

# ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ, ВЕЩЕСТВ, МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ (05.11.13)

УДК 621.3.088.7: 621.039

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-119-125

## Цифровая коррекция показаний измерительных каналов уровня жидких сред с областью нечувствительности датчиков на атомных электрических станциях

И.А. Воронков, А.А. Калашников

Внедрение и развитие цифровых программно-технических комплексов (ПТК) в современной энергетике привело к полной модернизации измерительных систем атомных электростанций (АЭС) российского производства. В частности, с 2013 г. широкое распространение получили методы цифровой коррекции показаний гидростатических уровнемеров, опыт внедрения которых был обобщен в справочной и организационно-методической литературе в 2017 г. Однако последующие результаты пусконаладочных работ вновь проектируемых и строящихся энергоблоков АЭС показали, что в данной производственной области остаются нерешенными некоторые задачи, одной из которых является разработка методов цифровой коррекции показаний измерительных каналов (ИК) уровня жидких сред в технологических баках, находящихся под давлением, в случае появления области нечувствительности датчиков.

Ее сложность обусловлена тем, что учесть область нечувствительности датчика за счет введения постоянной поправки к показаниям ИК не представляется возможным в связи с особенностями протекания технологического процесса. Так, при работе энергоблоков АЭС, плотность воды в технологических баках и сосудах под давлением снижается с 980 до 590 кг/м<sup>3</sup>, а плотность пара увеличивается с 0 до 100 кг/м<sup>3</sup>. Подобные изменения приводят к сложным теплофизическим межфазным процессам, протекающим в условиях больших тепломассовых переносов пароводяной смеси. В результате граница области нечувствительности датчика существенно меняется в продольном сечении бака в зависимости от текущих значений теплофизических характеристик рабочей среды.

Для решения указанной задачи предложены методы цифровой онлайн-коррекции показаний ИК-уровня, учитывающие изменения теплофизических характеристик двухфазной рабочей среды (пар-вода) в режиме непрерывного технологического процесса.

На сегодняшний день внедрение методов цифровой коррекции особенно актуально в связи с развитием отраслевых программ по увеличению мощности и КПД вновь проектируемых и действующих энергоблоков АЭС, предъявляющих повышенные требования к точности теплофизических измерений и эксплуатационной безопасности в целом.

*Ключевые слова:* измерение уровня жидких сред гидростатическим способом, область нечувствительности датчика, атомная электростанция.

*Для цитирования:* Воронков И.А., Калашников А.А. Цифровая коррекция показаний измерительных каналов уровня жидких сред с областью нечувствительности датчиков на атомных электрических станциях // Вестник МЭИ. 2021. № 2. С. 119—125. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-119-125.

## Digital Correction of Readings Produced by Fluid Level Measurement Channels at NPPs Equipped with Sensors Having a Dead Zone

I.A. Voronkov, A.A. Kalashnikov

The introduction and development of computerized digital systems in modern power engineering has led in Russia to a full modernization of domestically produced nuclear power plant measurement systems. In particular, digital methods for correcting the readings of hydrostatic level sensors have been widely put in use since 2013. The experience gained from putting them in use was generalized in the reference and organizational and methodological literature in 2017. However, the subsequent results of preoperational adjustments carried out at newly designed nuclear power units and at those under construction have shown that some issues still remain unresolved in this application field.

In particular, there is a need to develop digital methods for correcting the readings produced by channels measuring the level of liquid media in pressurized process tanks if there occurs a sensor dead zone.

The complexity of this problem is stemming from the fact that it is not possible to take the sensor dead zone into account by introducing a constant correction to the measurement channel readings in view of the technological process peculiarities. Thus, during the operation of nuclear power units, the water density in pressurized process tanks and vessels decreases from 980 to 590 kg/m<sup>3</sup>, and the vapor density increases from 0 to 100 kg/m<sup>3</sup>. Such changes give rise to complex thermal and physical interphase processes that occur under the conditions of large mass transfers of the vapor--water mixture. As a result, the sensor's dead zone boundary undergoes an essential change in the tank longitudinal section depending on the current values of the working fluid thermal and physical characteristics.

