

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ОСРЕДНЕНИЯ ДАТЧИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ В ИЗМЕРИТЕЛЕ УРОВНЯ МОРЯ ИУМ-1

*Н.А.Греков, В.И.Забурдаев,
А.П.Алексеев, А.В.Клименко,
А.Н.Логвинчук, М.Н.Пеньков*

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

В статье приводятся методика и результаты экспериментального исследования объема осреднения датчика относительной электропроводимости морской воды в гидростатическом уровнемере ИУМ-1. Объем осреднения этого датчика составляет 13 л, что позволяет корректно установить параметры градуировочных баков и указать технические условия на постановку уровнемера в местах эксплуатации.

Введение. В последние годы измерения уровня морей и океанов проводятся с целью обеспечения безопасности мореплавания, предупреждения прибрежного населения о возможности катастрофических наводнениях и для оценки изменчивости крупномасштабных во времени и пространстве процессов в Мировом океане. Также результаты наземных измерений уровня используются для калибровки дистанционных (в том числе спутниковых) средств измерения уровня, обеспечивающих исследователей данными об изменчивости динамических процессов в океанах и морях в значительно меньших масштабах. В этом случае для повышения точности дистанционных измерений необходимо повышение точности и наземных средств, в связи с чем вопросы повышения точности наземных средств измерения уровня морей и океанов остаются по-прежнему актуальными.

Как известно, погрешность гидростатических измерителей уровня, к которым относится ИУМ-1, определяется погрешностями измерения гидростатического давления и изменчивостью плотности воды. Оценка допустимых погрешностей прямого измерения давления, а также косвенного измерения плотности произведена в работе [1] в зависимости от заданного класса точности измере-

ния уровня. Из прямо измеряемых элементов для косвенной оценки плотности воды наиболее жесткие требования к точности ставятся к измерителям температуры и относительной электропроводимости. В упомянутой работе предъявлены итоговые (суммарные) требования к допустимой погрешности измерения относительной электропроводимости без предъявления требований на отдельные составляющие ее, которые определяются датчиком (первичным измерительным преобразователем), схемой его включения и схемой вторичного преобразователя аналогового значения информационного сигнала в цифровой эквивалент (АЦП).

Погрешность открытого четырехэлектродного контактного датчика определяется приэлектродными процессами, изменчивостью геометрической постоянной под воздействием внешних влияющих факторов (температура, давление, обрастание), а также погрешностями градуировки и несоблюдением технических условий эксплуатации. Последние два замечания, как правило, связаны с ограничением естественного объема осреднения, присущего открытым датчикам электропроводимости. Геометрические параметры градуировочного бака, а также слоя воды, где будет устанавливаться измеритель уровня, должны превышать параметры объема осреднения датчика электрической проводимости.

Настоящая статья посвящена исследованию характерного объема осреднения датчика электрической проводимости ИУМ-1.

Особенности конструкции ИУМ-1 и канала измерения электрической проводимости. На рис. 1 упрощенно показана конструкция погружного устройства ИУМ-1 [2], а также собственно датчика электрической проводимости. Трубка-штанга и герметичный контейнер с фланцем изготовлены из нержавеющей стали. Четырехэлектродный датчик электрической проводимости с плоскими электродами из тантала размещен на нижней поверхности крышки контейнера, изготовленной из электроизоляционного материала (органическое стекло с ситалловой накладкой для базы потенциальных электродов). Для упрощения на рис. 1 ситалловая прокладка с углубленными пазами для потенциальных электродов не показана. Геометрические размеры устройства в целом и отдельных элементов конструкции, представленные на рис. 1 (в миллиметрах), являются справочными и служат для первоначальной оценки минимального объема

