

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ НА АЭС

А.А. Калашников (АО "Атомтехэнерго")

Выполнен метрологический анализ гидростатического метода измерений уровня жидкых сред применительно к измерительным каналам атомных станций. Показаны зависимости систематических составляющих погрешности измерений уровня от теплохимических характеристик рабочей среды, текущего значения уровня в технологической емкости и значений настроек параметров измерительного канала. Рассмотренные зависимости позволяют с высокой степенью точности оценить погрешность измерительного канала и обеспечить процедуры выполнения расчетов соответствующих поправочных коэффициентов, которые вводятся в программно-технические комплексы из состава современных АСУТП АЭС.

Ключевые слова: АЭС, АСУТП, измерение уровня гидростатическим способом, систематическая погрешность измерений.

Введение

В связи с повышением требований к безопасной эксплуатации современных АЭС, к обеспечению надежности и точности измерений, а также с развитием электронно-вычислительных средств изменяются подходы к организации теплотехнического контроля. В частности, разрабатываются новые алгоритмы обработки и корректировки показаний гидростатических уровнемеров [1–3]. Особую значимость в вопросах

разработки таких алгоритмов коррекции показаний имеет задача количественной оценки погрешности измерений уровня. От точности выполнения оценки погрешности измерений, в конечном итоге, зависит и точность расчетов соответствующих поправочных коэффициентов, которые вводятся в программно-технические комплексы, входящие в структуру измерительных каналов современных АСУТП АЭС.

В настоящей статье рассмотрены закономерности, позволяющие с высокой степенью точности выполнить количественную оценку систематических составляющих погрешности гидростатического метода измерений уровня в зависимости от множества факторов: теплохимических характеристик рабочей среды, текущего значения уровня и различных вариаций настроек параметров измерительного канала.

Рассматриваемые зависимости справедливы для наиболее распространенной в атомной отрасли схемы измерения уровня с использованием однокамерного уравнительного сосуда (УСО) [4, 5].

Организация измерений уровня с применением однокамерного уравнительного сосуда

Типовая схема измерения уровня жидких сред гидростатическим способом (посредством датчиков разности давлений) с применением однокамерного уравнительного сосуда (УСО) приведена на рис. 1.

При данной схеме измерений уравнительному сосуду сообщается давление/разрежение со стороны технологической емкости, и на датчике разности давлений (ДД) в общем случае возникает измеряемый перепад давлений:

$$\Delta P = P_{\Sigma^{+}} - P_{\Sigma^{-}} = P_{\text{вн}} + \rho_{\text{ил1}} \cdot g \cdot (h_1 + H) - P_{\text{вн}} - (\rho_{\text{ил2}} \cdot g \cdot h_1 + \rho_{\text{ср}} \cdot g \cdot L) = \rho_{\text{ил1}} \cdot g \cdot H + (\rho_{\text{ил1}} - \rho_{\text{ил2}}) g \cdot h_1 - \rho_{\text{ср}} \cdot g \cdot L, \quad (1)$$

где $P_{\Sigma^{+}}$ и $P_{\Sigma^{-}}$ — общее давление, оказываемое со стороны плюсовой/минусовой линии; $P_{\text{вн}}$ — давление/разрежение внутри технологической емкости; $\rho_{\text{ил1}}$ и $\rho_{\text{ил2}}$ — плотность среды в плюсовой/минусовой импульсной линии и УСО; g — местное ускорение свободного падения на площадке АЭС; h_1 — высота импульсных линий до нижнего штуцера; H — база датчика уровня; L — уровень среды в технологической емкости; $\rho_{\text{ср}}$ — плотность рабочей среды в технологической емкости.