To solve this problem, digital methods for online correction of measured level readings are proposed that take into account changes in the two-phase working medium (vapor--water) in the course of a continuous technological process.

Nowadays, the introduction of digital methods for correcting the hydrostatic level sensor readings is especially relevant in connection with the development of industry programs aimed at increasing the capacity of newly designed and operating nuclear power units, which pose more demanding requirements to the accuracy of thermal and physical measurements and operational safety as a whole.

*Key words:* liquid media hydrostatic level measurements, sensor dead zone, nuclear power plant.

*For citation:* Voronkov I.A., Kalashnikov A.A. Digital Correction of Readings Produced by Fluid Level Measurement Channels at NPPs Equipped with Sensors Having a Dead Zone. Bulletin of MPEI. 2021;2:119—125. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-119-125.

## Введение

Внедрение и развитие цифровых программно-технических комплексов (ПТК) в современной энергетике привело к глубокой модернизации измерительных систем атомных электростанций (АЭС) РФ. В частности, с 2013 г. стали применяться методы цифровой коррекции показаний гидростатических уровнемеров [1, 2]. Их внедрение позволило качественным образом перейти от ранее используемой однорежимной коррекции показаний датчиков, обеспечивающей достоверность результатов измерений только при номинальных параметрах рабочей среды, к многорежимной динамической коррекции. В результате динамическая погрешность измерительных каналов уровня насыщенных жидких сред в переходных режимах работы технологического оборудования машзала АЭС в среднем была снижена с 20 до 3% от длины шкалы измерений [1]. Это помогло полностью пересмотреть отраслевые методы и подходы по коррекции показаний, в частности, и организации измерений уровня жидких сред гидростатическим способом, в целом. С 2014 г. созданные методы цифровой коррекции стали применяться на всех вновь проектируемых и строящихся АЭС РФ. Результаты многочисленных исследований и внедрений методов цифровой коррекции показаний измерительных каналов (ИК) уровня в своем большинстве были обобщены в 2017 г. в справочнике [3].

Сегодняшний опыт пусконаладочных работ энергоблоков АЭС новых поколений показывает, что в данной области коррекции показаний гидростатических уровнемеров остаются нерешенными некоторые задачи для определенных производственных условий монтажа датчиков. На АЭС они встречаются достаточно редко, но от качества их решений зависит эффективность работы измерительных систем и, следовательно, работоспособность автоматического регулирования, технологических защит, блокировок и сигнализаций, что сказывается на эксплуатационной безопасности производства.

Одна из таких задач — измерение уровня жидкостей в баках и сосудах под давлением/разрежением

в условиях вынужденных отступлений от нормативных требований, предъявляемых к монтажу датчиков давления, а именно, их размещению в гидростатических измерительных схемах.

Рассмотрим подробно особенности измерения уровня жидких сред в таких условиях на примере гидростатической схемы с однокамерным уравнительным сосудом (УСО), как наиболее распространенной в атомной отрасли.

## Измерение уровня жидкости с использованием однокамерного уравнительного сосуда

Типовая схема измерений уровня гидростатическим способом (посредством датчиков разности давлений) с применением однокамерного уравнительного сосуда приведена на рис. 1 [4].

Из рисунка 1 следует, что датчик разности давлений (ДД) в соответствии с действующими нормативными требованиями [5] монтируется ниже врезок импульсных линий (ИЛ) — трубных проводок между датчиком и технологическим баком под давлением. Это позволяет измерять уровень жидкости в баке по всей высоте базы уровнемера  $H$ . Если датчик разместить выше врезки минусовой импульсной линии  $b$ , то гидростатическое давление столбов жидкости в ИЛ и баке уравновесят друг друга. В результате возникнет область нечувствительности датчика, в пределах которой измерения уровня невозможны. Это считается отступлением от нормативных требований по монтажу датчиков, но в определенных практических условиях может быть вынужденным. Например, в тех случаях, когда технологический бак расположен в приямах или полуэтажах, как показано на рис. 2. В таком случае возникает практическая потребность в учете образовавшейся области нечувствительности датчика в обеспечение достоверных показаний ИК.

