алгоритма вычисления $\Delta_{\Sigma} S_{\text{алг}}$. Предполагая, как и ранее, независимость погрешностей прямых измерений, алгоритма вычислений и их случайную природу, общую погрешность измерения солености можно оценить по следующей формуле

$P=0$, $S = S_{\text{max}} = (35 \div 40)$, $t = 0$ и составляет

$$\left| \frac{\partial S}{\partial P} \right|_{\text{max}} \approx 6 \cdot 10^{-4} / \text{дбар}.$$

В таблице 8 приведены оценки значений допустимых погрешностей измерения относительной электропроводимости (ΔR) , температуры (Δt) , давления (ΔP) , $(\Delta S_{\text{алг}})_{\text{доп}}$, при которых обеспечиваются погрешности

$$\left(\frac{\Delta Z}{Z}\right)_{\text{доп}}, (\Delta \rho)_{\text{доп}}, (\Delta S)_{\text{доп}}.$$

Упрощенные алгоритмы вычисления плотности и солености. Как видно из таблиц 1 и 8, допустимые погрешности определения плотности и солености зависят от класса точности уровнемера. В принципе при обработке данных с помощью современных персональных компьютеров могут быть использованы самые точные формулы вычисления плотности и солености, составляющие основы современного уравнения состояния воды УС - 1980 и шкалы практической солености ШПС - 1978 [3]. Однако в ряде случаев это может быть избыточно и экономически нецелесообразно. С подобной задачей могут справиться и микропроцессоры, установленные в устройстве индикации показаний уровнемера.

Таблица 6 – Оценки значений частной производной $\frac{\partial S}{\partial R}$ для разных значений солености и температуры [2]

Температура, °C	Частная производная $\partial S/\partial R \cdot 10^3$, епс							
	S=6	S=10	S=15	S=20	S=25	S=30	S=35	S=40
0	48,2	51,1	52,3	54,3	55,0	56,5	58,0	58,0
5	42,1	44,2	45,2	46,6	47,7	49,3	50,5	51,1
10	36,7	38,7	40,1	41,7	42,5	43,7	44,2	45,2
15	32,5	34,3	35,3	37,0	37,6	38,7	39,7	40,1
20	29,0	30,6	31,8	33,0	34,3	34,9	35,8	35,8
25	26,0	27,9	28,6	30,0	30,4	31,5	32,3	32,8
30	23,2	25,4	25,8	27,7	27,9	28,8	29,8	30,2

Таблица 7 – Оценки значений частной производной $\frac{\partial S}{\partial t}$ в зависимости от температуры и солености [2]

Температура, °C	Частная производная $\partial S/\partial t$, (епс/°C)							
	S=6	S=10	S=15	S=20	S=25	S=30	S=35	S=40
0 + 30	-0,19+-0,13	-0,34+-0,21	-0,50+-0,30	-0,67+-0,42	-0,83+-0,52	-1,00+-0,62	-1,26+-0,74	-1,31+-0,85

Таблица 8 – Допустимые погрешности измерения относительной электропроводности, температуры, давления и алгоритма вычисления солености для заданной допустимой погрешности измерения уровня и солености

Допустимая погрешность измерения уровня жидкости, $\Delta Z/Z$, %	Допустимая погрешность измерения солености, $(\Delta S)_{\text{доп}}$, кг/м ³	Допустимые составляющие погрешности измерения и вычисления:			
		относительной проводимости $(\Delta R)_{\text{доп}}$	температуры $(\Delta t)_{\text{доп}}$, °C	давления $(\Delta P)_{\text{доп}}$, дбар	алгоритма $(\Delta_{\Sigma} S)_{\text{алг}}$, епс
10	38	0,33	14,6	3160	19
5	18,8	0,16	7,3	1580	9,4
2,5	9,4	0,08	3,65	790	4,7
1,0	3,8	0,033	1,46	316	1,9
0,5	1,88	0,0165	0,73	158	0,94
0,25	0,94	0,0082	0,365	79	0,47
0,1	0,38	0,0033	0,146	31,6	0,19
0,05	0,188	0,00165	0,073	15,8	0,094
0,025	0,094	0,00082	0,036	7,9	0,047
0,01	0,038	0,00033	0,0146	3,16	0,019
0,005	0,0188	0,00017	0,0073	1,58	0,0094
0,001	0,0038	0,000033	0,0015	0,32	0,0019

В таблице 9 приведены упрощенные формулы вычисления плотности, отвечающие требованиям класса точности уровнемера в диапазонах изменчивости температуры от 0 до 30°C и солёности от 0 до 35. В табл. 9 также приведены значения диапазона изменчивости уровня жидкости, для которых могут использоваться данные формулы плотности $\rho(S, t, 0)$, т.е. без учета сжимаемости воды. Если возникает потребность измерять уровень жидкости в диапазоне изменчивости, превышающем указанный в табл. 9, необходимо учитывать сжимаемость воды и пользоваться формулами для вычисления $\rho(S, t, P)$. В отдельных случаях, когда диапазоны изменчивости температуры и солёности (минерализации) уже вышеуказанных, приведенные формулы при заданном классе точности уровнемера могут быть еще более упрощены.