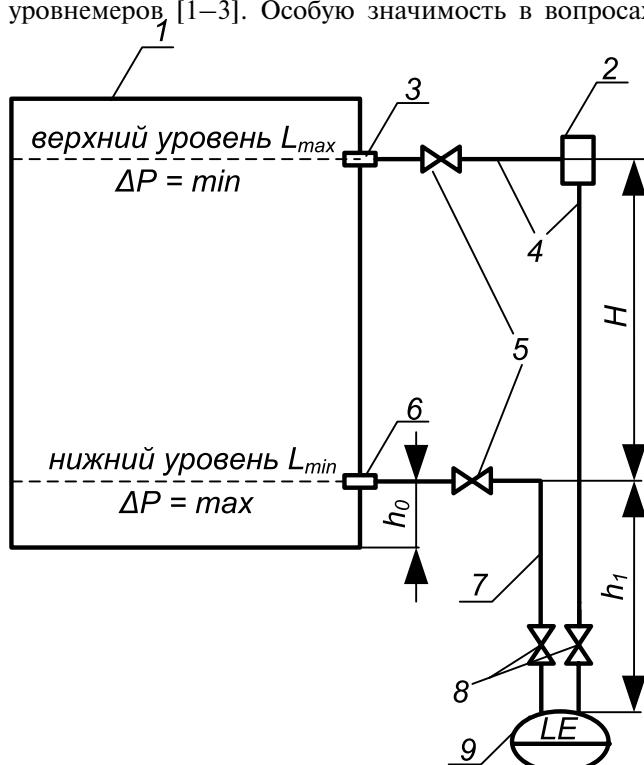


Рис. 1. Измерение уровня в технологической емкости под давлением с применением однокамерного уравнительного сосуда, где 1 – технологическая емкость под давлением; 2 – однокамерный уравнительный сосуд (УСО); 3 – штуцер (врезка плюсовой импульсной линии); 4 – плюсовая импульсная линия (трубная проводка); 5 – коренные вентили; 6 – штуцер (врезка минусовой импульсной линии); 7 – минусовая импульсная линия; 8 – отсечные вентили; 9 – датчик разности давлений (ДД); ΔP – измеряемый перепад давлений; h_1 – высота импульсных линий до нижнего штуцера; H – база уровнемера; h_0 – расстояние от внутренней поверхности дна емкости до нижнего штуцера; L_{\max} – максимальное измеряемое значение уровня; L_{\min} – значение уровня, соответствующее высоте нижнего штуцера

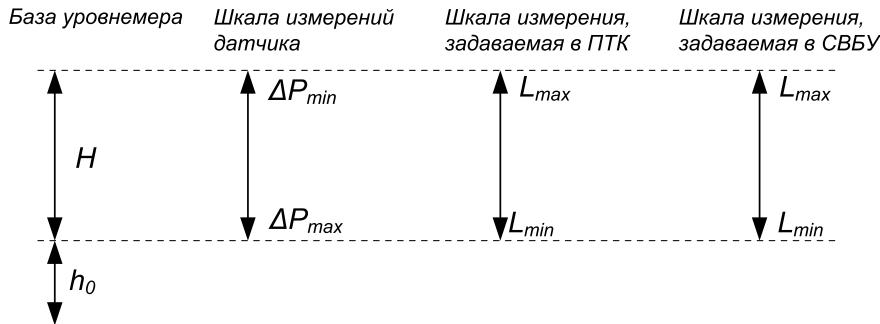


Рис. 2. Соотношение задаваемых шкал измерений

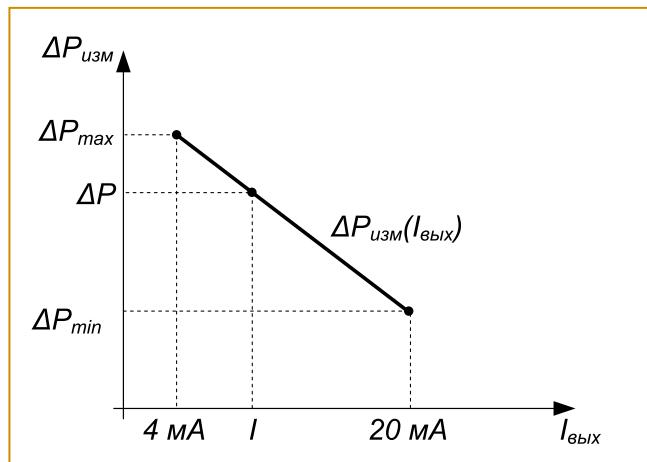


Рис. 3. Общий график зависимости $\Delta P_{\text{изм}}(I_{\text{вых}})$ при убывающей характеристике выходного токового сигнала, где $I_{\text{вых}}$ – токовый выходной сигнал датчика; $\Delta P_{\text{изм}}$ – измеряемый перепад давлений; ΔP_{max} , ΔP_{min} – граничные значения настроенного диапазона измерений на датчике; ΔP – текущее значение измеряемого перепада давлений; I – текущее значение выходного токового сигнала