На первый взгляд может показаться, что для учета области нечувствительности достаточно ввести постоянную поправку в показаниях ИК. В действительности задача усложняется тем, что на энергоблоках АЭС

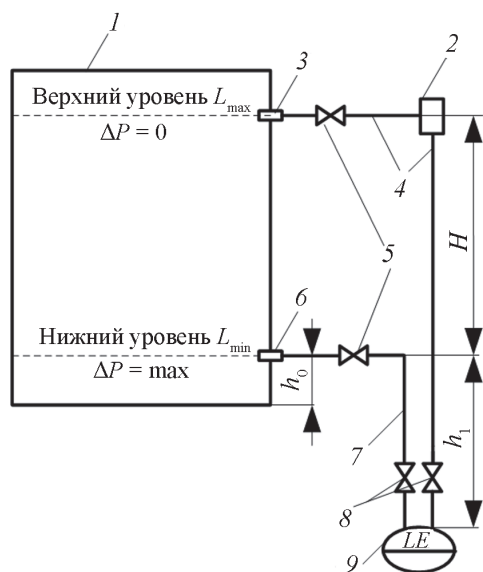


Рис. 1 Типовая промышленная схема измерения уровня жидкости с применением УСО:

1 — технологическая емкость под давлением; 2 — одинарный уравнильный сосуд; 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;  $\Delta P$  — измеряемый перепад давлений;  $h_1$  — высота импульсных линий до минусового отбора;  $H$  — база уровнемера;  $h_0$  — расстояние от нижней образующей дна емкости до минусового отбора;  $L_{\max}$  — максимальное измеряемое значение уровня;  $L_{\min}$  — значение уровня, соответствующее рабочей среде на высоте минусового отбора импульса

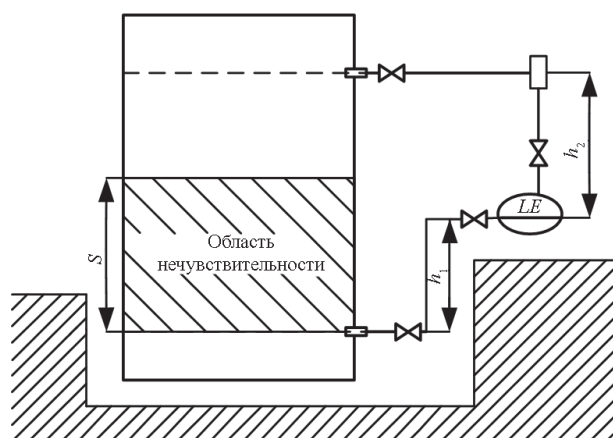


Рис. 2. Измерение уровня жидкости в технологическом баке при возникновении области нечувствительности датчика разности давлений:

$h_1, h_2$  — высоты минусовой импульсной линии от нижней врезки до датчика и плюсовой импульсной линий от датчика до УСО;  $S$  — высота области нечувствительности

плотность воды уменьшается до  $590 \text{ кг/м}^3$ , а плотность пара при этом возрастает до  $100 \text{ кг/м}^3$  (при температуре  $346 \text{ }^\circ\text{C}$ ). В результате граница области нечувствительности становится нечеткой, меняется в зависимости от текущих значений давления и температуры двухфазной рабочей среды (пар–вода). Перепад давления на датчике для подобных условий описывается формулой:

$$\Delta P = P_{\text{вн}} + \rho'_{\text{ил}} g h_2 - P_{\text{вн}} - \rho'' g (h_1 + h_2 - S - L) - \rho' g L - \rho' g S + \rho'_{\text{ил}} g L, \quad (1)$$

где  $\Delta P$  — измеряемый перепад давлений;  $P_{\text{вн}}$  — давление/разрежение внутри технологической емкости;  $\rho'_{\text{ил}}$  — плотность среды в импульсной линии и УСО;  $g$  — местное ускорение свободного падения на площадке АЭС;  $\rho', \rho''$  — плотности воды и паровоздушной смеси внутри технологической емкости;  $L$  — уровень среды в технологической емкости.