При разработке упрощенных алгоритма и формул для вычисления солёности были взяты за основу алгоритм и формулы шкалы практической солёности ШПС-1978 [3]:

$$S = \sum \left(a_i \cdot R_i^{1/2} + \frac{\Delta t}{1 + k \Delta t} \cdot b_i \cdot R_i^{1/2} \right), \quad (27)$$

где $R_i = \frac{\chi(S, t, 0)}{\chi(35, t, 0)}$ - относительная электрическая проводимость морской воды при температуре t ;

$\chi(S, t, 0)$, $\chi(35, t, 0)$ - удельные электрические проводимости воды с солёностью S и $S = 35$ при одной и той же температуре t и атмосферном давлении ($P = 0$);

$$(\Delta_{\Sigma} S)_{\text{алг}} = \left\{ \left[\frac{\partial S}{\partial(R_i)} \cdot \frac{\partial R_i}{\partial(r_i)} \cdot (\Delta r_i)_{\text{алг}} \right]^2 + \left[\frac{\partial S}{\partial(R_i)} \cdot \frac{\partial R_i}{\partial(R_p)} \cdot (\Delta R_p)_{\text{алг}} \right]^2 + (\Delta S)_{\text{алг}}^2 \right\}^{1/2}, \quad (31)$$

где $(\Delta S)_{\text{алг}}$, $(\Delta r_i)_{\text{алг}}$, $(\Delta R_p)_{\text{алг}}$ - погрешности собственно формул (27), (28), и (29) соответственно.

В данном выражении не учитывается погрешность вычисления солёности, вызванная неточностью измерения R , так как, во-первых, эта составляющая погрешности уже была оценена ранее (см. (22), (12) и табл. 8), а во-вторых, она не оказывает влияния на погрешность собственно формул (27) и (28).

Предполагая равенство друг другу слагаемых в правой части выражения (31), можно найти:

$$R_i = \frac{R}{r_i \cdot R_p}; \quad (28)$$

$$r_i = \frac{\chi(35, t, 0)}{\chi(35, 15, 0)} - \text{температурная зависи-}$$

мость электрической проводимости морской воды с солёностью точно 35;

$$r_i = f(t); \quad (29)$$

$$R_p = \frac{\chi(S, t, P)}{\chi(S, t, 0)} - \text{зависимость электро-}$$

проводимости морской воды с солёностью S от давления P при температуре t ;

$$R_p = f(R, t, P); \quad (30)$$

$$\Delta t = t - 15;$$

$$R = \frac{\chi(S, t, p)}{\chi(35, 15, 0)} - \text{измеряемая относитель-}$$

ная электрическая проводимость морской воды с солёностью S при температуре t и давлении P по сравнению с удельной электрической проводимостью морской воды с солёностью 35 при температуре $t = 15^\circ\text{C}$ и атмосферном давлении ($P = 0$).

Полные формулы (26), (27), (28) приведены в работе [3].

Предполагая независимость погрешностей формул для вычислений S , r_i и R_p , суммарная погрешность алгоритма вычисления солёности (ΔS) может быть оценена по выражению

$$[(\Delta r_i)_{\text{алг}}]_{\text{дон}} \leq \frac{(\Delta_{\Sigma} S_{\text{алг}})_{\text{дон}}}{\sqrt{3} \cdot \left| \frac{\partial S}{\partial(R_i)} \cdot \frac{\partial(R_i)}{\partial(r_i)} \right|_{\text{max}}}; \quad (32)$$

$$[(\Delta R_p)_{\text{алг}}]_{\text{дон}} \leq \frac{(\Delta_{\Sigma} S_{\text{алг}})_{\text{дон}}}{\sqrt{3} \cdot \left| \frac{\partial S}{\partial(R_i)} \cdot \frac{\partial(R_i)}{\partial(R_p)} \right|_{\text{max}}}; \quad (33)$$

Таблица 9 – Формулы для вычисления плотности в зависимости от класса точности уровнемера