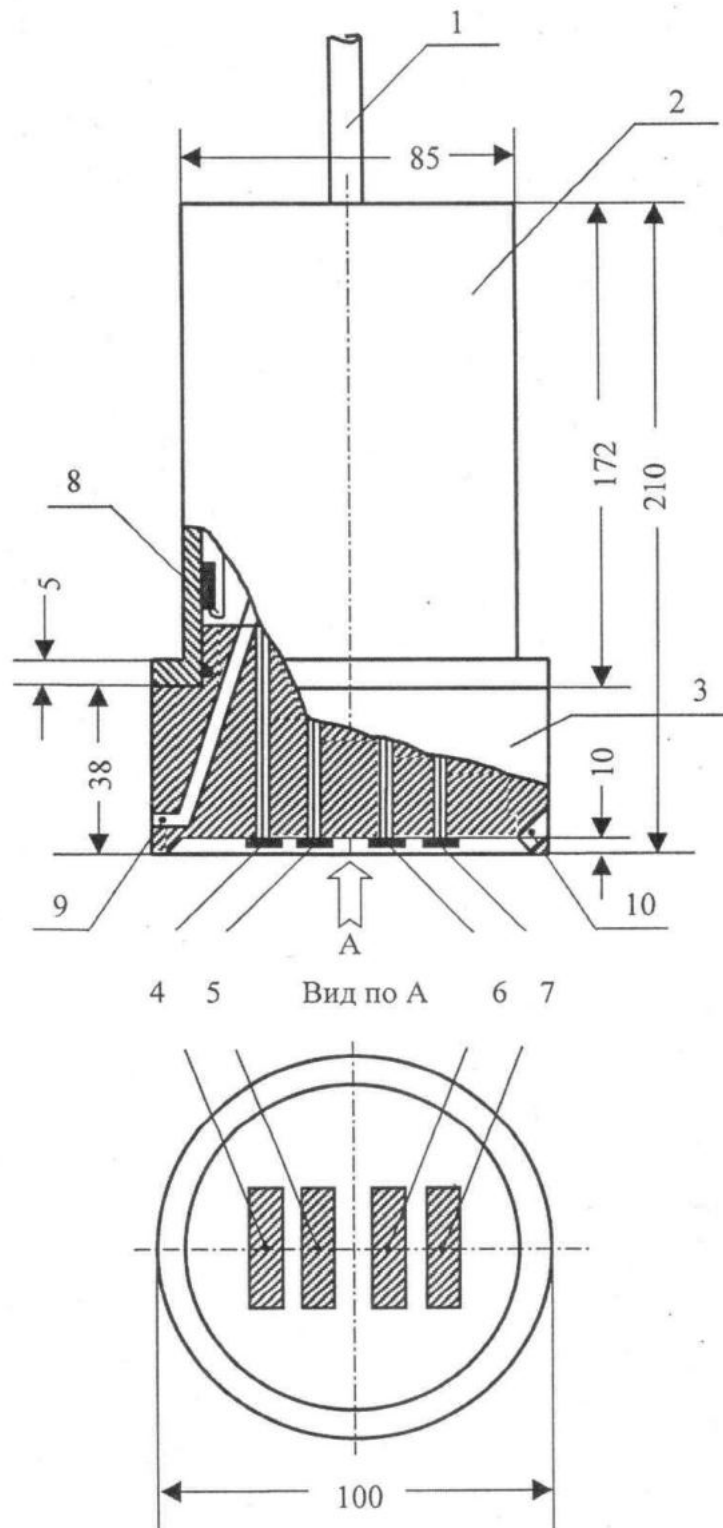


Рис. 1 – Упрощенный чертеж конструкции погружного устройства ИУМ-1
 1 – трубка-штанга с кабелем и каналом сообщения с атмосферой; 2 – стальной контейнер; 3 – корпус датчика; 4, 7 – токовые электроды; 5, 6 – потенциальные электроды; 8 – датчик температуры; 9 – канал подачи гидростатического давления; 10 – отверстие для выхода пузырей воздуха.

градуировочного бака и необходимой толщины слоя воды, в котором может быть поставлено погружное устройство.

Упрощенная электрическая схема канала измерения относительной электропроводимости приведена на рисунке 2 [3]. Частота переключения направления тока в датчике $I_{ДЭ}$ составляет $(25 \div 30)$ кГц.

Если контейнер погружен в воду на глубину, меньшую высоты корпуса датчика электропроводимости (38 мм, как это видно из рис. 1), т.е. когда стальной контейнер с фланцем не касается воды, ток I_{IT} полностью протекает через датчик электропроводимости и $I_{IT} = I_{ДЭ}$.

Если металлический контейнер уровня касается воды или погружен в неё, распределение электрического поля тока I_{IT} в области потенциальных электродов изменяется и, как это показано на рис. 3, появляется утечка I_Y части тока I_{IT} на проводящий корпус контейнера. При этом $I_{ДЭ} < I_{IT}$ и, следовательно, при постоянной электропроводимости воды напряжение на потенциальных электродах $U_{ПЭ}$, а также показания канала N_G окажутся меньше по сравнению с показаниями при отсутствии утечки.