Из уравнения (1) следует, что показания датчика зависят не только от плотности воды и пара в технологическом баке, но и от плотности воды в импульсных линиях и уравнильном сосуде. Следовательно, при коррекции показаний ИК-уровня необходимо учесть вариативность этих параметров в зависимости от давления и температуры среды, как в технологическом баке, так и в импульсных линиях и УСО.

Когда температура рабочей среды в технологической емкости равна температуре окружающего воздуха, соответствующую шкалу измерений датчика, обеспечивающую достоверность показаний ИК, в атомной отрасли принято называть «холодной». Если температура рабочей среды выше температуры окружающего воздуха — соответствующая шкала измерений условно называется «горячей» [1].

Задача цифровой коррекции показаний ИК-уровня состоит в том, чтобы выполнить пересчет показаний от «холодной» шкалы к «горячей» с учетом области нечувствительности датчика. Для ее выполнения определим расчетные формулы для поправочных коэффициентов на «горячую» шкалу.

### Вывод расчетных формул для поправочных коэффициентов на «горячую» шкалу

В качестве основы для вывода формул положена апробированная методология по организации цифровой коррекции показаний и математический аппарат [2]. Они позволили пересмотреть отраслевую методическую базу и стали применяться на всех вновь проектируемых и строящихся АЭС РФ с 2014 г. [1, 2].

Вывод формул для поправочных коэффициентов предполагает составление системы уравнений перепада давлений на датчике для «холодной» и «горячей» шкал с учетом конкретных условий поставленной задачи. В настоящем случае — с учетом нижней области нечувствительности датчика (см. рис. 2).

Поскольку в случае «холодной» шкалы рабочая среда в технологическом баке, ИЛ и УСО находится под

атмосферным давлением и имеет температуру, равную температуре окружающего воздуха, то справедливы условия  $\rho = \rho'_{\text{пл}} = \rho'_{\text{хш}}$  и  $S = h_1$ . Учитывая это, уравнение (1) для случая «холодной» шкалы преобразуется к виду:

$$\Delta P = P_{\text{вн}} + \rho'_{\text{хш}} g h_2 - P_{\text{вн}} - \rho''_{\text{хш}} g (h_2 - L_{\text{хш}}) - \rho'_{\text{хш}} g L_{\text{хш}} - \rho'_{\text{хш}} g h_1 + \rho'_{\text{хш}} g h_1, \quad (2)$$

где  $\rho'_{\text{хш}}$ ,  $\rho''_{\text{хш}}$  — плотности воды и паровоздушной смеси в технологической емкости, соответствующие случаю «холодной» шкалы;  $L_{\text{хш}}$  — уровень воды в технологической емкости для «холодной» шкалы.

В случае «горячей» шкалы условие равенства плотностей отсутствует, а (1) выглядит как

$$\Delta P = P_{\text{вн}} + \rho'_{\text{пл}} g h_2 - P_{\text{вн}} - \rho''_{\text{гш}} g (h_1 + h_2 - S - L_{\text{гш}}) - \rho'_{\text{гш}} g L_{\text{гш}} - \rho'_{\text{гш}} g S + \rho'_{\text{пл}} g h_1, \quad (3)$$

где  $L_{\text{гш}}$  — уровень воды в технологической емкости для случая «горячей» шкалы;  $\rho'_{\text{гш}}$ ,  $\rho''_{\text{гш}}$  — плотности воды и паровоздушной смеси в технологической емкости для «горячей» шкалы.