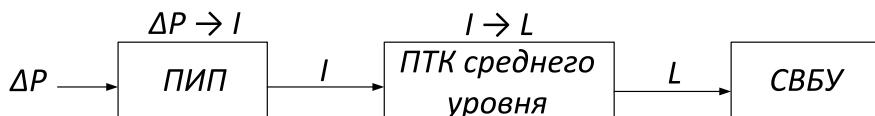


Рис. 4. Схема формирования информационного сигнала в упрощенном виде, где ПИП - первично-измерительный преобразователь (датчик разности давлений); ΔP – измеряемый перепад давлений; I – токовый сигнал; L – текущие показания уровня

При текущем значении уровня $L > H + h_0$ (рис. 1) гидростатическое давление $\rho_{\text{ср}} \cdot g \cdot (L - H - h_0)$ воздействует как на плюсовую, так и минусовую импульсную линию (ИЛ) в связи с чем компенсируется, и область измерений датчика ограничивается величиной фактической базы уровнемера H . В результате, измеряя разность давлений ΔP и задавая зависимость (1), можно определить текущее значение уровня L на протяжении всей высоты базы H .

Зависимость (1) на АЭС задается путем настройки диапазона измерения $[\Delta P_{\text{min}}, \Delta P_{\text{max}}]$ на датчике разности давлений и установки шкалы измерений $[L_{\text{min}}, L_{\text{max}}]$ в ПТК среднего уровня АСУТП и в системе верхнего блочного уровня (СВБУ), входящих в структуру измерительного канала (рис. 2).

Для передачи информационного сигнала от первично-измерительного преобразователя к ПТК используется унифицированный токовый сигнал [4; 20] мА, который формируется за счет установки убывающей выходной токовой характеристики на датчике разности давлений. Общий график убывающей выходной токовой характеристики датчика разности давлений представлен на рис. 3.

В результате в ходе формирования показаний ИК уровень информационный сигнал претерпевает ряд преобразований (рис. 4).

Таким образом, погрешность показаний измерительного канала зависит не только от факторов, влияющих на перепад давлений на датчике, но и от самих преобразований сигнала, определяемых множеством настроек параметров ИК. В свою очередь, это значительно расширяет и спектр причин, которые приводят к различным составляющим погрешности.

Анализ работы систем автоматического регулирования, технологических защит, блокировок и сигнализации в период проведения режимной наладки и динамических испытаний энергоблоков АЭС показывает, что неточность показаний ИК может быть обусловлена следующими основными причинами:

- выполнение монтажа УСО выше, чем верхняя врезка импульсной линии в технологическую емкость, что может быть вызвано определенными техническими особенностями. Поскольку заранее на этапе проектирования узнать фактическое место расположения УСО не представляется возможным, это приводит к несоответствию проектных значений шкал измерений ИК;

- отличие теплохимических характеристик среды в технологической емкости и в импульсных линиях, вызванное разными температурными условиями;

- отличие фактических характеристик рабочей среды от проектных значений;

- изменение фактического места расположения первично-измерительного преобразователя и трасировок импульсных линий по отношению к проектному;

- изменение мест врезки импульсных линий.

В случае отсутствия соответствующих поправок для показаний ИК данные причины приводят к систематическим составляющим погрешности измерений уровня и, как следствие, к некорректной работе систем автоматического регулирования, технологических защит, блокировок и сигнализаций.

Рассмотрим подробнее каждую из систематических составляющих погрешности измерений.

Зависимости систематической погрешности ИК уровня от соотношений настраиваемых шкал измерений и фактической базы H

В случае несоответствий шкал измерений, задаваемых на датчике и в ПТК, по отношению к фактической базе уровнемера возникает систематическая погрешность измерений уровня. Это приводит к завышению или занижению показаний ИК уровня, сопровождающемуся в последнем случае появлением области нечувствительности измерений датчика (рис. 5).

Рассмотрим количественную оценку такой систематической погрешности измерений в зависимости от задаваемых пределов шкал измерений и значения фактической базы уровнемера $\sigma(\Delta P_{max}; \Delta P_{min}; L_{max}; L_{min}; H)$.

Из положений нормативной документации РМГ 29-2013 и описаний методов «Оценки погрешностей результатов измерений» [6] известно, что абсолютное значение погрешности σ можно определить как отклонение результатов измерений физической величины от ее фактического значения:

$$\sigma = |L_{IK} - L|, \quad (2)$$

где L_{IK} — показания ИК уровня; L — фактическое значение уровня в технологической емкости.