В общем виде (см. рис. 4) напряжение на потенциальных электродах зависит от распределённого сопротивления $R_{П_1, П_2}$ и тока $I_{ДЭ}$

$$U_{ПЭ} = R_{П_1, П_2} \cdot I_{ДЭ} = R_{П_1, П_2} \cdot (I_{IT} - I_Y). \quad (1)$$

В свою очередь распределённое сопротивление $R_{П_1, П_2}$ определяется удельной электропроводимостью воды χ_B , в которой стоит уровнемер, и геометрической постоянной датчика удельной электропроводимости $K_{ДЭ}$. Тогда выражение (1) примет вид

$$U_{ПЭ} = \frac{1}{K_{ДЭ} \cdot \chi_B} \cdot (I_{IT} - I_Y). \quad (2)$$

Поскольку для вычисления солёности необходимо знать относительную электропроводимость $G_B = \frac{\chi_B}{\chi_{НВ}}$ (где $\chi_{НВ}$ — удельная электропроводимость стандартного водного раствора хлорида калия с концентрацией 32,4356 г KCl на килограмм раствора при

температуре $15^\circ C$ и $\chi_{НВ} \approx 4,291$ См/м [4]), выражение (2) в конечном итоге примет вид

$$U_{ПЭ} = \frac{1}{(K_{ДЭ})_G \cdot G_B} \cdot (I_{IT} - I_Y), \quad (3)$$

где $(K_{ДЭ})_G$ — геометрическая постоянная датчика относительной электропроводимости.

Как видно из выражения (3), при постоянстве тока I_{IT} напряжение на потенциальных электродах $U_{ПЭ}$ (и, следовательно, цифровой эквивалент N_G) зависит не только от измеряемого параметра (относительной электропроводимости G_B), но и от изменчивости геометрической постоянной датчика $(K_{ДЭ})_G$ и тока утечки I_Y .

Предварительными исследованиями в процессе пробных градуировок канала измерения электропроводимости было обнаружено большое влияние на $(K_{ДЭ})_G$ толщины слоя l между нижней торцевой поверхностью корпуса датчика электропроводимости и дном градуировочного бака. В меньшей мере наблюдалась зависимость $(K_{ДЭ})_G$ от диаметра градуировочного бака d . Ток утечки I_Y зависел от толщины слоя воды h (рис. 5) между нижней торцевой поверхностью датчика электропроводимости и уровнем поверхности в баке, однако это приводило к гораздо меньшим погрешностям градуировки по сравнению с изменчивостью $(K_{ДЭ})_G$.

Изменчивость $(K_{ДЭ})_G$ жёстко связана с изменчивостью плотности тока в рабочем объёме цилиндра жидкости с диаметром d и высотой l , а изменчивость I_Y — с погружением фланца и герметичного контейнера в воду, а также с диаметром d и высотой h . В задачу настоящих исследований входило также определение оптимальных параметров градуировочного бака (диаметр d_{opt} , высота бака $L_{opt} = l_{opt} + h_{opt}$, объём

$$V_{opt} = \frac{\pi d_{opt}^2}{4} \cdot (l_{opt} + h_{opt})), \text{ при которых по}$$

грешность градуировки и измерений в баках с ограниченным и с практически неограниченным объёмом (в уровнемерных колодцах, в открытом море) не превышала бы $0,25 \div 0,5$ допустимой инструментальной погрешности измерительного канала.