Исходя из того, что значения переменных в (2) удовлетворяют значениям переменных в (3), справедлива система:

$$\begin{cases} \Delta P = P_{\text{вн}} + \rho'_{\text{хш}} g h_2 - P_{\text{вн}} - \rho''_{\text{хш}} g (h_2 - L_{\text{хш}}) - \rho'_{\text{хш}} g L_{\text{хш}} - \rho'_{\text{хш}} g h_1 + \rho'_{\text{хш}} g h_1; \\ \dots \\ \Delta P = P_{\text{вн}} + \rho'_{\text{пл}} g h_2 - P_{\text{вн}} - \rho''_{\text{гш}} g (h_1 + h_2 - S - L_{\text{гш}}) - \rho'_{\text{гш}} g L_{\text{гш}} - \rho'_{\text{гш}} g S + \rho'_{\text{пл}} g h_1 \end{cases} \quad (4)$$

при  $\Delta P \in [\rho'_{\text{пл}} g h_2 + \rho'_{\text{пл}} g h_1 - \rho'_{\text{гш}} g (h_2 + h_1); \rho'_{\text{пл}} g h_2 + \rho'_{\text{пл}} g h_1 - \rho''_{\text{гш}} g (h_2 + h_1)]$ ;  $L_{\text{хш}} [h_1; h_1 + h_2]$ ;  $L_{\text{гш}} [S_{\text{гш}}; h_1 + h_2]$ .

Решая систему (4) относительно  $L_{\text{гш}}$ , определим функцию пересчета показаний ИК-уровня от «холодной» шкалы к «горячей»:

$$L_{\text{гш}} = \frac{L_{\text{хш}} (\rho'_{\text{хш}} - \rho''_{\text{хш}}) - h_1 \left( \rho''_{\text{гш}} - \frac{\rho''_{\text{гш}} \rho'_{\text{пл}}}{\rho'_{\text{гш}}} \right) - h_2 (\rho''_{\text{гш}} - \rho'_{\text{пл}} + \rho'_{\text{хш}} - \rho''_{\text{хш}})}{\rho'_{\text{гш}} - \rho''_{\text{гш}}}.$$

Для упрощения производственных расчетов полученную функцию преобразуем к следующему виду:

$$L = k L_{\text{хш}} + b, \quad (5)$$

где поправочные коэффициенты  $k$  и  $b$  равны:

$$k = \frac{(\rho'_{\text{хш}} - \rho''_{\text{хш}})}{(\rho'_{\text{гш}} - \rho''_{\text{гш}})},$$

$$b = \frac{-h_1 \left( \rho''_{\text{гш}} - \frac{\rho''_{\text{гш}} \rho'_{\text{пл}}}{\rho'_{\text{гш}}} \right) - h_2 (\rho''_{\text{гш}} - \rho'_{\text{пл}} + \rho'_{\text{хш}} - \rho''_{\text{хш}})}{\rho'_{\text{гш}} - \rho''_{\text{гш}}}.$$

Поскольку полученные расчетные формулы для поправочных коэффициентов  $k$ ,  $b$  выведены на областях  $L_{\text{хш}} \in [h_1; h_1 + h_2]$  и  $L_{\text{гш}} [S_{\text{гш}}; h_1 + h_2]$ , то необходимо дополнительно учесть сдвиг показаний ИК-уровня на величину  $h_1$  и высоту нижней врезки импульсной линии  $h_0$ . Тогда функция (5) преобразуется к виду:

$$L = k(L_{\text{хш}} - h_0 - h_1) + b + h_0 + h_1;$$

$$L = K L_{\text{хш}} + B,$$

где  $K = k$ ;  $B = -k h_0 - k h_1 + b + h_0 + h_1$ .

Когда на энергоблоках АЭС за нулевое значение уровня принимается высота нижней врезки ИЛ, параметр  $h_0$  приравнивается к нулю. Если за нулевое значение по показаниям уровнемера взята внутренняя образующая дна бака, то  $h_0$  не обнуляется. Таким образом, полученные расчетные формулы для поправочных коэффициентов  $K$ ,  $B$  характеризуют общий случай в части выбора нулевого значения шкалы измерений ИК-уровня и позволяют выполнять цифровую коррекцию его показаний в условиях непрерывного технологического процесса.

#### Цифровая коррекция показаний на основе выведенных расчетных формул

Для реализации цифровой коррекции показаний уровня на номинальных значениях характеристик рабочей среды (давления, температуры и плотности) первоначально идет расчет поправочных коэффициентов  $K$ ,  $B$  по выведенным формулам. При этом плотность воды и водяного пара берутся из данных справочника [6] для номинальных значений давления и температуры рабочей среды.