Класс точности уровнемера $\Delta z/z, \%$	Формулы для вычисления плотности $\rho(s,t,0), \text{кг/м}^3$	Диапазон изменчивости уровня, м	Примечание
10,0	1000	0 ÷ 6000	Соленость, температуру можно не измерять
5,0	1000 + s	0 ÷ 3000	Температуру для вычисления плотности можно не измерять
1,0	1001 - 0,17 · t + 0,77 · s	0 ÷ 600	Соленость (минерализация), температура должны измеряться
0,5		0 ÷ 300	- " -
0,25		0 ÷ 150	- " -
0,1	$999,67 + 5,89 \cdot 10^{-2} \cdot t - 6,4 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 + (0,808 - 2,31 \cdot 10^{-3} \cdot t) \cdot s$	0 ÷ 60	- " -
0,05	$999,83 + 5,07 \cdot 10^{-2} \cdot t - 6,4 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 + (0,8245 - 4,02 \cdot 10^{-3} \cdot t + 5,97 \cdot 10^{-5} \cdot t^2) \cdot s + (-5,72 \cdot 10^{-3} + 1,028 \cdot 10^{-4} \cdot t - 2,6 \cdot 10^{-6} \cdot t^2) \cdot s^{3/2} + 4,83 \cdot 10^{-4} \cdot s^2$	0 ÷ 30	- " -
0,025		0 ÷ 15	- " -
0,01	$\rho(s,t,0)$ должна вычисляться по формулам УС – 1980 [3]	0 ÷ 6	- " -

Таблица 10 – Допустимые погрешности алгоритмов вычисления S, t, и R_p для обеспечения допустимой суммарной погрешности алгоритма вычисления солености при заданной погрешности измерения уровня

Допустимая погрешность измерения уровня, $\Delta Z/Z, \%$	Допустимая суммарная погрешность алгоритма вычисления солености, $\Delta \Sigma S_{\text{алг.}}$	Погрешности вычисления S, t, R _p		
		$(\Delta S_{\text{алг.}})_{\text{доп}}$	$[(\Delta t)_{\text{алг.}}]_{\text{доп}}$	$[(\Delta R_p)_{\text{алг.}}]_{\text{доп}}$
10	19	11	0,18	0,28
5	9,4	5,5	0,09	0,14
2,5	4,7	2,7	0,045	0,07
1,0	1,9	1,1	0,018	0,028
0,5	0,94	0,55	0,009	0,014
0,25	0,47	0,27	0,0045	0,007
0,10	0,19	0,11	0,0018	0,0028
0,05	0,094	0,055	0,0009	0,0014
0,025	0,047	0,027	0,00045	0,0007
0,01	0,019	0,011	0,00018	0,00028
0,005	0,0094	0,0055	0,00009	0,00014
0,001	0,0019	0,0011	0,000018	0,00003

Таблица 11 – Формулы для вычисления солёности, обеспечивающие суммарную допустимую погрешность алгоритма вычисления солёности и допустимую погрешность измерения уровня

Допустимая погрешность измерения уровня $\Delta z/z$, %	Допустимая суммарная погрешность алгоритма вычисления солёности	Формулы для вычисления солёности			Диапазон изменения уровня, при котором можно принять $R_p=1$
		$S = f(R_s, t)$	$r_t = f(t)$	$R_p = f(R, t, P)$	
10	19				3160
5	9,4	$-0,86 + 35,2 \cdot R_t$	$0,6625 + 0,0232 \cdot t$	1,0	1580
2,5	4,7			$1+1,2 \cdot 10^{-5} \cdot P$	790
1,0	1,9			$1+1,2 \cdot 10^{-5} \cdot P$	316
0,5	0,94				158
0,25	0,47	$-0,13 + 30,36 \cdot R_t + 4,844 \cdot R_t^2$	$0,6758 + 0,0205 \cdot t + 7,6 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	$1 + \frac{1,65 \cdot 10^{-5} \cdot P}{1 + 0,05 \cdot t}$	79
0,1	0,19	$-0,034 + 28,81 \cdot R_t + 8,909 \cdot R_t^2 - 2,71 \cdot R_t^3 + 0,027 \cdot R_t \cdot (R_t - 1)(t - 15)$		$1 + \frac{1,97 \cdot 10^{-5} \cdot P}{1 + 0,05 \cdot t + 0,41 \cdot R}$	31,6
0,05	0,094	$-0,003 + 27,743 \cdot R_t + 14,248 \cdot R_t^2 - 11,2534 \cdot R_t^3 + 4,2717 \cdot R_t^4 + 0,036 \cdot R_t \cdot (R_t - 1)(-15 + 1,225 \cdot t - 0,015 \cdot t^2)$			15,8
0,025	0,047		$0,6766 + 0,0200667 \cdot t + 1,089 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 6,3 \cdot 10^{-7} \cdot t^3$		7,9
0,01	0,019				3,2
0,005	0,0094	Формула согласно ШПС – 1978 [3]		Формула согласно ШПС – 1978 [3]	1,6
0,001	0,0019		Формула согласно ШПС – 1978 [3]		0,32

$$(\Delta S_{\text{анз}})_{\text{дон}} \leq \frac{(\Delta_{\Sigma} \cdot S_{\text{анз}})_{\text{дон}}}{\sqrt{3}}. \quad (34)$$