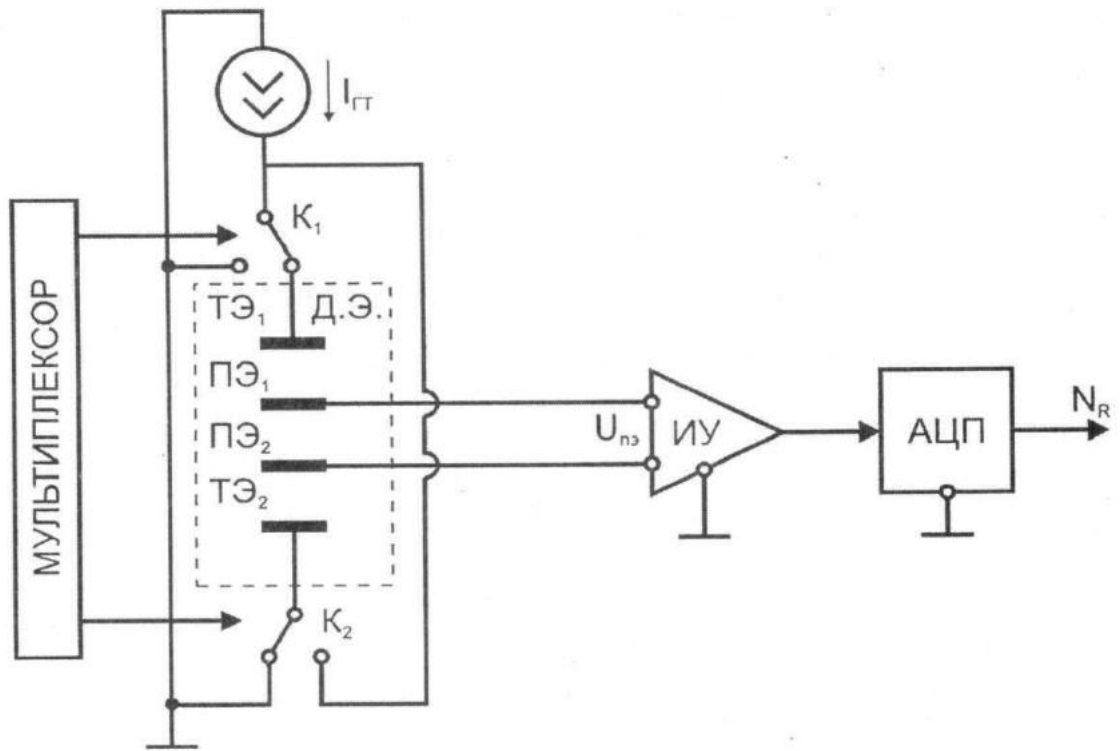


Рис. 2 – Упрощенная структурная схема канала измерения электропроводности
 ГТ – генератор тока; ДЭ – датчик электропроводности; ТЭ₁, ТЭ₂ – первый и второй токовые электроды; ПЭ₁, ПЭ₂ – первый и второй потенциальные электроды; К₁, К₂ – перекидные ключи, управляемые мультиплексором; ИУ – измерительный усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; N_R – выходной цифровой эквивалент измеряемой относительной электропроводности.

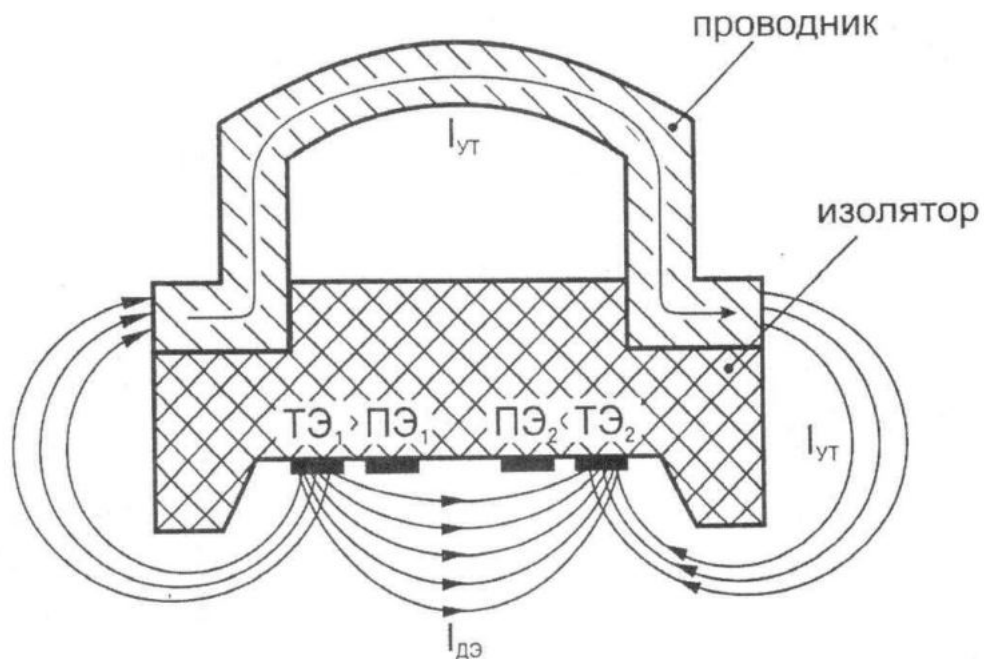


Рис. 3 – Ориентировочная картина поля тока при касании воды стальным контейнером или погружении его в воду