По результатам расчетов найденные поправочные коэффициенты вводятся в программно-технический комплекс (ПТК), входящий в структуру ИК [7]. Таким образом, создается непрерывный пересчет показаний ИК-уровня на «горячую» шкалу (рис. 3).

Из данных рис. 3 видно, что указанный способ цифровой коррекции показаний позволяет контролировать уровень как по «холодной», так и по «горячей» шкалам (на номинальных характеристиках среды). При этом по необходимости в ПТК можно предусмотреть автоматический «безударный» переход показаний уровня с «холодной» шкалы на «горячую».

Единственный недостаток описанного способа цифровой коррекции заключается в том, что область достоверности показаний уровня ограничена только двумя режимами работы технологического оборудования. При переходных процессах, когда теплофизические характеристики среды не достигают номинальных значений, достоверность показаний не гарантируется.

Для корректировки показаний уровня в динамике, в том числе в случаях переходных процессов, в ПТК



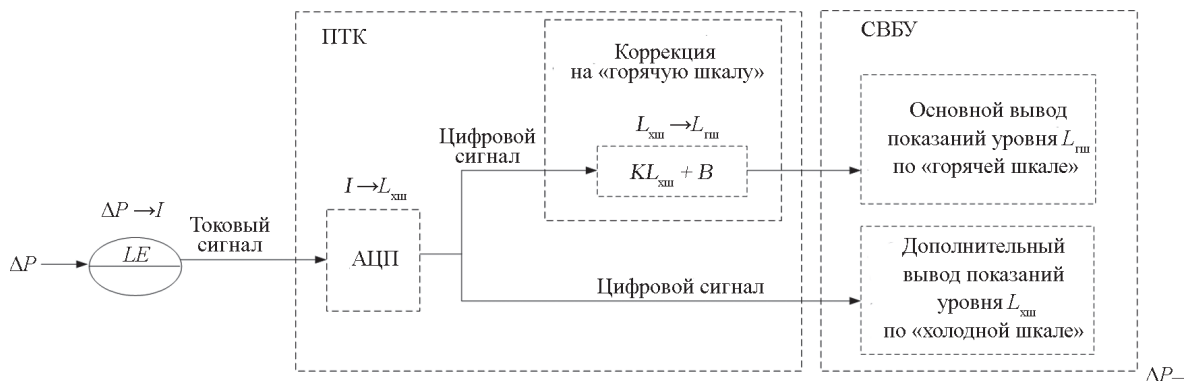


Рис. 3. Поясняющая схема работы цифровой коррекции показаний ИК-уровня на номинальные характеристики рабочей среды:  $\Delta P$  — измеряемый перепад давлений;  $LE$  — датчик разности давлений, настроенный на «холодную» шкалу (согласно ГОСТ 22520);  $I$  — выходной токковый сигнала датчика; АЦП — аналого-цифровой преобразователь;  $L_{хш}$ ,  $L_{гш}$  — показания уровня по «холодной» и «горячей» шкалам; СВБУ — система верхнего блочного уровня

необходимо дополнительно организовать непрерывный расчет поправочных коэффициентов  $K, B$  с учетом текущих значений плотности воды и водяного пара по ранее представленным формулам.

Плотности воды и водяного пара в режиме реального времени удобно определять на основании «Уравнений международной формуляции IAPWS-IF», подробное описание которых дано в [9, 10]. Исходными данными для расчетов плотности являются соответствующие текущие показания от датчиков давления и температуры в технологическом баке (рис. 4).

Предложенный способ цифровой динамической коррекции, в отличие от предыдущего, обеспечивает достоверность показаний во всех возможных режимах работы технологического оборудования. К его «обратной стороне медали» относятся повышенные требования к вычислительной мощности ПТК и использова-

ние дополнительных измерительных каналов давления и температуры.