Поскольку текущее значение уровня L не зависит от задаваемых шкал измерений и фактической базы уровнемера, то задача сводится к определению L_{IK} . Для этого, основываясь на обратной пропорциональности шкал измерений на датчике и в ПТК (рис. 2), а также с учетом линейности выходной токовой характеристики датчика (рис. 3), представим L_{IK} в виде:

$$L_{IK} = L_{max} - \frac{L_{max} - L_{min}}{\Delta P_{max} - \Delta P_{min}} \cdot (\Delta P - \Delta P_{min}), \quad (3)$$

где ΔP — измеряемый перепад давлений на датчике.

При этом сам измеряемый перепад давлений на датчике для двухфазной рабочей среды в простейшем случае можно определить по формуле [4]:

$$\Delta P = \rho_{пл} \cdot g \cdot H - \rho' \cdot g \cdot L - \rho'' \cdot g \cdot (H - L), \quad (4)$$

где $\Delta P \in [\rho_{пл} \cdot g \cdot H - \rho' \cdot g \cdot H; \rho_{пл} \cdot g \cdot H - \rho'' \cdot g \cdot H]$ — условие, характеризующее минимальный и максимальный перепад давлений на датчике, $\rho_{пл}$ — плотность воды в плюсовой импульсной линии, уравнительном сосуде; ρ' — плотность воды в технологической емкости; ρ'' — плотность пара в технологической емкости.

Тогда, подставив (3), (4) в (2), получим искомую функцию погрешности измерений σ :

$$|L_{IK} - L| = \left| L_{max} + \frac{\Delta P_{min} \cdot (L_{max} - L_{min})}{\Delta P_{max} - \Delta P_{min}} - L - \right. \\ \left. - \frac{(L_{max} - L_{min})}{\Delta P_{max} - \Delta P_{min}} \right|.$$

$$\cdot \frac{\rho_{пл} \cdot g \cdot H + (\rho_{пл} - \rho_{пл2}) \cdot g \cdot h_1 - \rho'' \cdot g \cdot H - L \cdot g \cdot (\rho' - \rho'')}{\Delta P_{max} - \Delta P_{min}}, \quad (5)$$

где $L \in [H - \Delta P_{max}/g \cdot (\rho_{пл} - \rho''); H - (\Delta P_{min}/g \cdot (\rho_{пл} - \rho'))] \cap [H - (L_{max} - L_{min}); H]$ — условие из физического смысла.

Из (5) видно, что погрешность измерений линейно зависит от текущего значения уровня L в техно-