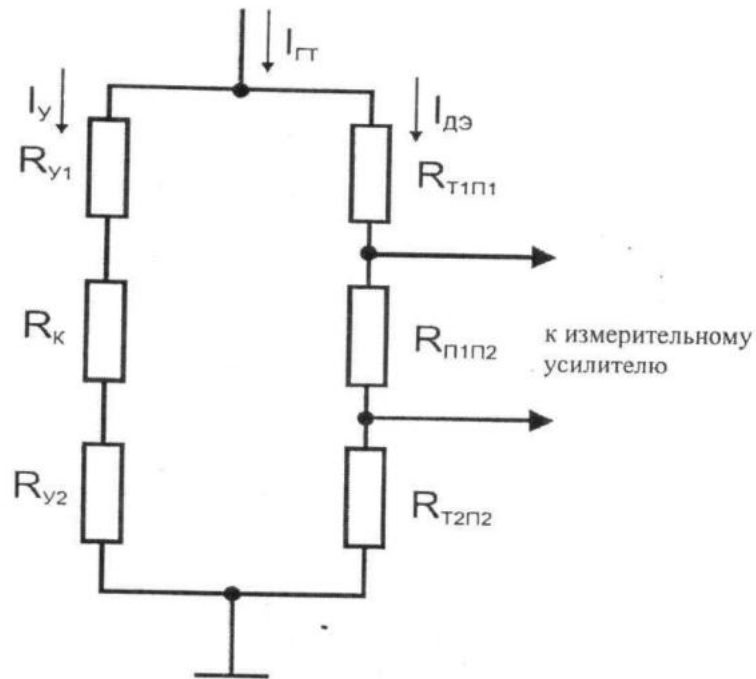


Рис. 4 – Фактическое распределение тока $I_{ГТ}$ при наличии утечки на контейнер
 $R(T_1П_1)$ – сопротивление между первым токовым и первым потенциальным электродами;
 $R(T_2П_2)$ – сопротивление между вторым токовым и вторым потенциальным электродами;
 $R(П_1П_2)$ – сопротивление между первым и вторым потенциальными электродами;
 R_{y1}, R_{y2} – сопротивление между проводящим контейнером и токовыми электродами (первым и вторым соответственно); R_K – сопротивление контейнера.

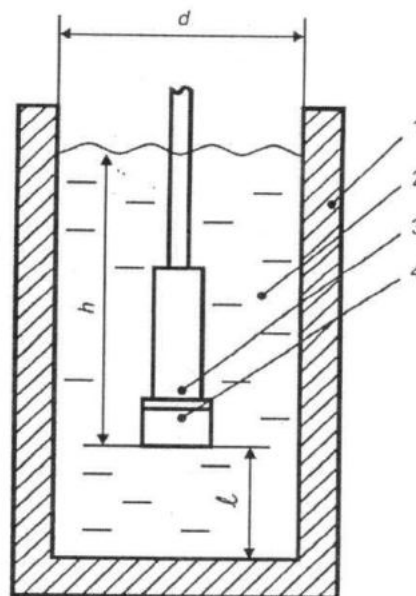


Рис. 5 – Расположение погружаемого устройства в градуировочном баке
1 – градуировочный бак; 2 – морская вода; 3 – контейнер ПУ; 4 – датчик электропроводности; l – расстояние от нижнего торца датчика электропроводности до дна бака; h – уровень морской воды над нижним торцом датчика электропроводности.

Методика исследований. Исследования производились в двух градуировочных электроизоляционных баках с диаметрами $d = 160$ мм (объём воды 2,5 л – малый бак) и $d = 260$ мм (объём воды 16 л – большой бак) в двух растворах морской воды: с малой солёностью ($S = 3,86$ е.п.с.; $G_B = 0,13180$) и большой солёностью ($S = 38,23$ е.п.с.; $G_B = 1,14679$).

Как показано на рис. 5, погружаемое устройство уровнемера помещалось в градуировочный, приготовленный из морской воды, раствор, а нижняя плоскость датчика электропроводности устанавливалась на расстоянии от дна $l = 0$ и записывались показания N_G . Затем ПУ поднималось на 10, 20, 30 и т. д. миллиметров и на каждом уровне записывались показания N_G . При этом на электродах датчика тщательно удалялись пузыри воздуха перед производством отсчётов. Этот эксперимент позволил оценить влияние изменчивости $(K_{лэ})_G$ от изменения l .

Для оценки влияния тока утечки нижний торец датчика электропроводности устанавливался на фиксированном расстоянии от дна $l = 4$ см или $l = 7$ см и изменялся уровень воды h . Для каждого фиксированного значения h производился отсчёт N_G .

Солёность воды в градуировочных баках измерялась с помощью электросолемера СОКОЛ (МГИ 4602) с погрешностью не более $\pm 0,01$ единиц практической солёности. Температура воды в баке контролировалась с помощью образцового судового термометра ИТ зав. № 4 с погрешностью не более $\pm 0,02$ °С.