На практике, в зависимости от конкретных условий, требований к точности измерений и автоматическому регулированию, и, исходя из возможностей технических средств АСУ ТП, можно выбрать наиболее подходящий из предлагаемых способов цифровой коррекции показаний ИК-уровня.

В заключение отметим, что представленные способы коррекции охватывают весь комплекс корректировочных процедур и преобразований измерительного сигнала. Управляющие воздействия для схем автоматического регулирования формируется в цифровом виде без каких-либо приближений по полученным скорректированным показаниям ИК, поэтому дальнейшая коррекция в тракте формирования управляющего воздействия на АЭС не применяется.

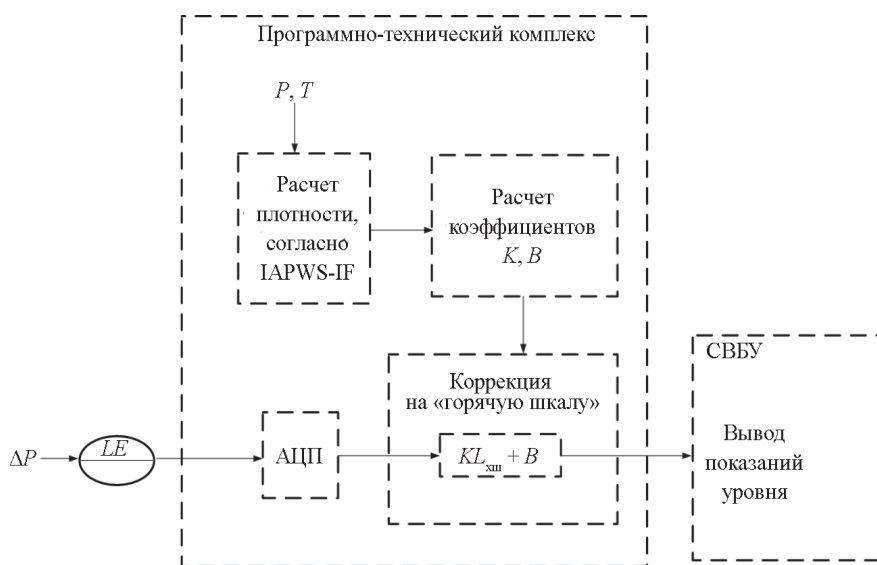


Рис. 4. Поясняющая схема цифровой динамической коррекции:  $P, T$  — текущие значения давления и температуры в технологическом баке

**Заключение**

Приведенные способы цифровой коррекции предназначены для повышения достоверности показаний ИК-уровня в условиях вынужденных отступлений от нормативных требований по монтажу датчиков, ведущих к возникновению области нечувствительности ИК (см. рис. 2). Это позволяет повысить точность автоматического регулирования и минимизировать риски ложных срабатываний технологических защит, блокировок и сигнализаций автоматизированных систем управления при различных режимах работы технологического оборудования АЭС.

С целью проведения последующих аттестации и метрологической экспертизы предложенных методов коррекции планируется их апробация на АЭС. По ее результатам будет выполнена оценка метрологиче-

ских характеристик ИК, обеспечивающихся при реализации методов. Предварительно прогнозируется уменьшение погрешности ИК-уровня в переходных режимах работы сепараторов пароперегревателей в 2...2,5 раза на основе референтного опыта разработки и применения подобных методик цифровой коррекции показаний.

При достижении положительных практических результатов планируется подготовить дополнение к отраслевым методикам [1].

Внедрение данных способов цифровой коррекции на сегодняшний день имеет особую актуальность в связи с развитием отраслевых программ по увеличению мощности и КПД вновь проектируемых и действующих АЭС, предъявляющих повышенные требования к точности теплофизических измерений и эксплуатационной безопасности в целом.