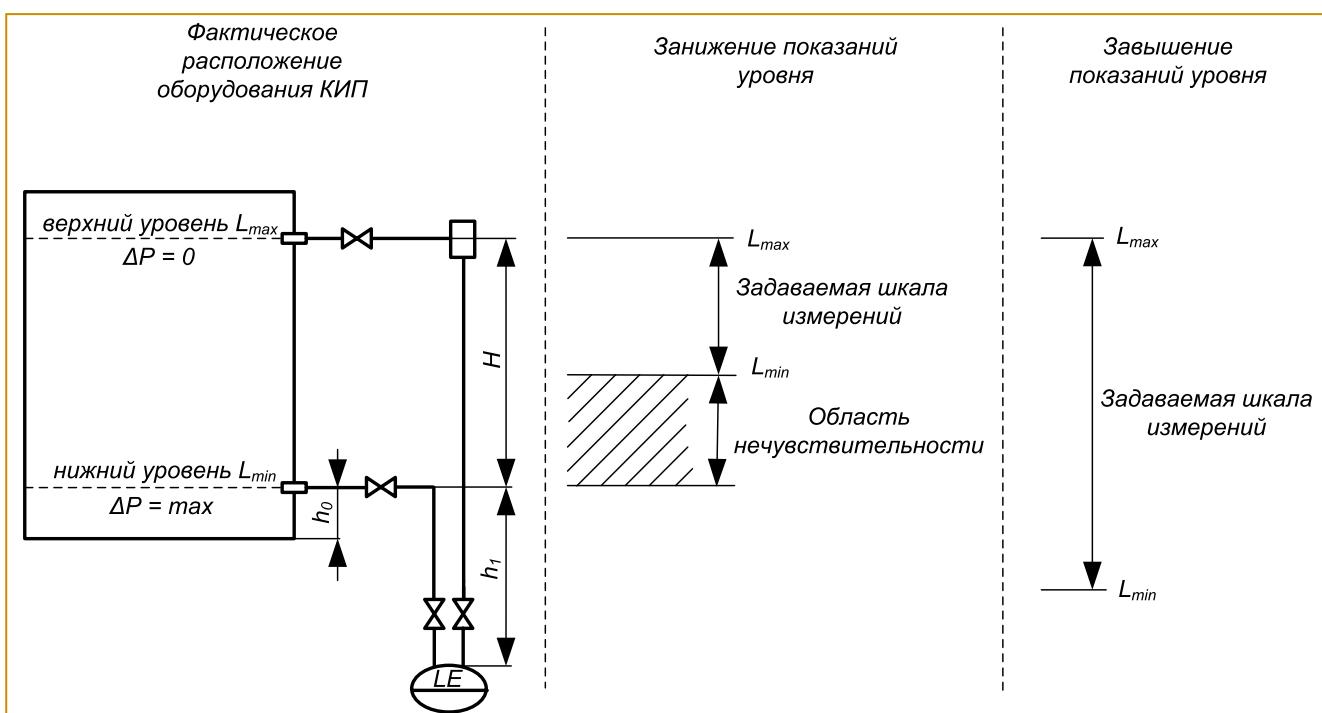


Рис. 5. Соотношение шкалы измерений и фактической базы уровнемера, где ΔP — измеряемый перепад давлений; h_1 — высота импульсных линий до нижней врезки; H — фактическая база уровнемера; h_0 — расстояние от дна емкости до нижней врезки; L_{max} — максимальное измеряемое значение уровня; L_{min} — минимальное измеряемое значение уровня

логической емкости, и при этом характер изменения функции, ее максимум и минимум зависят от взаимных соотношений шкал измерений и фактической базы уровнемера. Выполняя соответствующие подстановки пределов шкал измерений в формулу (5), можно оценить погрешность измерений и определить характер ее изменений в каждом из конкретных случаев.

Таблица 1. Функции погрешностей для частных случаев соотношений шкал измерений

№	Соотношение шкал измерений и базы уровнемера	Частные условия и формула для расчета погрешности	Поведение показаний ИК	График функции погрешности измерений от фактического значения уровня в технологической емкости
1)		Общие условия случая «холодной» шкалы: $\rho'' = 0; \Delta P_{\min} = 0;$ $\rho_{\text{ил1}} = \rho_{\text{ил2}} = \rho'$ Условия частного случая: $\Delta P_{\max} = \rho' \cdot g \cdot L_{\max};$ $L_{\max} < H$ Абсолютная погрешность: $\sigma = L - L_{\text{ик}} = H - L_{\max}$	Занижение показаний: $L - L_{\text{ик}} \geq 0$	
2)		Общие условия случая «холодной» шкалы: $\rho'' = 0; \Delta P_{\min} = 0;$ $\rho_{\text{ил1}} = \rho_{\text{ил2}} = \rho'$ Условия частного случая: $\Delta P_{\max} = \rho' \cdot g \cdot L_{\max};$ $L_{\max} > H$ Абсолютная погрешность: $\sigma = L_{\text{ик}} - L = L_{\max} - H$	Завышение показаний: $L - L_{\text{ик}} < 0$	
3)		Общие условия случая «холодной» шкалы: $\rho'' = 0; \Delta P_{\min} = 0;$ $\rho_{\text{ил1}} = \rho_{\text{ил2}} = \rho'$ Условия частного случая: $\Delta P_{\max} < \rho' \cdot g \cdot L_{\max};$ $L_{\max} = H$ Абсолютная погрешность: $\sigma = L - L_{\text{ик}} = (L - H) \cdot (1 - (\rho' \cdot g \cdot H / \Delta P_{\max}))$	Занижение показаний: $L - L_{\text{ик}} \geq 0$	
4)		Общие условия случая «холодной» шкалы: $\rho'' = 0; \Delta P_{\min} = 0;$ $\rho_{\text{ил1}} = \rho_{\text{ил2}} = \rho'$ Условия частного случая: $\Delta P_{\max} > \rho' \cdot g \cdot L_{\max};$ $L_{\max} = H$ Абсолютная погрешность: $\sigma = L_{\text{ик}} - L_{\phi} = (H - L) \cdot (1 - (\rho' \cdot g \cdot H / \Delta P_{\max}))$	Завышение показаний: $L - L_{\text{ик}} \leq 0$	

В таблице представлены функции погрешности измерений и их графики для частных случаев соотношений шкал измерений и фактической базы, которые наиболее часто встречаются на практике. Так как изменения плотности рабочей среды в данном аспекте систематической составляющей погрешности не рассматриваются, то все функции в таблице для наглядности определены с учетом следующего общего условия:

Величие народа не измеряется его численностью, как величие человека не измеряется его ростом; единственной мерой служит его умственное развитие и его нравственный уровень.