Относительная электрическая проводимость вычислялась по значениям температуры и солёности на основании табличных данных, опубликованных в работе [4].

Значения l и h устанавливались с помощью стандартного мерительного инструмента.

Отсчёты цифрового эквивалента $N_{G,i}$ переводились в значения относительной электропроводности $G_{k,i}$ с помощью градуировочных формул, полученных по методу наименьших квадратов для малого бака при $l = 70$ мм и $h \geq 50$ мм.

$$(G_{k,i})_M = -0,022 + 204,63 \cdot \frac{1}{N_{G,i}}, \quad (4)$$

а для большого бака – при $l = 70$ мм (при $S = 3,86$) и $l = 40$ мм (при $S = 38,23$) и при $h \geq 150$ мм в обоих случаях

$$(G_{k,i})_B = -0,0179 + 203,65 \cdot \frac{1}{N_{G,i}}, \quad (5)$$

Абсолютная погрешность измерения $\Delta G_{k,i}$ вычислялась по формуле

$$\Delta G_{k,i} = G_{k,i} - G_B. \quad (6)$$

Относительная погрешность измерения δ_{G_i} для каждого значения l или h оценивалась в процентах в соответствии с выражением

$$\delta_{G_i} = \frac{\Delta G_{k,i}}{G_B} \cdot 100. \quad (7)$$

Результаты исследований. На рис. 6 представлены зависимости относительной погрешности измерения относительной электропроводности δ_{G_i} от изменения параметра l для случаев измерений в малом и большом баках при солёности морской воды $S = 3,86$ и $S = 38,23$.

Максимальная погрешность наблюдается при $l = 0$ и достигает $-(60 \div 63)\%$ при измерениях в малом баке и $-(40 \div 49)\%$ при измерениях в большом. При возрастании толщины слоя воды между нижним торцом датчика электропроводности и дном градуировочного бака погрешность нелинейно уменьшалась до низшего значения, когда l становилось равным l_{sp} , при которых производилась градуировка (это для малого бака $l = (60 \div 70)$ мм, для большого – $l = (40 \div 80)$ мм) и нахождение градуировочных уравнений (4) и (5). С дальнейшим увеличением l погрешность становилась положительной и достигала некоторого максимума (для малого бака с водой низкой солёности этот максимум наблюдался при $l \approx 70$ мм, для большой солёности он не был достигнут из-за малого объема воды; в большом баке с водой малой солёности этот максимум лежал в области $l = 130 \div 170$ мм и достигал $\delta_{G_i} = + 0,3\%$, а с водой большой солёности – в области $l = (115 \div 150)$ мм и достигал $\delta_{G_i} \approx + 0,5\%$). Дальнейшее увеличение l приводило к уменьшению погрешности и даже к смене ее знака. Это связано с тем, что уровень воды h опускался ниже металлического контейнера и приходился на изолированный корпус датчика электропроводности.