**Литература****References**

1. ПМ.АТЭ.813.0191—2013. Методы корректировки показаний измерительных каналов давления, уровня и расхода на АЭС с реактором типа ВВЭР.
2. Калашников А.А. Корректировка показаний измерительных каналов уровня с датчиками разности давлений на АЭС // Контроль. Диагностика. 2015. № 12. С. 69—75.
3. Калашников А.А. Справочник по настройке промышленных гидростатических уровнемеров. М.: Инфра-инженерия, 2017.
4. Иванова Г.М., Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Издат. дом МЭИ, 2007.
5. СП 77.13330.2016. Системы автоматизации. Актуализированная редакция СНиП 3.05.07—85.
6. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М.: Изд-во МЭИ, 1999.
7. Тверской Ю.С., Таламанов С.А. Технология АСУ ТП электростанций (особенности, проблемы и перспективы развития) // Вестник Ивановского гос. энергетического ун-та. 2010. № 3. С. 117—123.
8. ГОСТ 22520—85. Датчики давления, разрежения и разности давлений с электрическими аналоговыми выходными сигналами ГСП. Общие технические условия.
9. 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.
10. 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.

1. PM.ATE.813.0191—2013. Metody Korrektirovki Pokazaniy Izmeritel'nykh Kanalov Davleniya, Urovnya i Raskhoda na AES s Reaktorom Tipa VVER. (in Russian).
2. Kalashnikov A.A. Korrektirovka Pokazaniy Izmeritel'nykh Kanalov Urovnya s Datchikami Raznosti Davleniy na AES. Kontrol'. Diagnostika. 2015;12:69—75. (in Russian).
3. Kalashnikov A.A. Spravochnik po Nastroyke Promyshlennykh Hidrostaticheskikh Urovnemerov. M.: Infra-inzheneriya, 2017. (in Russian).
4. Ivanova G.M., Kuznetsov N.D., Chistyakov V.S. Teplotekhnicheskie Izmereniya i Pribory. M.: Izdat. Dom MEI, 2007. (in Russian).
5. SP 77.13330.2016. Sistemy Avtomatizatsii. Aktualizirovannaya Redaktsiya SNiP 3.05.07—85. (in Russian).
6. Aleksandrov A.A., Grigor'ev B.A. Tablitsy Teplofizicheskikh Svoystv Vody i Vodyanogo Para. M.: Izd-vo MEI, 1999. (in Russian).
7. Tverskoy Yu.S., Talamanov S.A. Tekhnologiya ASU TP Elektrostantsiy (Osobennosti, Problemy i Perspektivy Razvitiya. Vestnik Ivanovskogo Gos. Energeticheskogo Un-ta. 2010;3:117—123. (in Russian).
8. GOST 22520—85. Datchiki Davleniya, Razrezheniya i Raznosti Davleniy s Elektricheskimi Analogovymi Vykhodnymi Signalami GSP. Obshchie Tekhnicheskie Usloviya. (in Russian).
9. Aleksandrov A.A. Sistema Uravneniy IAPWS-IF-97 dlya Vychisleniya Termodinamicheskikh Svoystv Vody i Vodyanogo Para v Promyshlennykh Raschetakh. Ch. 1. Osnovnye Uravneniya. Teploenergetika. 1998;9:69—77. (in Russian).
10. Aleksandrov A.A. Sistema Uravneniy IAPWS-IF-97 dlya Vychisleniya Termodinamicheskikh Svoystv Vody i Vodyanogo Para v Promyshlennykh Raschetakh. Ch. 2. Dopolnitel'nye Uravneniya. Teploenergetika. 1998;10:64—71. (in Russian).

**Сведения об авторах:**

**Воронков Иван Александрович** — студент кафедры автоматизации систем управления тепловыми процессами НИУ «МЭИ», e-mail: VoronkovIA88@bk.ru

**Калашников Александр Александрович** — кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации систем управления тепловыми процессами НИУ «МЭИ», e-mail: aakalashnikov@list.ru

**Information about authors:**

**Voronkov Ivan A.** — Student of Automated Control Systems for Thermal Processes Dept., NRU MPEI, e-mail: VoronkovIA88@bk.ru

**Kalashnikov Aleksandr A.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Automated Control Systems for Thermal Processes Dept., NRU MPEI, e-mail: aakalashnikov@list.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 25.05.2020

**The article received to the editor:** 25.05.2020