Виктор Гюго

— рабочая среда однофазная: $\rho' = \rho_{\text{пл}} = \rho_{\text{пл2}}$; $\rho'' = 0$;
 $L_{\min} = 0$; $\Delta P_{\min} = 0$.

Полученная общая зависимость (5), а также сведения из таблицы позволяют определить значение составляющей систематической погрешности измерений, вызванной несоответствиями/взаимными смещениями шкал измерений. Кроме того, данные из таблицы на практике удобно использовать и для определения самих вероятных причин недостоверности показаний ИК. Например, на основе построенных графиков можно сделать предварительный прогноз о наличии несоответствий шкал измерений заблаговременно до обхода к самому первично-измерительному преобразователю.

Определение систематической погрешности измерений уровня от теплохимических характеристик рабочей среды

Одна из главных особенностей гидростатического способа измерений уровня состоит в том, что перепад значений давления на датчике зависит от плотности рабочей среды и, как следствие, от текущих значений температуры и давления в технологической емкости. Поскольку в технологических емкостях АЭС температура может достигать >340 °C, то при отсутствии или неточности соответствующих корректировок показаний возникает систематическая погрешность измерений, неприемлемая для выполнения теплотехнического контроля и автоматического регулирования.

При равенстве температуры рабочей среды в технологической емкости температуре окружающего воздуха, соответствующая шкала измерений ИК, обеспечивающая достоверность показаний, условно называется «холодной». Если температура рабочей среды превышает температуру окружающего воздуха, соответствующая шкала измерений условно называется «горячей».

С целью выявления зависимости систематической погрешности измерений от теплохимических характеристик рабочей среды найдем разность между показаниями уровня по «горячей» шкале (соответствующие фактическому значению уровня в технологической емкости) и по «холодной» шкале (соответствующие показаниям ИК без введенных корректировок). Для этого с учетом уравнения (4) распишем перепад давлений на датчике для случая «холодной» и «горячей» шкалы, соответственно:

$$\Delta P = \rho_{\text{ху}}^{\text{ул}} g H - \rho'_{\text{ху}} g \cdot L_{\text{ху}} - \rho''_{\text{ху}} g \cdot H + \rho''_{\text{ху}} g \cdot L_{\text{ху}}, \quad (6)$$

$$\Delta P = \rho_{\text{эу}}^{\text{ул}} g H - \rho'_{\text{эу}} g \cdot L_{\text{эу}} - \rho''_{\text{эу}} g \cdot H + \rho''_{\text{эу}} g \cdot L_{\text{эу}}, \quad (7)$$

где $\rho_{\text{ху}}^{\text{ул}}/\rho_{\text{эу}}^{\text{ул}}$ — плотность воды в плюсовой импульсной линии для «холодной»/«горячей» шкалы, $\rho'_{\text{ху}}/\rho'_{\text{эу}}$ — плотность воды/пара в технологической емкости для «холодной» шкалы, $L_{\text{ху}}/L_{\text{эу}}$ — показания ИК уровня по «холодной»/«горячей» шкале, $\rho'_{\text{ху}}/\rho''_{\text{ху}}$ — плотность воды/пара в технологической емкости для «горячей» шкалы.