Учитывая, что $\left| \frac{\partial S}{\partial R_i} \right|_{\text{max}} = 40,$

$$\left| \frac{\partial(R_i)}{\partial(r_i)} \right|_{\text{max}} = \left| \frac{R_i}{r_i} \right|_{\text{max}} = \frac{1,0}{0,68} = 1,5;$$

$$\left| \frac{\partial(R_i)}{\partial(R_p)} \right| = \left| \frac{R_i}{R_p} \right|_{\text{max}} = 1,0, \text{ получим}$$

$$[(\Delta r_i)_{\text{анз}}]_{\text{дон}} \leq \frac{(\Delta_{\Sigma} \cdot S_{\text{анз}})_{\text{дон}}}{102};$$

$$[(\Delta R_p)_{\text{анз}}]_{\text{дон}} \leq \frac{(\Delta_{\Sigma} \cdot S_{\text{анз}})_{\text{дон}}}{69};$$

$$(\Delta S_{\text{анз}})_{\text{дон}} \leq \frac{(\Delta_{\Sigma} \cdot S_{\text{анз}})_{\text{дон}}}{1,73}.$$

В табл. 10 приведены допустимые погрешности $(\Delta r_i)_{\text{анз}}$, $(\Delta R_i)_{\text{анз}}$ и $\Delta S_{\text{анз}}$, исходя из заданного класса точности уровнемера $\Delta Z/Z$ и допустимой суммарной погрешности алгоритма вычисления солёности $\Delta_{\Sigma} S_{\text{анз}}$.

В табл. 11 приведены упрощенные формулы для вычисления S , r , R_p обеспечивающие допустимую суммарную погрешность алгоритма вычисления солёности. Там же указан диапазон изменения уровня, в котором можно не учитывать влияния давления на вычисление солёности и принимать $R_p = 1$.

Заключение. В результате проведенного анализа установлено, что в гидростатических уровнемерах требования к относительным погрешностям измерения давления, плотности и определения ускорения свободного падения одинаковы. Однако в силу того, что современные лучшие промышленные образцы известных датчиков давления имеют класс точности $(0,02 + 0,05) \%$, измерение уровня с погрешностью менее $0,02 \%$ практически невозможно.

Плотность воды может быть косвенно измерена с относительной погрешностью $0,01 \%$, что соответствует классу точности уровнемера $0,025 \%$. Однако и здесь имеется определенное ограничение, связанное с тем, что в расчетах уровня должна использоваться средняя плотность столба жидкости, а это требует знания

профиля плотности или профилей температуры и солёности на интервале измеряемого уровня.

Если измерения уровня моря производятся в колодцах с ограниченным объемом, то для обеспечения необходимой точности измерения уровня по результатам измерений в одной точке, можно рекомендовать перемешивание жидкости в интервале измеряемого уровня с помощью насосов или других устройств.

В пресноводных водоемах, реках или скважинах, где плотность в основном зависит от температуры воды и профиля температуры в интервале измеряемого уровня, точность измерения можно повысить путем регистрации средней температуры слоя с помощью распределенных (интегральных) датчиков температуры, гирлянд термисторов или термопрофилеметров Уолша [4].

В открытых акваториях морей регистрация уровня моря с помощью гидростатических измерителей в интервале глубин, охватывающих сезонный термоклин, должна сопровождаться обязательной регистрацией профиля плотности или солёности и температуры. Это лучше всего может быть сделано с помощью заякоренных зондирующих CTD-комплексов, аналогичных описанным в работе [5]. В этом случае вместе с колебаниями уровня может быть получена полная картина временной изменчивости вертикальной структуры гидрологических полей в исследуемом районе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Saunders P.M. Practical conversion of pressure to depth. Journal of physical oceanography, vol.11, 1981, p.p. 573-574.
2. Океанографические таблицы. Гидрометеониздат. Ленинград, 1975 г., 477 с.
3. Fofonoff N.P., Millard R.C. Jr. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. UNESCO, 1983, 53 p.p.
4. Гайский В.А., Егупов Н.Д., Корнюшин Ю.П. Применение функций Уолша в системах автоматизации научных исследований. - Киев: Наук. думка, 1993, 211 с.
5. Weller R., Toole J., McCartney M., Hogg N. Outposts in the Ocean // Oceanus, Vol. 42, № 1, 2000. p.p. 20 - 23.