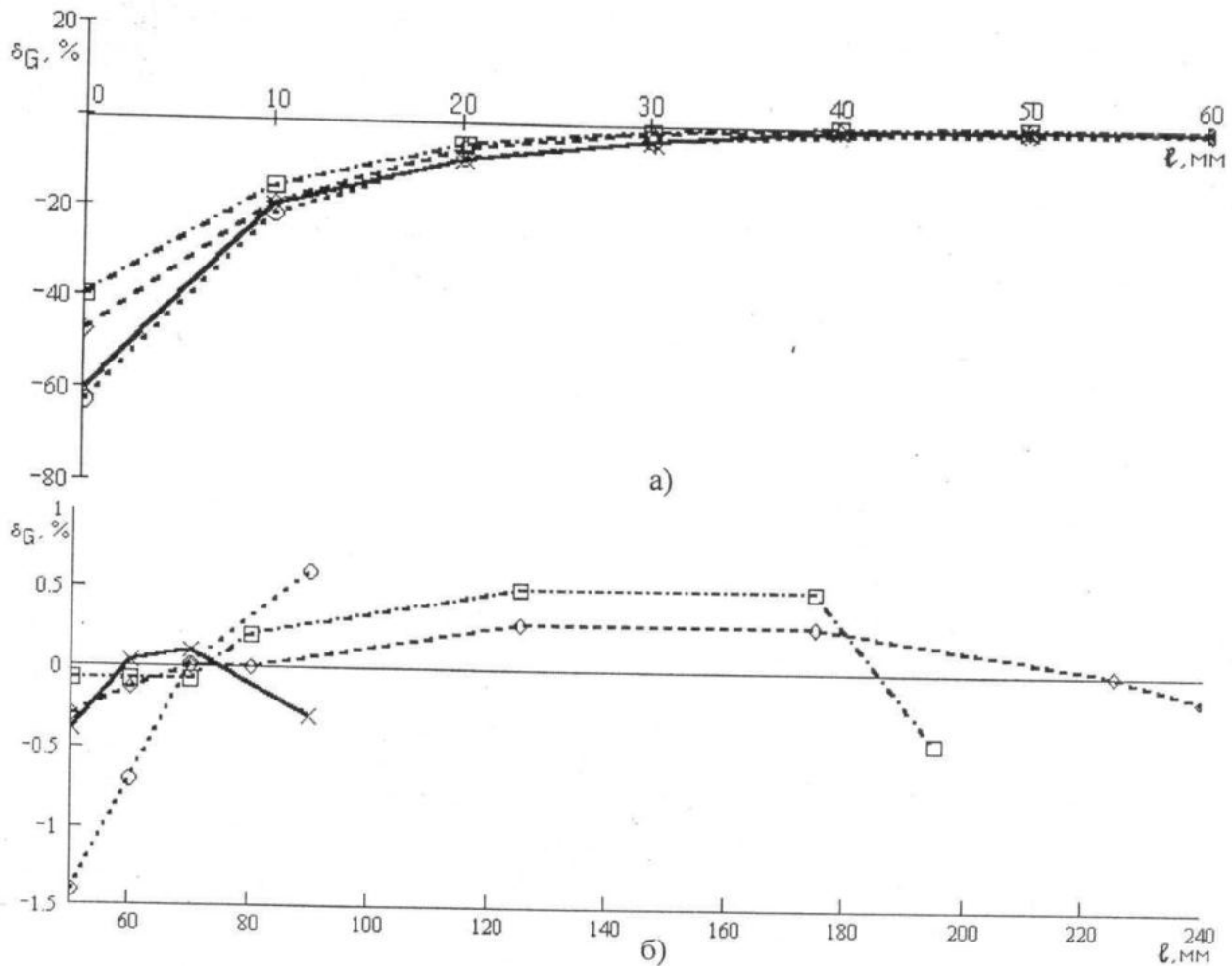


Рис. 6 – Зависимость относительной погрешности измерения относительной электропроводности от толщины слоя морской воды l между нижним торцом датчика и дном градуировочного бака: а) $l = (0-60) \text{ мм}$; б) $l = (50-220) \text{ мм}$

$\times \times \times$ $S = 3.86$ } малый бак; $\diamond \diamond \diamond$ $S = 3.86$ } большой бак.
 $\circ \circ \circ$ $S = 38.23$ } $\square \square \square$ $S = 38.23$ }

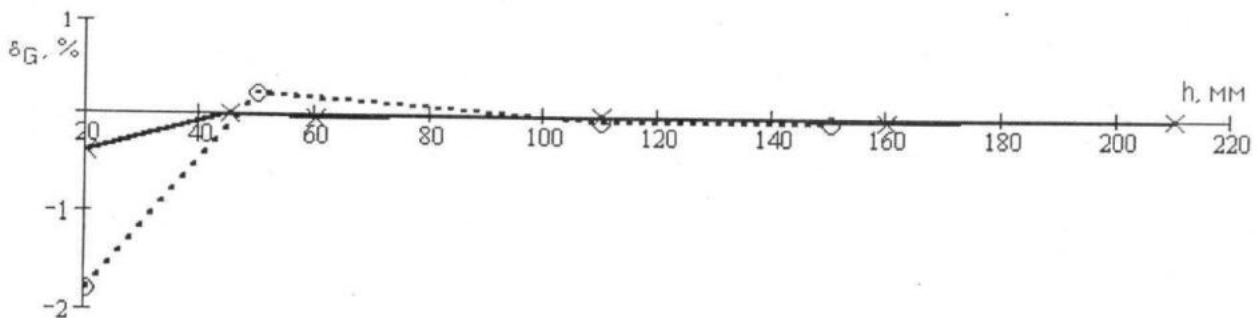


Рис. 7 – Зависимость погрешности измерения относительной электропроводности от уровня морской воды h относительно нижнего торца датчика электропроводности
 $\times \times \times$ - $S = 3.86$; $b = 70 \text{ мм}$,
 $\circ \circ \circ$ - $S = 38.23$; $b = 40 \text{ мм}$.