Поскольку при $\Delta P \in [\rho_{\text{ху}}^{\text{ул}} g H - \rho'_{\text{эу}} g H; \rho_{\text{ху}}^{\text{ул}} g H - \rho''_{\text{эу}} g H]$ значения всех переменных уравнения (6) удовлетворяют значениям всех переменных уравнения (7), то на указанной области ΔP данные уравнения составляют систему. Решая данную систему относительно отклонения показаний $L_{\text{эу}} - L_{\text{ху}}$, получим искомое соотношение в виде:

$$L_{\text{эу}} - L_{\text{ху}} = H \cdot \left(\frac{\rho_{\text{эу}}^{\text{ул}} - \rho''_{\text{эу}}}{\rho'_{\text{эу}} - \rho''_{\text{эу}}} - \frac{\rho_{\text{ху}}^{\text{ул}} - \rho''_{\text{ху}}}{\rho'_{\text{ху}} - \rho''_{\text{ху}}} \right) - \frac{\Delta P}{g} \cdot \left(\frac{1}{\rho'_{\text{эу}} - \rho''_{\text{эу}}} - \frac{1}{\rho'_{\text{ху}} - \rho''_{\text{ху}}} \right). \quad (8)$$

Входящие в уравнение неизмеряемые значения плотности $\rho_{\text{ху}}^{\text{ул}}, \rho'_{\text{ху}}, \rho_{\text{эу}}^{\text{ул}}, \rho'_{\text{эу}}, \rho''_{\text{ху}}, \rho''_{\text{эу}}$ определяются либо по справочным данным [7], либо при непосредственном решении «Уравнений международной формуляции IAPWS-IF-97» при соответствующих значениях температуры и давления [8, 9].

Так как на практике оценку отклонений показаний удобнее проводить в зависимости от показаний самого ИК уровня, чем от перепада давлений ΔP на датчике, то, подставляя (6) в (8) и учитывая условие $\rho'_{\text{ху}} = \rho_{\text{ху}}^{\text{ул}}$, получим зависимость, упрощающую процедуру выполнения расчетов погрешности измерений на практике:

$$L_{\text{эу}} - L_{\text{ху}} = H \cdot \left(\frac{\rho_{\text{эу}}^{\text{ул}} - \rho''_{\text{эу}} - \rho'_{\text{ху}} + \rho''_{\text{ху}}}{\rho'_{\text{эу}} - \rho''_{\text{эу}}} \right) + L_{\text{ху}} \cdot \left(\frac{\rho'_{\text{ху}} - \rho''_{\text{ху}}}{\rho'_{\text{эу}} - \rho''_{\text{эу}}} - 1 \right). \quad (9)$$

Из уравнений (8) и (9) видно, что отклонение показаний будет постоянно увеличиваться при уменьшении перепада давлений ΔP на датчике и соответственном увеличении показаний ИК уровня $L_{\text{ху}}$:

$$\frac{\partial(L_{\text{эу}} - L_{\text{ху}})}{\partial(-\Delta P)} > 0 \text{ для } \forall \Delta P \in R,$$

$$\frac{\partial(L_{\text{эу}} - L_{\text{ху}})}{\partial(L_{\text{ху}})} > 0 \text{ для } \forall L_{\text{ху}} \in R.$$

Однако перепад давлений ΔP для случая «горячей» шкалы имеет физические ограничения $\Delta P \in [\rho_{\text{эу}}^{\text{ул}} g H - \rho'_{\text{эу}} g H; \rho_{\text{эу}}^{\text{ул}} g H - \rho''_{\text{эу}} g H]$, поэтому по факту отклонение показаний будет иметь свое минимальное и максимальное значение (рис. 6).

Учитывая данные физические ограничения, полученная зависимость (9) позволяет не только осуществлять количественную оценку систематической погрешности измерений, но и прогнозировать изме-

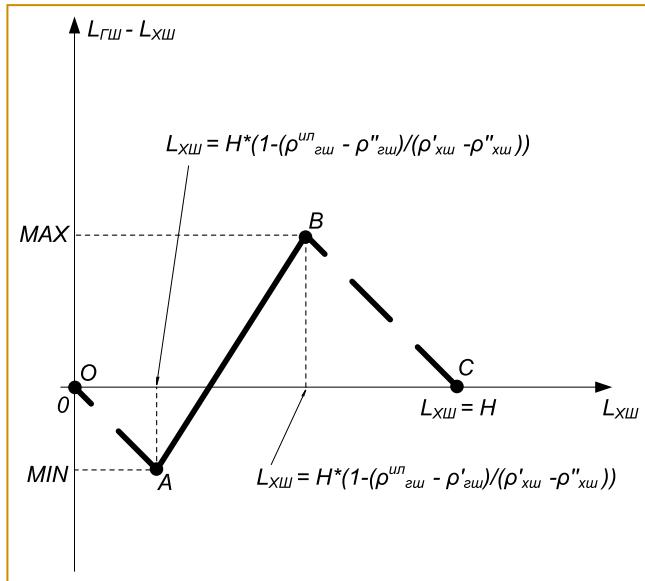


Рис. 6. График отклонений фактического значения уровня L_{xsh} (по «горячей» шкале) от нескорректированных показаний канала L_{xsh} , где отрезок AB – часть графика, характеризующая действительное изменение отклонения показаний в зависимости от нескорректированного значения уровня L_{xsh} ; отрезки OA и BC являются условными продолжениями графика в областях изменений L_{xsh} , которые выходят за граничные физические условия изменений перепада давлений ΔP на датчике

нения фактического значения уровня, которые будут происходить при повышении давления и температуры рабочей среды в технологической емкости. Как следствие, это позволяет спрогнозировать и поведение технологических защит, блокировок и сигнализаций, а также систем автоматического регулирования заведомо до работы технологического оборудования на номинальных рабочих параметрах.

Заключение

Рассмотренные закономерности изменений систематических составляющих погрешности измерений уровня позволяют с высокой степенью точности оценить погрешность измерительного канала в зависимости от текущих значений теплохимических характеристик рабочей среды и значений настроек параметров ИК.

Полученные формулы для оценки погрешности измерений уровня позволили разработать универсальные алгоритмы коррекции показаний измерительных каналов на АЭС, основанные на введении поправочных

коэффициентов в ПТК из состава АСУТП АЭС [1]. Впоследствии разработанные алгоритмы получили отраслевое внедрение и стали использоваться при введении в эксплуатацию вновь проектируемых и строящихся АЭС РФ с 2013 г.

Приведенное в статье математическое описание систематических погрешностей и разработанные алгоритмы коррекции показаний послужили основой для составления организационной документации «Методы корректировки показаний измерительных каналов давления, уровня и расхода на АЭС с реактором типа ВВЭР». ПМ. АТЭ.813.0191-2013», которую стали использовать при оперативной работе более чем 20 предприятий, входящих в состав Госкорпорации «Росатом» и смежных отраслей. Так, с учетом показанных в статье формул для оценки погрешности измерений были определены критерии по введению корректировок показаний ИК уровня в составе АСУ ТП энергоблока № 3 Ростовской АЭС и энергоблока № 1 Ленинградской АЭС-2.

Список литературы

1. Калашников А.А. Корректировка показаний измерительных каналов уровня с датчиками разности давлений на АЭС // Контроль. Диагностика. 2015. № 12. С. 69 -75.
2. Хашемиан Х.М. Техническое обслуживание измерительных устройств на атомных электростанциях. – М.: Бином, 2012. 352 с.
3. Хашемиан Х.М. Датчики технологических процессов: характеристики и методы повышения надежности. М.: Бином, 2008. 336 с.
4. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов по специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов». М.: Энергия, 1978. 704 с.
5. Хансуваров К.И., Цейтлин В.Г. Техника измерения давления, расхода и уровня жидкости, газа и пара: учеб. пособие для техникумов. М.: Изд. стандартов, 1990. 287 с.
6. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 304 с.
7. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: справочник. М.: Изд. МЭИ. 1999. 168 с.
8. Александров А.А. Система уравнений IAPWS-IF-97 для вычисления термодинамических свойств воды и водяного пара в промышленных расчетах. Ч.1. Основные уравнения // Теплоэнергетика. 1998. № 9. С. 69 -77.
9. Александров А.А. Система уравнений IAPWS-IF-97 для вычисления термодинамических свойств воды и водяного пара в промышленных расчетах. Ч.2. Дополнительные уравнения // Теплоэнергетика. 1998. № 10. С. 64 -71.

Калашников Александр Александрович – ведущий инженер московского филиала
«Центрратомтехэнерго» АО «Атомтехэнерго».
E-mail: kalashnikov@cate.ru

Оформить подписку на журнал "Автоматизация в промышленности" вы можете:

- в **России** – в любом почтовом отделении по каталогу "Газеты. Журналы" агентства "Роспечать" (подписной индекс **81874**) или по каталогу "Пресса России" (подписной индекс **39206**).
- в **странах СНГ и дальнего зарубежья** – через редакцию (www.avtprom.ru).

Все желающие, вне зависимости от места расположения, могут оформить подписку, начиная с любого номера, прислав заявку в редакцию или оформив анкету на сайте www.avtprom.ru

В редакции также имеются экземпляры журналов за прошлые годы.