При этом ток утечки на корпус исчезал и возникала погрешность отрицательного знака, превышающая положительную погрешность при $l > l_{сп}$.

Проведенное исследование показало существование концентрационной зависимости погрешности, вызванной наличием объема осреднения датчика электропроводности. Эта зависимость проявлялась и при $l < l_{сп}$ (особенно заметная для измерений в большом баке), но в меньшей мере, чем при $l > l_{сп}$.

Как видно из рис. 6, диаметр бака также влияет на погрешность измерения, но несколько слабее, чем толщина слоя воды между нижним торцом датчика и дном бака.

На основании анализа изменчивости относительной погрешности измерения относительной электропроводности, особенно по данным измерений в большом баке, можно сделать вывод, что объем осреднения датчика электропроводности в ИУМ-1 эквивалентен объему цилиндра с диаметром $d \approx d_{онм} = 300$ мм и высотой $l = l_{онм} = 180$ мм

$$V_{оср} = \frac{\pi d_{онм}^2}{4} \cdot l_{онм} = 12,7 \text{ л.}$$

На рис. 7 представлена зависимость относительной погрешности измерения δ_G от высоты столба воды h над нижним торцом датчика электропроводности, полученная по измерениям в большом баке. Погрешность измерения лежит в пределах единицы младшего разряда цифрового отсчета в диапазоне изменения h от 210 до 45 мм (уровень воды при этом всегда проходит через металлический контейнер). При $h < 43$ мм (уровень воды не касается контейнера) погрешность резко возрастает (практически ступенчато) и достигает $-0,4\%$ для воды с соленостью $S = 3,86$ и $l = 70$ мм и $-1,8\%$ для воды с соленостью $S = 38,23$ при $l = 40$ мм. Этот скачок связан со скачком (резким уменьшением) тока утечки I_y из-за того, что градуировка измерителя производилась при наличии тока утечки. Именно этот скачок является причиной спада зависимости погрешности δ_G от l в области больших значений l , как показано на рис. 6 б.

Для обеспечения нормальной работы измерителя относительной электропроводности (при условии неизменности электрических характеристик пограничного слоя морская вода – металлический контейнер) необходимо, чтобы уровень воды относительно

нижнего торца датчика электропроводности находился выше $h_{min} = 210$ мм, т.е. погружное устройство измерителя уровня в градуировочном баке или в уровнемерном колодце всегда должно быть погружено в воду полностью. Это говорит о том, что ПУ в колодцах должно быть погружено ниже минимально возможного уровня моря.

Учитывая требование обеспечения $h \geq 210$ мм, $l_{онм} = 180$ мм, $d_{онм} = 300$ мм объем градуировочного бака $V_{сп.б.}$ должен быть не менее

$$V_{сп.б.} \geq \frac{\pi d_{онм}^2}{4} \cdot (l_{онм} + h_{min}) = 27,5 \text{ л.}$$

Заключение. В результате выполненного исследования установлено, что объем осреднения датчика электропроводности в ИУМ-1 составляет 13 л, что в эквиваленте цилиндра соответствует диаметру 300 мм при высоте 185 мм.

Для обеспечения методической погрешности измерения электропроводности, вызванной ограничением объема осреднения датчика электропроводности, меньшей в 2 – 4 раза допустимой инструментальной погрешности канала, градуировочный бак должен иметь объем не менее 27,5 л при высоте 400 мм и внутреннем диаметре 300 мм, минимальная толщина слоя воды в уровнемерном колодце должна быть более 400 мм при диаметре колодца более 300 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.И. Забурдаев, П.В. Гайский, А.Н. Логвинчук. Требования к метрологическим характеристикам и алгоритмам обработки данных гидростатических измерителей уровня воды // Системы контроля окружающей среды. Сб. научн. тр. / НАН Украины. МГИ: – Севастополь, 2002. – С. 108 – 118.
2. В.А. Гайский, Н.А. Греков, П.В. Гайский и др. Измеритель уровня моря // Системы контроля окружающей среды. Сб. научн. тр. / НАН Украины. МГИ: – Севастополь, 2001. – С. 67 – 70.
3. А.В. Клименко. Измерительный преобразователь с импульсным выходом для контактного датчика электрической проводимости // Системы контроля окружающей среды. Сб. научн. тр. / НАН Украины. МГИ: – Севастополь, 2002. – С. 63 – 65.
4. П.А. Калашников. Первичная обработка гидрологической информации. – Ленинград. Гидрометиздат, 1985. – 152 с.